

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

INŻYNIERIA MECHANICZNA
BUDOWA I EKSPLOATACJA MASZYN

Rozprawa doktorska

mgr inż. Rafał Nowicki

**Wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych na wskaźniki
technologiczne i stan warstwy wierzchniej po obróbce
elektroerozyjnej**

Promotor
dr hab. inż. Rafał Świercz, prof. uczelni

WARSZAWA 2023

*Wyrażam serdeczne podziękowania
dr hab. inż. Rafałowi Świerczowi, prof. PW
za opiekę naukową, życzliwość, wszechstronną
pomoc oraz trud włożony w prowadzenie pracy.*

*Dziękuję również mojej rodzinie i wszystkim
osobom, które pomagały mi w trakcie pisania
niniejszej pracy oraz były dla mnie wsparciem
i motywacją przez cały okres trwania studiów.*

*Pracę dedykuję moim rodzicom, tacie Jerzemu
i śp. mamie Bożenie.*

STRESZCZENIE

Słowa klucze: EDM, warstwa wierzchnia, wielkość ziarna elektrod grafitowych, wskaźniki technologiczne, warstwa przetopiona, chropowatość powierzchni, właściwości tribologiczne.

Przeprowadzone badania doświadczalne miały na celu określenie wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych o wysokiej izotropowości na wskaźniki technologiczne oraz stan warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej stopu Hastelloy C-22.

W niniejszej pracy zawarto szczegółową analizę literatury związaną z zagadnieniem fizyki zjawiska usuwania materiału w obróbce elektroerozyjnej, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu właściwości fizycznych materiałów wykorzystywanych jako elektrody robocze na cechy struktury geometrycznej powierzchni przedmiotu po elektrodrażeniu, zużycie narzędzia i wydajność usuwania materiału z części obrabianej.

Jednym z głównych czynników determinujących proces elektroerozji są parametry elektryczne. Przeprowadzone badania rozpoznawcze z wykorzystaniem toru pomiarowego umożliwiły wyznaczenie rzeczywistych wartości charakteryzujących przebieg pojedynczego wyładowania elektrycznego. Na ich podstawie zdefiniowano przedziały zmienności stabilnych parametrów obróbki elektrodami grafitowymi oraz ustalono plan badań, według metodyki eksperymentu planowanego. Z uzyskanych wyników badań doświadczalnych wyznaczono statystyczne modele matematyczne opisujące wpływ analizowanych parametrów elektrycznych oraz wielkości ziarna elektrod grafitowych na wskaźniki technologiczne oraz wynikowy stan struktury geometrycznej powierzchni. Zmierzone przestrzenne parametry chropowatości powierzchni po elektrodrażeniu pozwoliły określić wpływ parametrów technologicznych procesu na właściwości tribologiczne przedmiotu. Dokonano również analizy składu chemicznego powierzchni próbek oraz elektrod roboczych po obróbce elektroerozyjnej w celu kompleksowego poznania mechanizmu zużycia narzędzia, w zależności od zastosowanej wielkości ziarna grafitu oraz polaryzacji elektrod. Na podstawie wykonanych zglądów metalograficznych oraz analizy struktury warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego określono wpływ parametrów elektrycznych oraz właściwości fizycznych elektrod grafitowych na konstytuowanie się grubości warstwy przetopionej.

Opracowane modele matematyczne mogą zostać zaimplementowane w projektowaniu technologii obróbki EDM jako wytyczne doboru odpowiednich parametrów obróbki oraz wielkości ziarna elektrod grafitowych, które umożliwią osiągnięcie pożądanych wskaźników technologicznych oraz jakości wykończenia powierzchni przedmiotu.

ABSTRACT

Keywords: EDM, surface texture, the grain size of graphite electrodes, technological indicators, recast layer, surface roughness, tribological properties.

The purpose of the experimental investigation was to determine the effect of grain size of high isotropic graphite electrodes on technological indicators and the condition of the surface texture of Hastelloy C-22 after electrical discharge machining.

This paper contains a detailed literature analysis related to the physics of material removal in electrical discharge machining, with particular emphasis on the impact of the physical properties of materials used as tool electrodes on the surface texture features of a workpiece as well as relative tool wear rate and process efficiency.

One of the main factors determining the EDM process are electrical parameters. A measurement circuit was used to monitor the real values characterizing the waveform of a single electric discharge. Based on the preliminary manufacturing tests, the stable range of input machining parameters with the use of the graphite electrodes were found and the research plan was established according to the methodology of the planned experiment. The conducted experimental research made it possible to determine empirical models of a second-degree polynomial describing the influence of the selected electrical parameters and the grain size of the graphite electrodes on the technological indicators and the condition of the surface texture after electrical discharge treatment. Based on the obtained results of surface roughness measurements, the influence of technological EDM process parameters on the tribological properties of the workpiece was determined. The EDS spectrum of the machined surface and the graphite electrodes after EDM were analyzed to comprehensively understand the tool wear mechanism of electrodes, depending on the size of the graphite grain used and the tool polarity. Based on the metallographic research, the influence of the electrical parameters and physical properties of the graphite electrodes on formation of recast layer thickness was determined.

The developed predictive models can be implemented for the construction of technological tables in modern erosion machines as guidelines for selecting appropriate machining parameters and the graphite grain size, which will enable the achievement of the desired technological indicators and the condition of the surface texture.

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	15
2. Stan zagadnienia z zakresu obróbki elektroerozyjnej	16
2.1. Wiadomości podstawowe dotyczące obróbki elektroerozyjnej.....	16
2.2. Fizyka zjawiska usuwania materiału podczas obróbki elektroerozyjnej	21
2.3. Erozja elektryczna elektrod	27
2.4. Rola dielektryka w mechanizmie erozji materiału	34
2.5. Wpływ właściwości materiału elektrod na proces EDM.....	41
2.6. Elektrody grafitowe	49
2.6.1. Grafit o wysokiej izotropowości (POCO).....	52
2.6.2. Elektrody grafitowe w obróbce elektroerozyjnej	57
2.7. Warstwa wierzchnia	64
3. Cel i zakres pracy	72
3.1. Uzasadnienie podjęcia pracy	72
3.2. Cel pracy	73
3.3. Zakres pracy	74
3.4. Przedmiot badań	76
4. Warunki i metodyka badań	83
4.1. Aparatura badawcza	83
4.1.1. Drażarka elektroerozyjna	83
4.1.2. Profilometr skanujący	85
4.1.3. Mikroskopy do badań mikrostruktury warstwy wierzchniej.....	86
4.1.4. Karta oscyloskopowa	87
4.2. Charakterystyka impulsów elektrycznych w obróbce elektroerozyjnej	88
4.3. Schemat toru pomiarowego do badań charakteru impulsów elektrycznych w procesie EDM ..	90

4.4.	Badania wstępne wpływu charakteru impulsów elektrycznych w procesie EDM z wykorzystaniem elektrod grafitowych na efekty obróbki	93
4.5.	Planowany eksperyment	97
5.	Badania wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych na wskaźniki technologiczne.	104
5.1.	Modele statystyczne MRR i TWR.....	107
5.1.1.	Analiza uzyskanych wyników badań wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych na wydajność objętościową drążenia	112
5.1.2.	Analiza uzyskanych wyników badań wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych na względne zużycie elektrody roboczej	118
6.	Badanie wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych i parametrów obróbki na chropowatość powierzchni po EDM.....	121
6.1.	Charakterystyka struktury geometrycznej powierzchni po obróbce EDM	122
6.2.	Modele statystyczne kształtowania SGP	134
7.	Badanie składu chemicznego powierzchni wybranych próbek po obróbce EDM.....	146
8.	Udział nośny powierzchni po obróbce EDM.....	151
9.	Badania wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych i parametrów elektrycznych na strukturę metalograficzną powierzchni po EDM z polaryzacją prostą	156
9.1.	Badanie grubości warstwy przetopionej.....	157
9.2.	Badanie defektów mikrostrukturalnych.....	162
9.3.	Modele statystyczne kształtowania warstwy przetopionej po obróbce EDM z polaryzacją prostą	165
10.	Podsumowanie i wnioski.....	168
10.1.	Wnioski o charakterze użytkowym i poznawczym.....	168
10.2.	Wnioski dotyczące dalszych badań.....	171
	Literatura	172

WYKAZ STOSOWANYCH OZNACZEŃ

A – obszar próbkowania,

a – współczynnik akomodacji,

a_p – głębokość drażenia,

E – energia pojedynczego wyładowania elektrycznego,

f – liczba stopni swobody,

F – wartość funkcji testowej testu Fishera – Snedecora,

F_{kr} – wartość krytyczna funkcji testowej testu Fishera – Snedecora,

I – natężenie prądu,

I_c – średnia wartość natężenie prądu wyładowania,

K – liczba parametrów identyfikująca badany model,

k – liczba współczynników w równaniu regresji,

M – liczba punktów pomiarowych na profilu chropowatości,

m_{1ER} – masa elektrody roboczej przed obróbką,

m_{1PO} – masa przedmiotu przed obróbką,

m_{2ER} – masa elektrody roboczej po obróbce,

m_{2PO} – masa przedmiotu po obróbce,

n – całkowita liczba doświadczeń,

N – liczba profili chropowatości,

N_0 – liczba powtórzeń w punkcie centralnym,

P – moc pojedynczego wyładowania elektrycznego,

R – współczynnik korelacji wielorakiej,

Ra – średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych profilu,

Rz – wysokość nierówności profilu chropowatości według 10-ciu punktów,

S – całkowita liczba zmiennych wejściowych,
 s – wymiar szczeliny międzyelektrodowej na dnie,
 Sa – średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni,
 Sdr – względne rozwinięcie powierzchni,
 Sds – gęstość wierzchołków nierówności powierzchni,
 Sfd – wymiar fraktalny,
 Sk – wysokość chropowatości rdzenia,
 Sp – wartość najwyższego wzniesienia powierzchni,
 Spk – zredukowana wysokość wzniesień,
 S_{pr} – powierzchnia promieniowania,
 $Sr1$ – udział nośny wierzchołków,
 $Sr2$ – udział nośny wgłębień,
 St – całkowita wysokość nierówności powierzchni,
 Sv – głębokość najniższego wgłębienia powierzchni,
 Svk – zredukowana wysokość wgłębień,
 Sz – wysokość nierówności powierzchni według 10-ciu punktów,
 T – temperatura kanału plazmowego,
 t – wartość testowa funkcji t-studenta / czas obróbki,
 t_d – czas opóźnienia zapłonu,
 t_i – czas impulsu,
 t_{kr} – wartość krytyczna funkcji testowej t-studenta,
 t_{off} – czas przerwy między impulsami,
 t_{on} – czas wyładowania elektrycznego,
 t_p – czas pojedynczego cyklu wyładowania elektrycznego,

U – napięcie międzyelektrodowe,

U_0 – napięcie otwarte,

U_A – anodowy spadek napięcia,

U_c – średnia wartość napięcia wyładowania elektrycznego,

U_g – napięcie graniczne,

W_A^e – część energii wyładowania przekazana anodzie przez elektrony,

W_A^r – część energii wyładowania przekazana anodzie przez promieniowanie,

W_i^k – energia kinetyczna jonu,

W_i^n – energia neutralizacji jonu,

α – wartość ramienia gwiazdnego planu eksperymentu / poziom istotności,

Δt – czas drążenia,

Δx – odstęp próbkowania na kierunku osi x,

Δy – odstęp próbkowania na kierunku osi y,

ρ_{ER} – gęstość elektrody roboczej,

ρ_{PO} – gęstość przedmiotu obrabianego,

φ – praca wyjścia elektronów,

δ – współczynnik pochłaniania światła przez powierzchnię metalu,

ε – współczynnik emisyjności metalu,

σ – stała Stefana-Boltzmana / współczynnik wypełnienia impulsu.

WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW

CAD – komputerowe wspomaganie projektowania,

EDM – obróbka elektroerozyjna,

EDS – rentgenowska spektroskopia energodispersyjna,

ER – elektroda robocza,

HAZ – strefa wpływów cieplnych,

MRR – wydajność objętościowa drążenia,

PO – przedmiot obrabiany,

SEM – skaningowy mikroskop elektronowy,

SGP – struktura geometryczna powierzchni,

TWR – względne zużycie elektrody roboczej,

WEDM – wycinanie elektroerozyjne,

WLT – średnia grubość warstwy przetopionej,

W/O – emulsja wody z węglowodorami,

WW – warstwa wierzchnia.

1. WSTĘP

Obecnie obserwowany jest sukcesywny rozwój procesów wytwarzania, który jest stymulowany przez innowacyjne rozwiązania nowych maszyn i urządzeń o wysokich wymaganiach funkcjonalnych. Materiały, z których wykonywane są współczesne konstrukcje powinny być adekwatne do obecnie wysoko stawianym wymaganiom eksploatacyjnym, a także dokładności oraz jakości wykończenia powierzchni wyrobu. Coraz częściej elementy konstrukcji wykonywane są ze specjalnych trudnoobrabialnych materiałów stopowych i kompozytowych o skomplikowanych kształtach geometrycznych. Racjonalna implementacja nowych materiałów w prototypach przedmiotu jest uzależniona od opracowania wydajnych metod ich kształtowania, przy zapewnieniu określonego stanu warstwy wierzchniej. Kształtowanie trudnoskrawalnych materiałów konwencjonalnymi metodami obróbki jest w wielu przypadkach trudne bądź niemożliwe do zrealizowania. Od wielu lat, szerokie zastosowanie w obróbce trudnoobrabialnych materiałów stopowych zajmuje obróbka elektroerozyjna (*Electrical Discharge Machining* – EDM), która umożliwia kształtowanie przedmiotów niezależnie od ich właściwości mechanicznych.

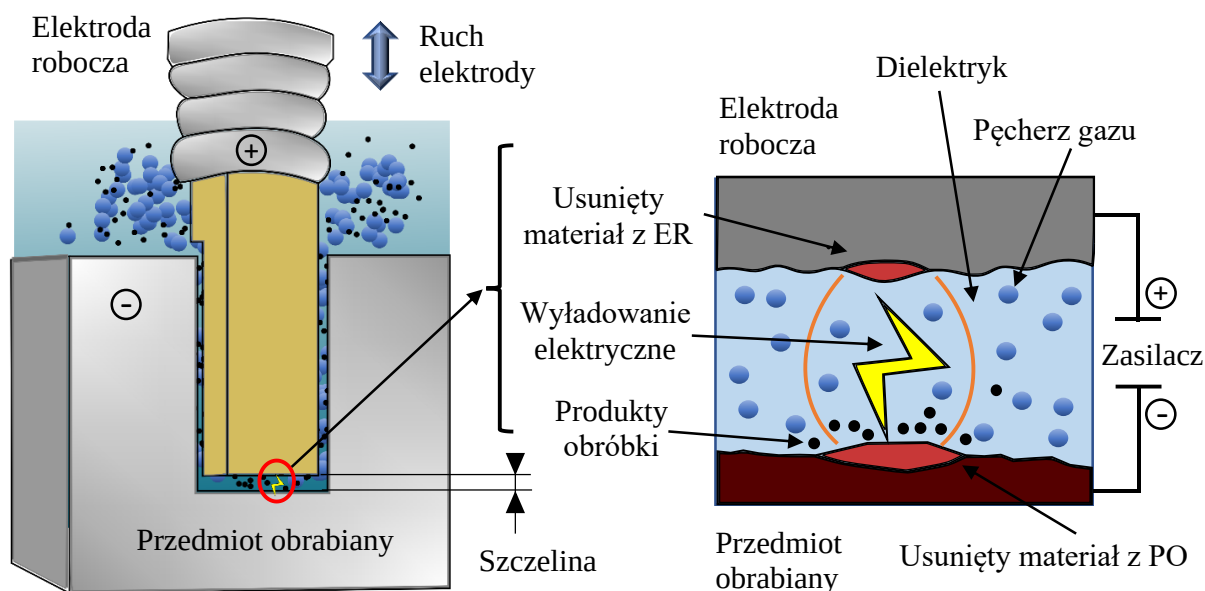
Proces obróbki elektroerozyjnej jest szeroko stosowany w przemyśle lotniczym, kosmicznym i maszynowym do produkcji m.in. matryc kuźniczych, form wtryskowych, mikrootworów, a także części silników lotniczych. W obróbce elektroerozyjnej kształtowanie geometrii przedmiotu odbywa się w wyniku wyładowań elektrycznych, które zachodzą pomiędzy materiałem obrabianym a elektrodą roboczą, w środowisku cieczy dielektrycznej. Procesy cieplne, mechaniczne i chemiczne biorące udział w trakcie obróbki przyczyniają się do konstytuowania charakterystycznej izotropowej tekstury powierzchni. Naprężenia rozciągające w warstwie wierzchniej zmieniają strukturę metalograficzną i propagują mikropęknięcia.

Obecne badania naukowe prowadzone w ośrodkach badawczych i przemysłowych skoncentrowane są na określeniu wpływu właściwości materiału elektrod i parametrów elektrycznych na wydajność procesu oraz zużycie elektrody roboczej, przy jednoczesnym zapewnieniu pożądanego stanu warstwy wierzchniej stopów niklowo-chromowych. Coraz częściej, z przyczyn ekonomicznych oraz technologicznych, w obróbce elektroerozyjnej wykorzystywane są elektrody grafitowe o różnej granulacji. Właściwości fizyczne oraz wielkość ziarna elektrod grafitowych są istotnymi czynnikami uwzględnianymi w projektowaniu technologii EDM.

2. STAN ZAGADNIENIA Z ZAKRESU OBRÓBKİ ELEKTROEROZYJNEJ

2.1. Wiadomości podstawowe dotyczące obróbki elektroerozyjnej

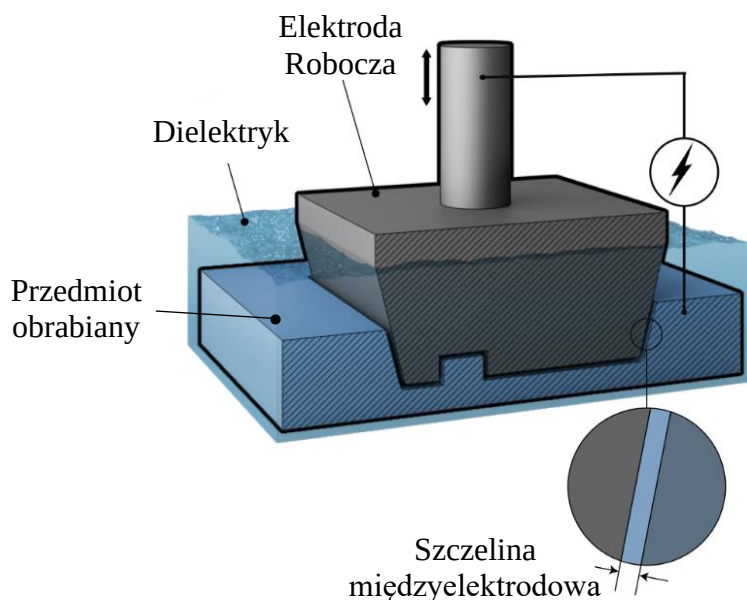
Obróbka elektroerozyjna jest jedną z niekonwencjonalnych metod wytwarzania ubytkowego, w której materiał jest usuwany z części obrabianej w wyniku wyładowań elektrycznych zachodzących w ciekłym lub gazowym ośrodku dielektrycznym pomiędzy dwiema elektrodami przewodzącymi prąd elektryczny [1, 2, 3, 4]. Elektrody podłączone są do generatora impulsów elektrycznych (rys. 2.1). Jedną z nich jest elektroda robocza (ER) a drugą przedmiot obrabiany (PO). Mechanizm usuwania materiału w procesie elektroerozji wykorzystuje w głównej mierze energię elektryczną, która w wyniku wyładowań elektrycznych zamieniana jest w energię cieplną, prowadzącą do topnienia i parowania, a także sublimacji, w lokalnych warstwach powierzchni przedmiotu obrabianego, jaki i elektrody roboczej [5]. Generowane ciepło przyczynia się również do odparowania cieczy dielektrycznej i indukuje wysokie fale ciśnieniowe, które intensyfikują usuwanie stopionego i/lub wyparowanego materiału ze szczeliny międzyelektrodowej [6, 7, 8].



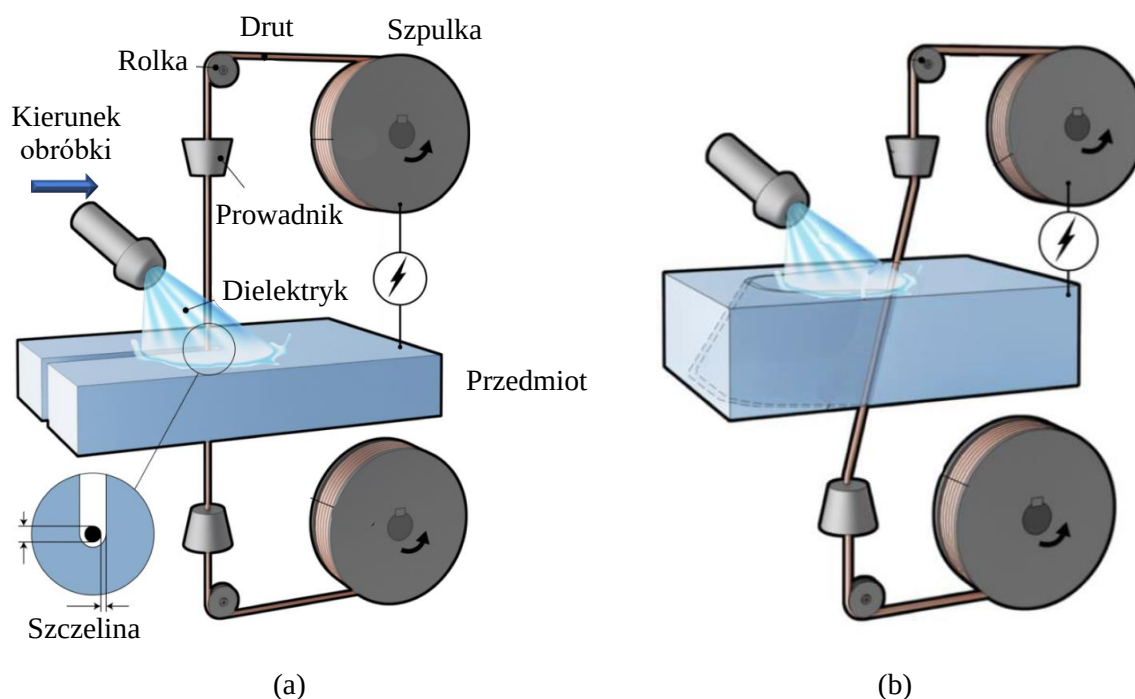
Rys. 2.1. Schemat obróbki elektroerozyjnej

Obróbka elektroerozyjna w sektorze produkcyjnym wykorzystywana jest do kształtowania materiałów w dwóch podstawowych odmianach: drążenie wgłębne (EDM –

Electrical Discharge Machining) i wycinanie elektroerozyjne (WEDM – *Wire Electrical Discharge Machining*). Klasyfikacja obróbki wynika bezpośrednio z kształtu elektrody roboczej, kinematyki procesu, obszaru zastosowań oraz warunków obróbki (rys. 2.2 i 2.3).



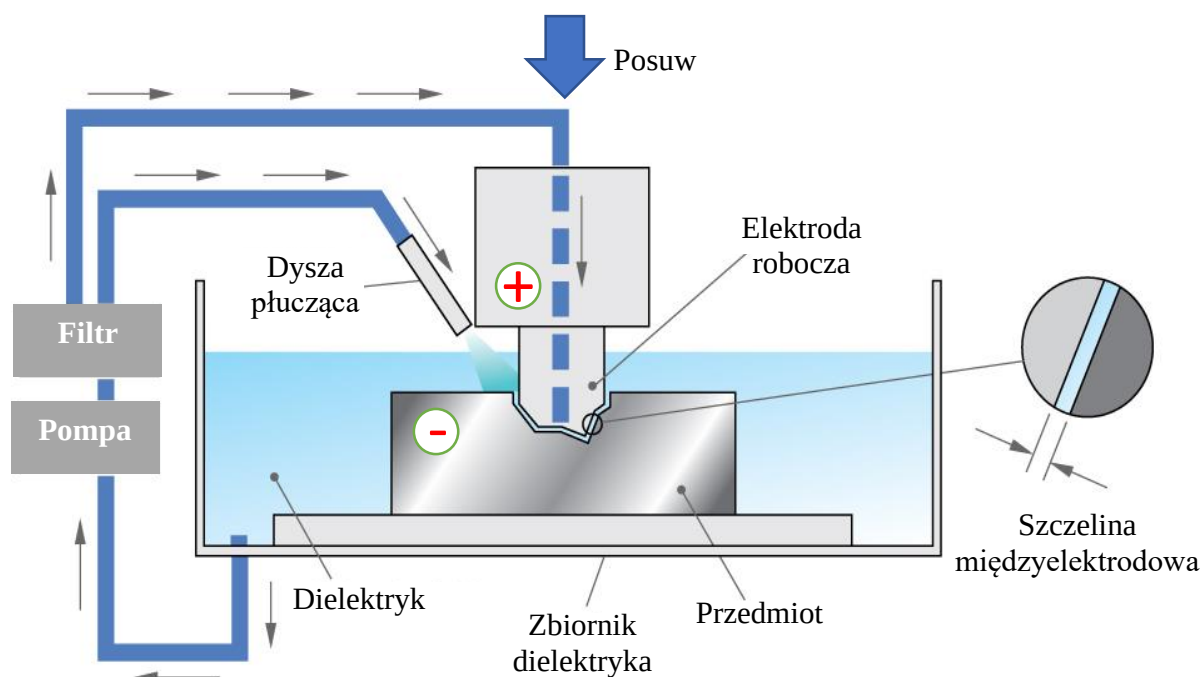
Rys. 2.2. Schemat kinematyki obróbki wgłębnej EDM [9]



Rys. 2.3. Schemat kinematyki obróbki WEDM: a) pod kątem prostym, b) pod kątem [9]

W obróbce elektroerozyjnej wgłębnej elektrodzie roboczej nadawany jest konkretny kształt bryły, która w najprostszej odmianie drążarek jednoosiowych odwzorowuje oczekiwany

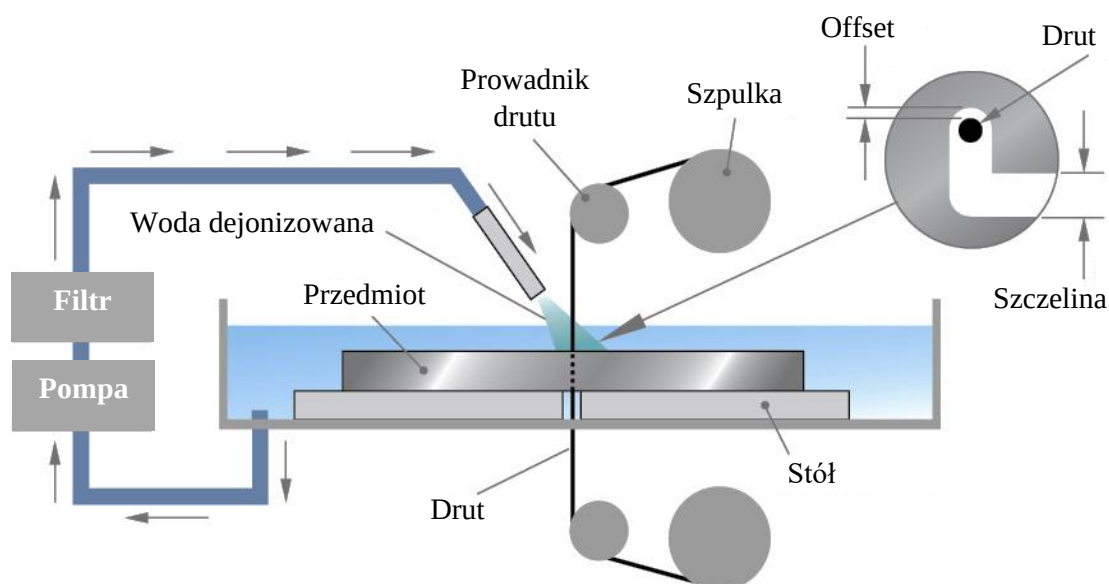
kształt na przedmiocie obrabianym w trakcie procesu elektroerozji (rys. 2.4). Elektroda robocza jest pomniejszona względem pożądanego kształtu na przedmiocie o wartość szczeliny międzyelektrodowej (tzw. *offset*), której wartość determinuje wielkość zastosowanej energii wyładowania elektrycznego. W drążarkach wieloosiowych możliwe jest osiągnięcie skomplikowanych kształtów z wykorzystaniem prostej elektrody roboczej poprzez przemieszczanie przestrzenne narzędzia w obszarze roboczym maszyny po zaprogramowanej trajektorii. Współczesne elektrodrążarki posiadają wbudowane sterowanie numeryczne monitorujące warunki szczeliny (napięcie i natężenie prądu) i sterujące synchronicznie poszczególnymi osiami i generatorem impulsów elektrycznych. Proces erozji odbywa się przy pełnym zanurzeniu elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego w dielektryku (najczęściej w dielektryku węglowodorowym na bazie nafty). W obrabiarkach elektroerozyjnych ciecz dielektryczna jest stale filtrowana w celu oczyszczania jej z produktów erozji [5, 10].



Rys. 2.4. Schemat drążenia elektroerozyjnego (EDM) [11]

W wycinaniu elektroerozyjnym, w odróżnieniu od obróbki elektroerozyjnej EDM, elektrodą roboczą jest cienki drut o średnicy od 0,02 do 0,5 mm (rys. 2.5). Najczęściej wykorzystywanym materiałem na drut do wycinarek jest mosiądz. Do szybkiego wycinania stosuje się specjalne druty powlekane, takie jak mosiądz ocynkowany lub powlekane druty stalowe. W przypadku bardzo cienkich elektrod wykorzystuje się druty wolframowe lub molibdenowe. Wyładowania elektryczne zachodzące pomiędzy przedmiotem a elektrodą

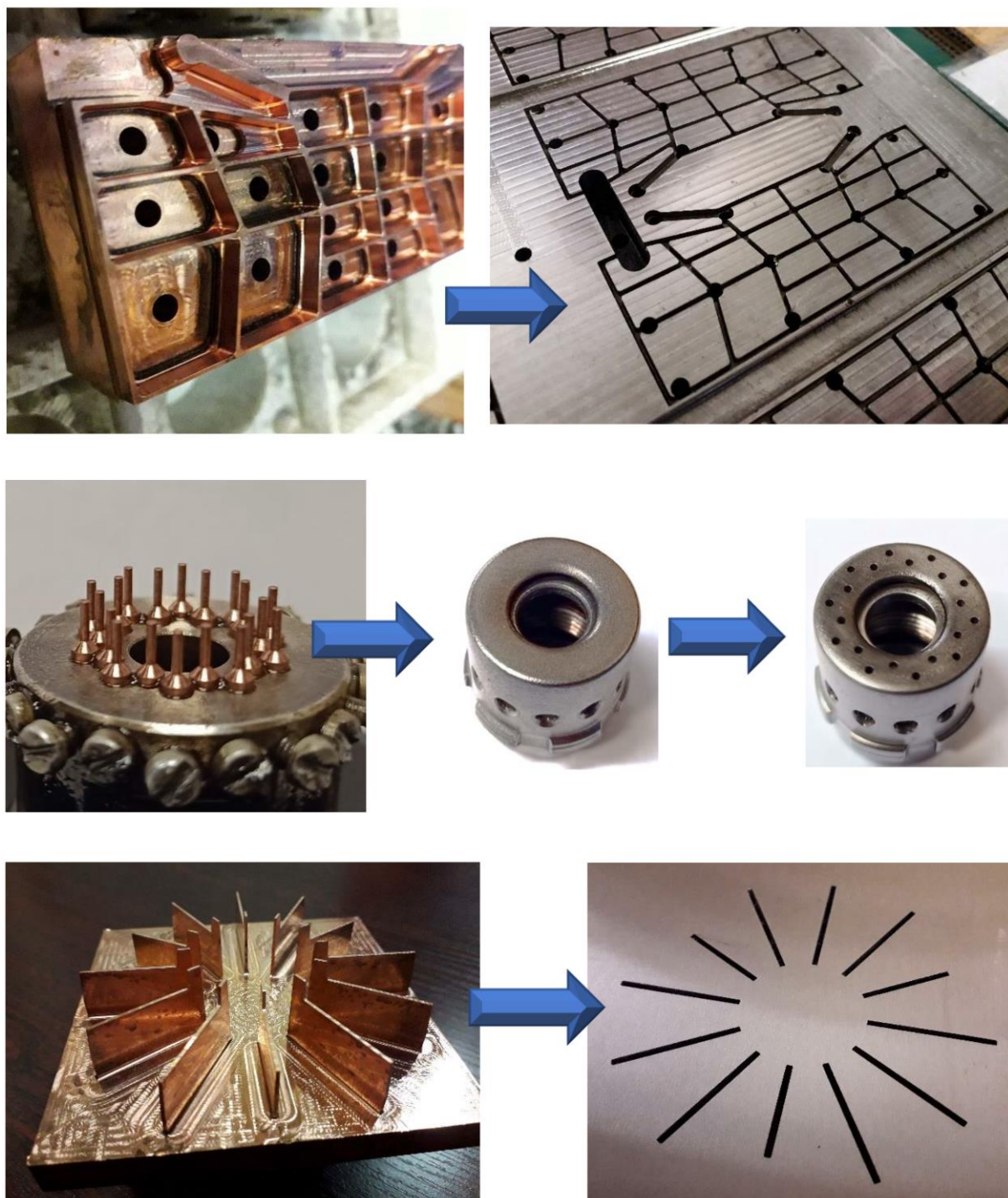
roboczą pozwalają na wycinanie dowolnie skomplikowanych figur prostokreślnych na podstawie napisanego programu obróbkowego. Orientacja i kąt pochylenia drutu są kontrolowane przez synchroniczne przemieszczanie się górnej głowicy względem dolnej. W procesie WEDM najczęściej stosuje się wodę dejonizowaną jako ciecz dielektryczną. Jej przewodność elektryczna jest stały czas kontrolowana i zmniejszana za pomocą żywicy dejonizowanej, aby uniknąć zjawiska elektrolizy w szczelinie i utrzymać wysokie napięcie otwarte. W zależności od zadanej dokładności wymiarowo kształtowej oraz jakości wykończenia powierzchni proces wycinania może przebiegać w kilku przejściach począwszy od wycinania zgrubnego nadającego kształt, wykończeniowego usuwającego błędy kształtu, na skutek drgań drutu, i dodatkowych przejść wygładzających powierzchnię przedmiotu [5, 12].



Rys. 2.5. Schemat wycinania elektroerozyjnego (WEDM) [13]

Obróbka elektroerozyjna od wielu lat jest szeroko stosowaną technologią produkcyjną. Dzięki bezkontaktowej metodzie obróbki możliwe jest kształtowanie zarówno materiałów przewodzących prąd elektryczny, jaki i półprzewodników o przewodności większej od 0,01 S/cm, niezależnie od ich właściwości mechanicznych. Z tego względu obróbka elektroerozyjna odgrywa ważną rolę w sektorach przemysłu lotniczego, kosmicznego, motoryzacyjnego oraz inżynierii ogólnej. Procesy EDM i WEDM są szeroko stosowane w produkcji matryc i form, gdzie obrabia się skomplikowane kształty w twardych materiałach z dużą dokładnością wymiarowo-kształtową (rys. 2.6). Bezstykowa obróbka eliminuje problem drgań mechanicznych, dlatego procesy elektroerozyjne z powodzeniem wykorzystywane są w kształtowaniu cienkich i elastycznych części oraz głębokich rowków i otworów, które są

trudnoobrabialne konwencjonalnymi metodami obróbki. Obecnie obróbka elektroerozyjna znalazła zastosowanie w nowych dziedzinach nauki, takich jak medycyna, chirurgia, optyka, energetyka jądrowa, a także obszary badawczo rozwojowe w przemyśle motoryzacyjnym [1, 2, 5, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].



Rys. 2.6. Przykłady elektrod roboczych oraz przedmiotów po obróbce elektroerozyjnej, wykonanych przez autora pracy

2.2. Fizyka zjawiska usuwania materiału podczas obróbki elektroerozyjnej

Fizyka zjawiska usuwania materiału w procesie elektroerozji ma złożony charakter. Obecnie nie ma pełnego i jednoznacznego modelu opisującego w szczegółowy sposób procesów zachodzących podczas wyładowania elektrycznego w szczelinie międzyelektrodowej. Wielu badaczy [5, 14, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32] popiera teorię termoelektrycznego zjawiska erozji powstającego w wyniku wyładowań iskrowych pomiędzy dwoma materiałami przewodzącymi prąd elektryczny, które powodują topnienie i odparowanie materiału elektrod. Zgodnie z tą teorią wyładowanie elektryczne pomiędzy elektrodą roboczą a przedmiotem obrabianym przebiega w czterech kolejnych etapach:

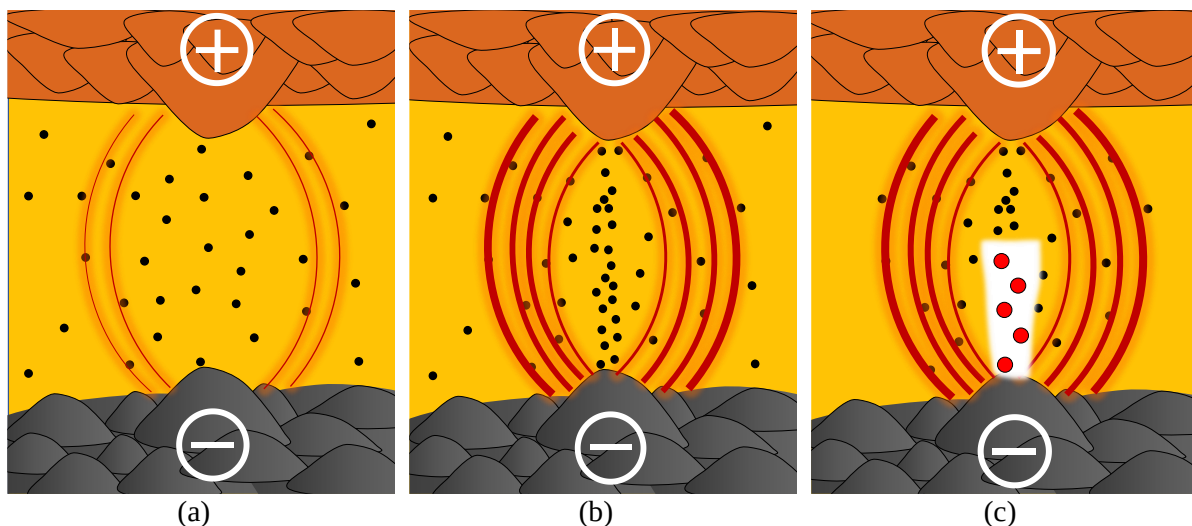
- faza inicjacji wyładowania elektrycznego,
- tworzenie się kanału plazmowego,
- topnienie i odparowanie materiału obrabianego,
- oczyszczanie z produktów obróbki i stabilizacja warunków w szczelinie.

W obróbce elektroerozyjnej biorą udział dwie elektrody podłączone do generatora impulsów prądowych, oddzielone od siebie wąską szczeliną wypełnioną płynem dielektrycznym (rys. 2.7a). W biegunowości prostej przedmiot obrabiany podłączony jest z ujemnym biegunem prądu, a więc jest katodą, a elektroda robocza jest anodą. W przeciwnej konfiguracji mamy do czynienia z biegunowością odwróconą.

Napięcie doprowadzone do elektrod zanurzonych w płynnym dielektryku, oddzielonych od siebie nieprzewodzącą szczeliną, generuje niejednorodne i zmienne w czasie pole elektryczne (rys. 2.7b), które jest odwrotnie proporcjonalne do odległości pomiędzy katodą i anodą (s), a wprost proporcjonalne do wartości napięcia w szczelinie (U). Natężenie pola elektrycznego (E_0) osiąga największe wartości w miejscu, w którym szczelina jest najmniejsza:

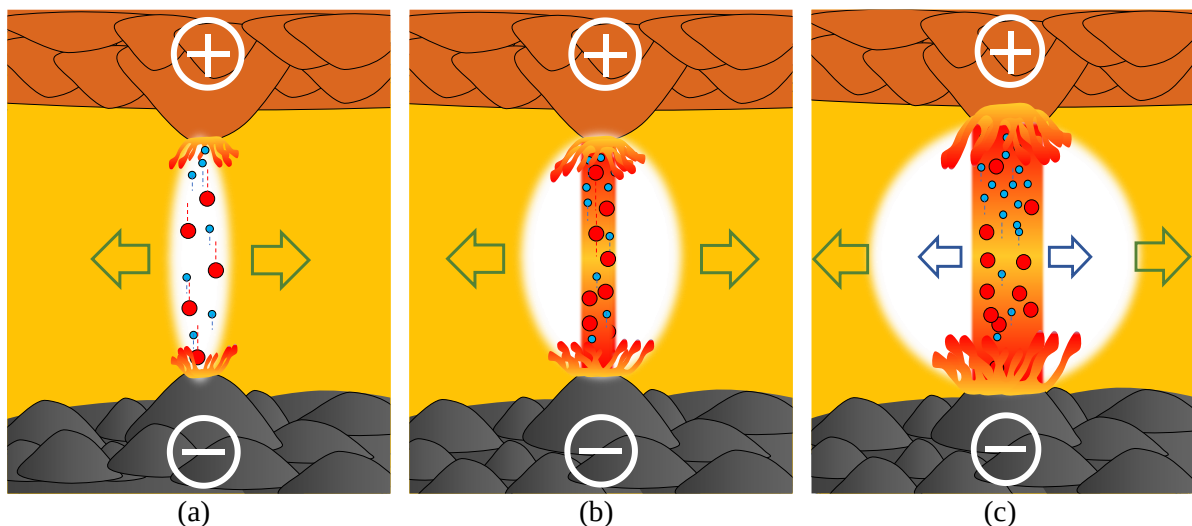
$$E_0 = \frac{U}{s} \quad (2.1)$$

W początkowej fazie inicjacji wyładowania elektrycznego nie zachodzi przepływ prądu ze względu na wysoką rezystancję płynu dielektrycznego. W momencie, kiedy serwomechanizm obrabiarki przemieszcza elektrodę w kierunku powierzchni obrabianej zwiększa się wartość pola elektrycznego. Przy odpowiednio niskiej szerokości szczeliny międzyelektrodowej oraz dostatecznie wysokim natężeniu pola elektrycznego ($10^7 - 10^8$ V/m) i pewnym napięciu U_g , zwanym napięciem granicznym, następuje zimna emisja elektronów z powierzchni katody (rys. 2.7c).



Rys. 2.7. Etapy przebiegu wyładowania elektrycznego w obróbce elektroerozyjnej: a) tworzenie pola elektrycznego, b) formowanie mostków napięciowych, c) jonizacja ośrodka

Pole elektryczne przyspiesza elektrony wyciągnięte z powierzchni katody w kierunku anody. Zapoczątkowana emisja elektronów powoduje miejscowy wzrost temperatury cieczy dielektrycznej oraz materiału katody. Elektrony zderzając się z atomami ośrodka powodują ich lawinową jonizację udarową, w konsekwencji czego tworzy się wąski kanał plazmowy wypełniony elektronami oraz dodatnio naładowanymi jonami (rys. 2.8a) [5].



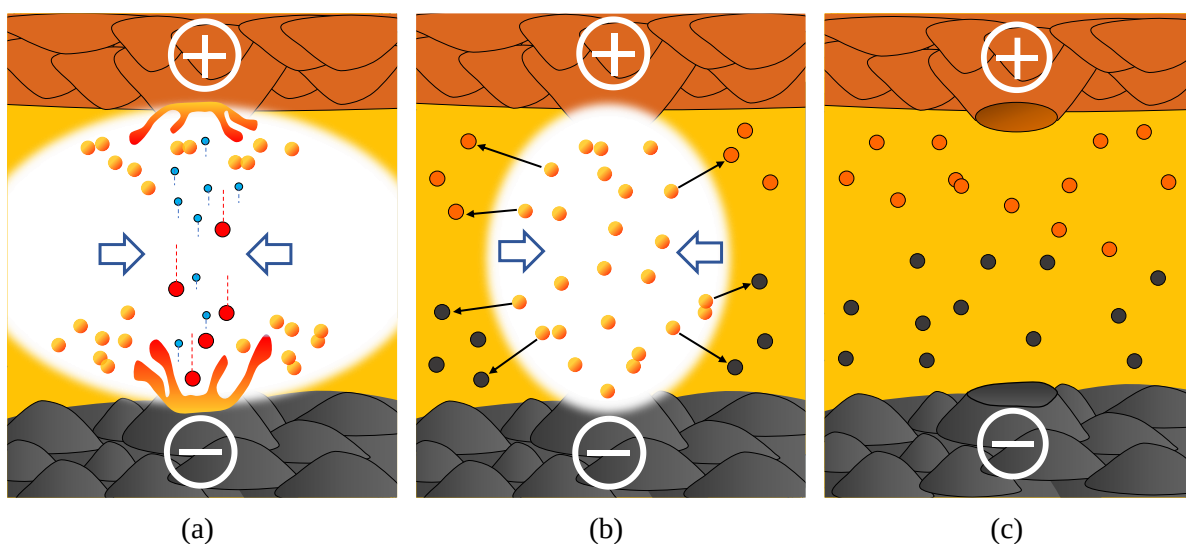
Rys. 2.8. Etapy przebiegu wyładowania elektrycznego w obróbce elektroerozyjnej: a) tworzenie kanału plazmowego, b) formowanie pęcherza gazowego oraz topnienie materiału elektrod, c) ekspansja pęcherza gazowego oraz dalsze topnienie i odparowanie materiału elektrod

Energia kinetyczna elektronów uderzających w powierzchnię anody oraz jonów w powierzchnię katody zamieniana jest na energię cieplną. Przepływający przez kanał plazmowy prąd elektryczny w trakcie wyładowania iskrowego powoduje lokalne nagrzanie

pewnej objętości materiału elektrod do temperatury topnienia, a następnie do temperatury wrzenia. Przetopione objętości materiału elektrod zaczynają odparowywać, w wyniku czego powstają sferyczne wgłębienia zwane kraterami.

Na skutek parowania materiału katody i anody wytwarzają się gazy ze składników tworzących elektrody. Dielektryk zaczyna gwałtownie wrzeć w bezpośrednim sąsiedztwie kanału wyładowania. W wyniku parowania ośrodka tworzy się pęcherz gazowy wokół kanału plazmowego (rys. 2.8b).

Wraz z wydłużeniem czasu wyładowania elektrycznego zwiększa się średnica kanału plazmowego oraz wytworzonego wokół niego pęcherza gazowego (rys. 2.8c), który wypełniony jest jonami roztopionego i odparowanego materiału elektrod. Proces przemian fazowych materiału ma charakter mikrowybuchowy, czemu sprzyjają zmiany ciśnienia w pęcherzu gazowym.

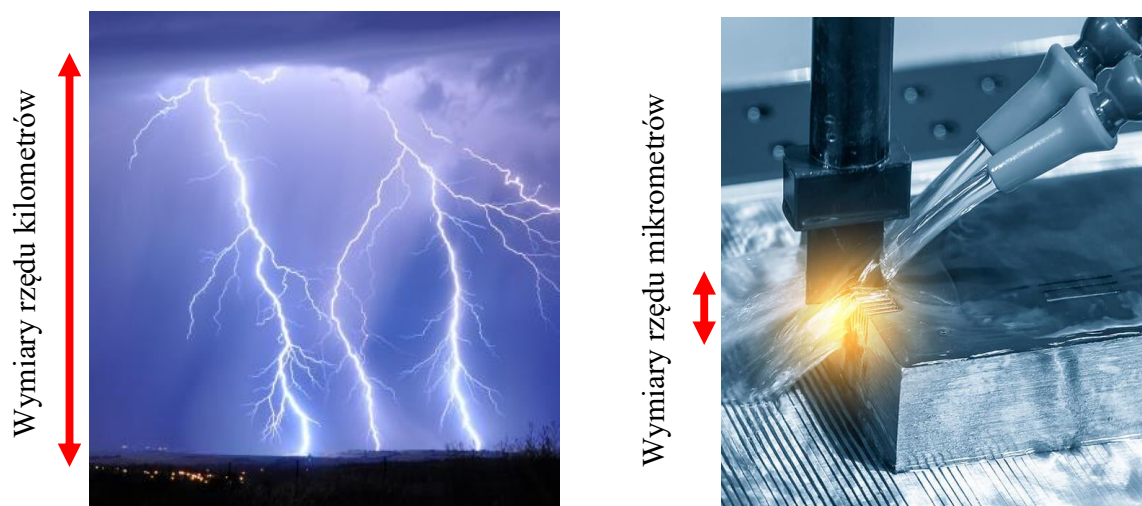


Rys. 2.9. Etapy przebiegu wyładowania elektrycznego w obróbce elektroerozyjnej: a) zanik kanału plazmowego, b) chłodzenie rozgrzanej objętości materiału elektrod przez dielektryk, c) dejonizacja kanału międzyelektrodowego

Spadek natężenia prądu i napięcia elektrycznego powoduje zanik kanału plazmowego i implozyjny rozpad pęcherza gazowego (rys. 2.9a). Wyrzucony z kraterów materiał zastyga w cieczy dielektrycznej tworząc mikroskopijne produkty erozji (rys. 2.9b). Pozostała objętości roztopionego materiału w kraterach ulega ponownej rekrytalizacji, na skutek chłodzenia przez przepływający w szczelinie dielektryk. Na powierzchni tworzy się warstwa o zmienionej strukturze i właściwościach fizyko-chemicznych w stosunku do pierwotnych właściwości materiału rdzenia (rys. 2.9c).

Zjawisko przebicia elektrycznego jest bardzo złożonym procesem i związane jest z powstawaniem cienkiej, słabo zjonizowanej wiązki zwanej streamerem. Streamer powstaje w wyniku lawinowej emisji elektronów wydobywających się z powierzchni katody i podążających w stronę anody. Po jego zainicjowaniu zaczyna rosnąć w szczelinie i rozgałęziać się po zygzakowatych ścieżkach w sposób losowy. Streamer powoduje parowanie i jonizację cieczy dielektrycznej w szczelinie. Wiązka elektronów, która podąża za streamerem, po dotarciu do anody tworzy wysoce zjonizowany kanał plazmowy (iskrę). Faza przebicia jest zakończona i rozpoczyna się faza wyładowania elektrycznego. Wyładowaniom iskrowym towarzyszy trzaskający dźwięk powstający z fali uderzeniowej w trakcie szybkiego i miejscowego nagrzewania się gazu wokół kanału plazmowego. Średnica kanału plazmowego zwiększa się z upływem czasu ze względu na otaczający gaz, który jest stopniowo jonizowany w wyniku przewodzenia ciepła i fali uderzeniowej [33, 34, 35, 36].

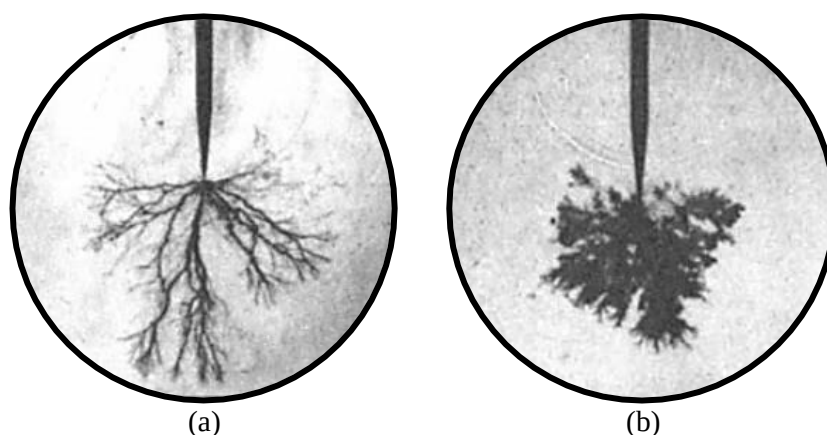
Zjawisko powstania streamera w szczelinie jest analogiczne do zjawisk mających miejsce w przyrodzie w trakcie wyładowania atmosferycznego, w postaci piorunów, w trakcie burzy (rys. 2.10). Istotną różnicą w obu przypadkach jest wielkość występujących zjawisk, m.in. odległość między chmurą burzową a powierzchnią ziemi jest kilka rzędów większa od odległości między elektrodą a przedmiotem w obróbce elektroerozyjnej [37].



Rys. 2.10. Analogia zjawiska przebicia elektrycznego w obróbce elektroerozyjnej do wyładowań atmosferycznych w przyrodzie

W zależności od zastosowanej polaryzacji elektrod streamery charakteryzują się odmiennymi własnościami. Przy biegunowości dodatniej (rys. 2.11a) streamery posiadają wydłużony, nitkowaty kształt z wyraźnymi zygzakowatymi rozgałęzieniami i rozprzestrzeniają

się z prędkościami w zakresie od 1 do 1000 m/s, natomiast dla polaryzacji ujemnej (rys. 2.11b) streamery mają krzaczkowaty kształt i osiągają prędkości do 100 m/s [35].



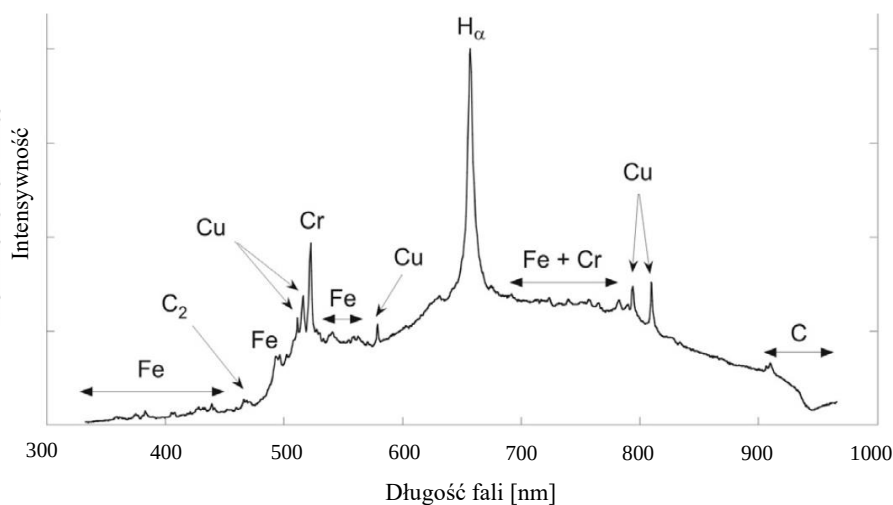
Rys. 2.11. Fotografia streamera dla polaryzacji a) prostej, b) odwróconej w nafcie [35]

Wyładowanie elektryczne zainicjowane jest zwykle w miejscu, gdzie występują najmniejsze odległości między mikronierównościami elektrod lub w miejscu, w którym występuje największa koncentracja zanieczyszczeń dielektryka (stanowiących w głównej mierze produkty erozji z poprzednich wyładowań), które obniżają wytrzymałość elektryczną ośrodka.

Temperatura wewnątrz kanału plazmowego jest tematem badań wielu naukowców. Ogólnie jej wartość szacowana jest w zakresie od 8000 do 12 000 °C. Według Jamesona [38] może wynosić 20 000 °C, a według Gostimirovica [2] nawet 40 000 °C. Gęstość mocy wewnątrz kanału wyładowania wynosi około 10^{17} W/m² [5, 39]. Na podstawie badań składu chemicznego kanału plazmowego stwierdzono, iż zawiera on świecący, zjonizowany, przewodzący prąd elektryczny gaz metali obu elektrod [5]. Średnia gęstość elektronów w kanale plazmowym jest bardzo wysoka i szacowana na około 10^{17} - 10^{19} cm⁻³ dla polaryzacji dodatniej i 10^{16} - 10^{17} cm⁻³ dla polaryzacji ujemnej [36, 40]. Kanały plazmowe powstałe w cieczech dielektrycznych charakteryzują się mniejszymi wymiarami i większymi gęstościami od kanałów powstałych w gazach, za względu na ciśnienie wywierane przez ciecz.

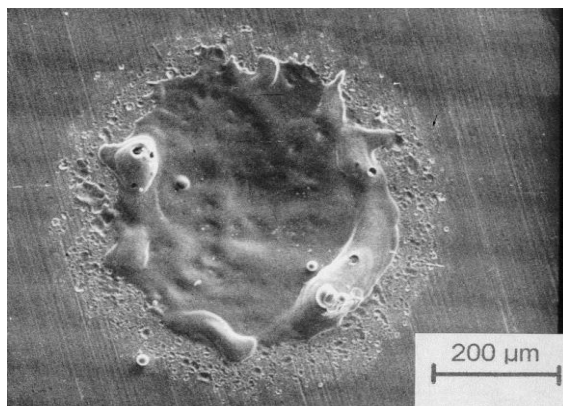
Descoeudres [33] na podstawie obserwacji widma spektroskopowego kanału plazmowego stwierdził, że dominującą linią jest linia Balmera H_{α} emitowana przez atomy wodoru powstałe z rozpadu cząsteczek dielektrycznych (rys. 2.12). Zaobserwowano również linie atomów węgla i cząsteczek C_2 . Ich obecność świadczy o prawie całkowitym rozerwaniu cząsteczek organicznych oleju w wyniku wyładowania elektrycznego. Kanał plazmowy zawiera również zanieczyszczenia: obecność kilku linii atomów miedzi z elektrody roboczej,

a także linii atomów żelaza, chromu i węgla pochodzących z usuniętego stalowego przedmiotu obrabianego.



Rys. 2.12. Widmo spektroskopowe kanału plazmowego ($I_c = 12$ A, $t_{on} = 2$ μ s, dielektryk: nafta, elektroda robocza: miedź, przedmiot obrabiany: stal) [33]

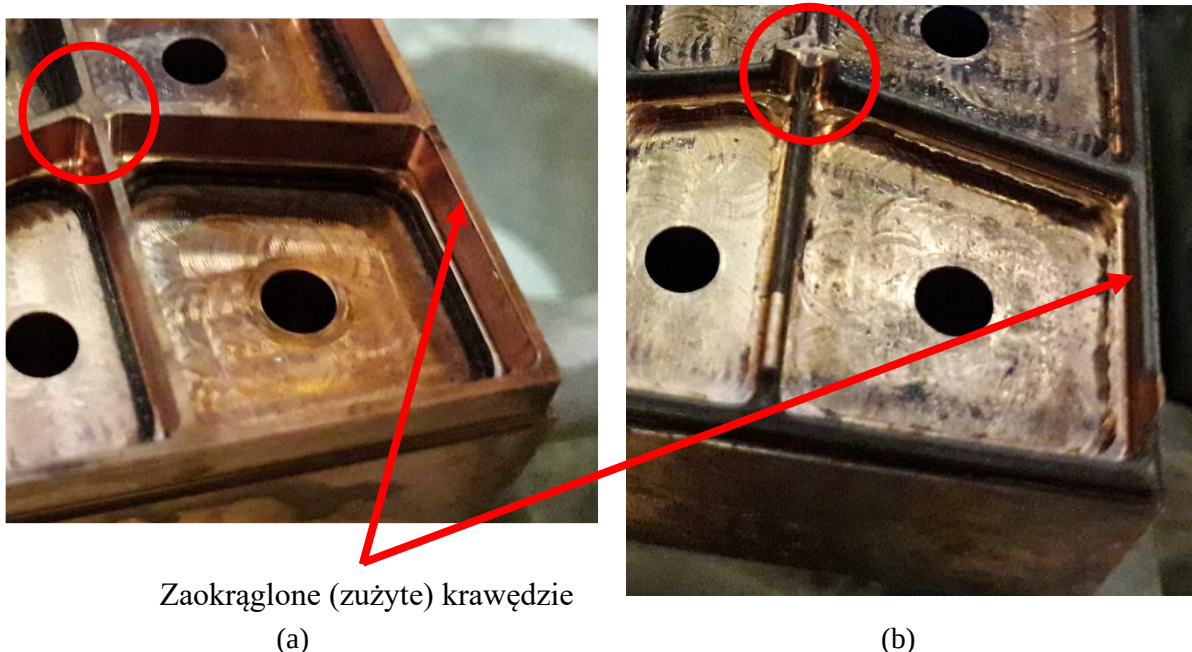
Wiele hipotez zakłada, iż wyładowanie elektryczne jest jednokanałowe i charakteryzuje się beczkowatym kształtem, obejmującym pewną, bliżej nieokreśloną część powierzchni powstającego krateru. Obserwacje mikroskopowe pojedynczych kraterów przeprowadzone przez zespół badaczy z Politechniki Krakowskiej [41, 42] wskazują, iż wyładowanie elektryczne na powierzchni katody może być wielokanałowe, co jest sprzeczne w stosunku do dotychczasowo przyjmowanych modeli tworzenia się krateru na powierzchni elektrod. Na podstawie zdjęcia (rys. 2.13) wykonanym przy użyciu mikroskopu skaningowego zaobserwowano wokół głównego krateru otaczający go pierścień kraterów o mniejszych średnicach.



Rys. 2.13. Krater po obróbce elektroerozyjnej z polaryzacją prostą ($I_c = 60$ A, $t_{on} = 100$ μ s, przedmiot obrabiany: stali NC6, elektroda: M1E, ciecz dielektryczna – nafta kosmetyczna) [42]

2.3. Erozja elektryczna elektrod

W obróbce elektroerozyjnej zachodzi jednoczesna erozja obu elektrod. W zależności od zastosowanej biegunowości, katoda i anoda zużywają się w innym stopniu. Zużycie elektrody roboczej jest zjawiskiem niepożądanym, które zmniejsza dokładność obróbki. Obszary zużycia narzędzia są najczęściej zauważalne na ostrych krawędziach, narożach oraz elementach cienkościennych elektrody (rys. 2.14). W wielu przypadkach, w celu osiągnięcia wysokiej dokładności wymiarowo-kształtowej, proces drążenia elektroerozyjnego konkretnego kształtu realizowany jest kilkoma elektrodami roboczymi. Pierwsza elektroda nadaje zgrubny kształt, kolejne usuwają błędy kształtu, powstałe na skutek zużycia narzędzia w poprzedniej operacji technologicznej oraz wygładzają powierzchnię przedmiotu.



Rys. 2.14. Przykład zużycia ostrych krawędzi oraz naroży elektrody roboczej: a) przed obróbką, b) po obróbce elektroerozyjnej

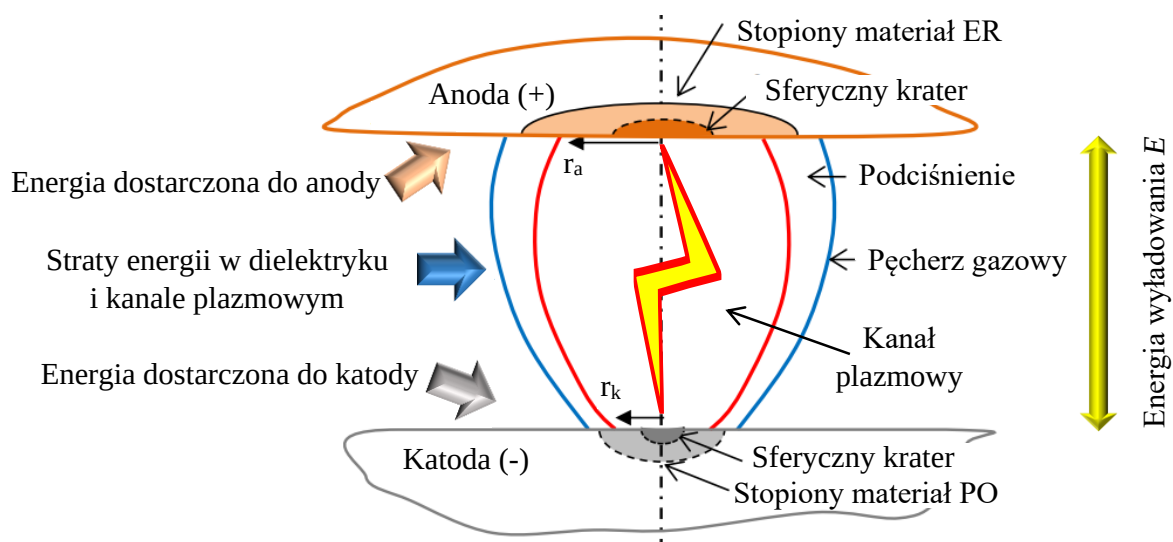
Mechanizm usuwania materiału z powierzchni elektrod w procesie EDM jest przedmiotem badań wielu naukowców. Przy biegunowości prostej, w trakcie wyładowania elektrycznego, elektrony emitowane z katody oraz jony z anody bombardują odpowiednio powierzchnię elektrody roboczej oraz przedmiotu obrabianego. Energia kinetyczna tych cząsteczek konwertowana jest na ciepło, które generuje powierzchniowe źródło ciepła na obu elektrodach. W głębi warstwy wierzchniej tworzą się również objętościowe źródła ciepła Joula wywołane przepływem prądu elektrycznego przez kanał plazmowy. Według Richa [43] ciepło Joula jest skoncentrowane w półkulistej objętości bezpośrednio pod miejscem wyładowania.

Badania przeprowadzone przez Descoeudresa [33] wykazują, iż strumień rozprzestrzeniania się ciepła wewnątrz kanału plazmowego charakteryzuje się rozkładem gaussowskim i jest ściśle skorelowany z natężeniem prądu i czasem wyładowania elektrycznego. Wydzielanie się ciepła na bardzo małej powierzchni powoduje wzrost temperatury do wartości znacznie wyższej niż temperatura topnienia materiału elektrod [5].

W wyniku topnienia materiału tworzą się kratery o sferycznych kształtach rozmieszczone w sposób losowy na powierzchni elektrod. Średnie wielkości geometryczne kraterów są ściśle skorelowane z energią wyładowań elektrycznych oraz właściwościami mechanicznymi i fizycznymi materiału elektrod. Na kształt i rozmiar kraterów wpływ mają również biegunowość elektrod, a także właściwości cieczy dielektrycznej. Objętość usuniętego materiału w trakcie pojedynczego wyładowania zawiera się w przedziale od 10^{-6} do 10^{-4} mm³, a wydajność mieści się zazwyczaj w przedziale od 2 do 400 mm³/min [1, 5, 44].

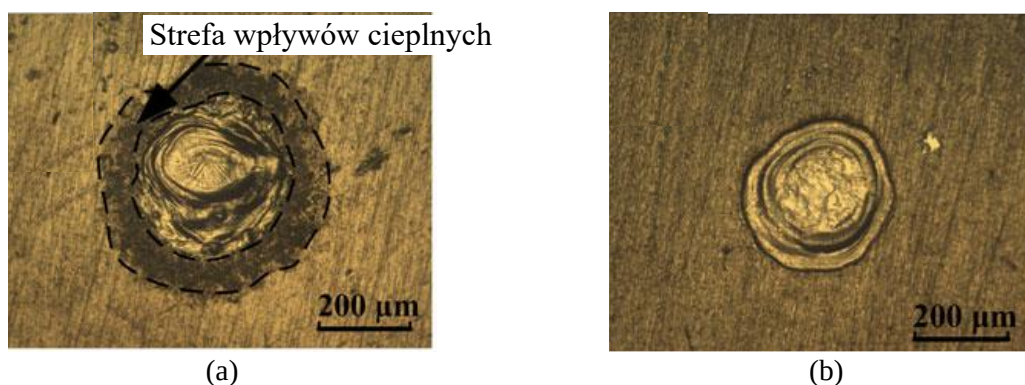
Kanał plazmowy składa się z elektronów poruszających się z prędkością rzędu 10^5 - 10^8 m/s oraz z jonów poruszających się z prędkością rzędu 10^2 m/s [5, 33]. Ze względu na mniejszą masę elektronów osiągają one większe prędkości w polu elektrycznym niż dodatnio naładowane jony. W rezultacie elektrony przenoszą więcej energii cieplnej do anody niż dodatnio naładowane jony do katody [5, 34, 36].

W trakcie wyładowania elektrycznego elektrony emitowane z powierzchni katody absorbowane są przez anodę, która zaczyna topić się jako pierwsza. Proces zestalania przetopionej objętości elektrody przebiega szybciej ze względu na rozszerzający się zasięg kanału plazmowego, który dąży do redukcji strumienia ciepła i zmniejszenia gęstość prądu na powierzchni anody (rys. 2.15). W rezultacie ciepło rozprawdane na anodzie obejmuje większą powierzchnię o mniejszej głębokości. Materiał katody topi się z opóźnieniem w stosunku do anody, w wyniku absorpcji wolniej poruszających się jonów o większej masie. Dodatkowo zasięg strumienia plazmy na powierzchni katody jest mniejszy niż na powierzchni anody. Różnica w przenoszeniu energii cieplnej między elektrodami oraz dystrybucji ciepła na anodzie i katodzie skutkuje większą objętością usuniętego materiału z katody i to jest głównym czynnikiem determinującym wybór polaryzacji przedmiotu i elektrody roboczej podczas obróbki. Proces EDM w większości przypadków implementowany jest do obróbki typowych materiałów elektrod z polaryzacją prostą [34, 36, 45].



Rys. 2.15. Schemat modelu termofizycznego pojedynczego wyładowania elektrycznego w EDM [46]

Według Shena [47] biegunowość elektrod ma istotny wpływ na rozkład energii wyładowania elektrycznego oraz kształt formujących się kraterów. Kratery powstałe na powierzchni katody są otoczone strefą wpływu ciepła (rys. 2.16a). W przypadku anody strefa ta jest praktycznie niezauważalna (rys. 2.16b). Zjawisko to wskazuje, iż większa gęstość energii cieplnej została zaabsorbowana przez anodę niż katodę. Różnica w gęstości energii cieplnej dostarczonej do powierzchni elektrod według Xia [48] wynika z różnicy średnicy kanału plazmowego przy katodzie i anodzie. Na kształt i rozmiar krateru wpływ ma również odległość elektrody od przedmiotu obrabianego. Kojima [49] przy użyciu metod spektroskopowych zaobserwował, iż średnica kanału plazmowego zwiększa się wraz ze wzrostem szczeliny międzyelektrodowej. Tamura [50] wykazał, iż w przypadku polaryzacji prostej kratery powstałe na powierzchni anody charakteryzują się płaskim, symetrycznym kształtem, natomiast kratery uformowane na katodzie przy polaryzacji odwróconej posiadają większe głębokości z wyraźnymi wpływami.



Rys. 2.16. Fotografie kraterów otrzymane przy różnej polaryzacji narzędzia: a) katoda, b) anoda [47]

Objętość przetopionego materiału przez pojedyncze wyładowanie elektryczne zależy w głównej mierze od energii wyładowania pochłoniętego przez materiał oraz jego właściwości. Całkowitą energię wyładowania elektrycznego w szczelinie międzyelektrodowej w trakcie pojedynczego impulsu można opisać wzorem [51] :

$$E = \int_0^{t_{on}} U \cdot I \cdot dt \quad (2.2)$$

gdzie:

- U – napięcie wyładowania,
- I – natężenie prądu wyładowania,
- t_{on} – czas wyładowania.

Całkowita energia wytworzona przez wyładowanie elektryczne pochłaniana jest przez elektrody w różnym stopniu. Z tego względu rozkład energii w szczelinie międzyelektrodowej podzielono na trzy strefy [52]:

- obszar przykatodowy,
- obszar międzyelektrodowy (kanał plazmowy),
- obszar przyanodowy.

Według Zolotych [53, 54] całkowita energia wyładowania elektrycznego dostarczana jest do elektrod w wyniku następujących procesów:

- bombardowania powierzchni anody elektronami oraz powierzchni katody jonami,
- promieniowania kanału wyładowania łukowego,
- bombardowania gazokinetycznego powierzchni katody i anody cząsteczkami pochodzącymi z kanału plazmowego,
- oddziaływania strumienia par powstających w wyniku topnienia i parowania materiału elektrod.

W obszarze przykatodowym energia jest przekazywana w głównej mierze przez jony i można ją zapisać w postaci:

$$W_K^i = a \cdot W_i^k + W_i^n \quad (2.3)$$

gdzie:

- a – współczynnik akomodacji,

- W_i^k – energia kinetyczna jonu,
- W_i^n – energia neutralizacji jonu.

Energia dostarczana do powierzchni anody jest natomiast w głównej mierze przenoszona przez elektrony i można ją określić zależnością:

$$W_A^e = (U_A + \varphi) \cdot \int_0^{t_{on}} I(t) dt \quad (2.4)$$

gdzie:

- W_A^e – część energii wyładowania przekazana anodzie przez elektrony,
- U_A – anodowy spadek napięcia,
- φ – praca wyjścia elektronów,
- $I(t)$ – natężenie prądu wyładowania.

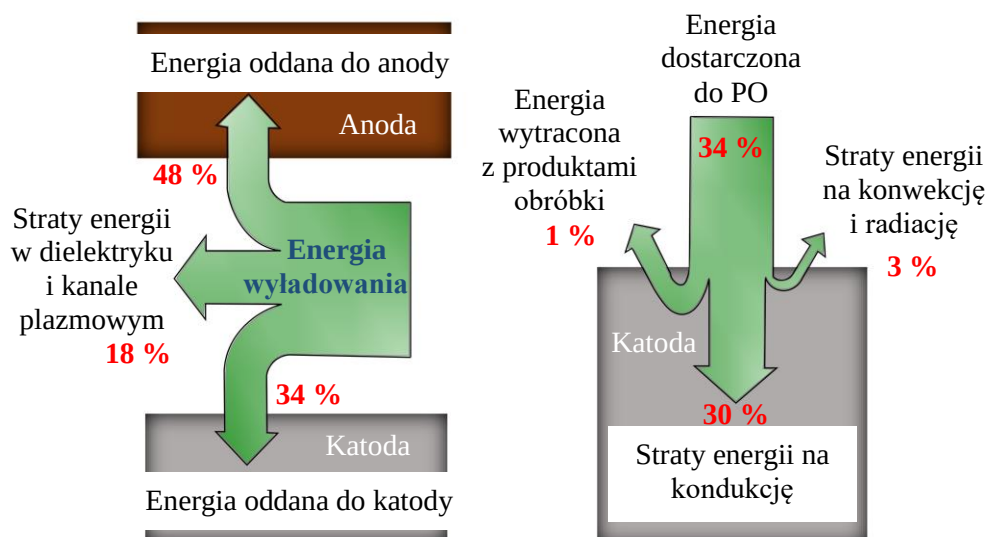
Pozostała część energii jest przekazywana do anody w wyniku promieniowania, która zgodnie z prawem Stefana – Boltzmana wynosi:

$$W_A^r = \delta \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^2 \cdot S_{pr} \cdot t_{on} \quad (2.5)$$

gdzie:

- W_A^r – część energii wyładowania przekazana anodzie przez promieniowanie,
- δ – współczynnik pochłaniania światła przez powierzchnię metalu,
- ε – współczynnik emisyjności metalu,
- σ – stała Stefana-Boltzmana,
- T – temperatura kanału plazmowego,
- S_{pr} – powierzchnia promieniowania,
- t_{on} – czas wyładowania elektrycznego.

Badania przeprowadzone przez Xia [48] dowodzą, iż niespełna 50 % energii wyładowania dostarczana jest do anody, a około 30 % przekazywana jest bezpośrednio do katody w wyniku kondukcji (rys. 2.17). Około 18 % energii jest w różny sposób tracona w dielektryku i kanale plazmowym w wyniku promieniowania i konwekcji. Van Dijck [55] stwierdził, iż 90 % energii cieplnej jest przekazywana do elektrod w wyniku kondukcji. Stosunek ilości energii przeznaczonej na erozję materiału do energii dostarczonej do elektrod zawiera się w przedziale od 1 do 10 %.

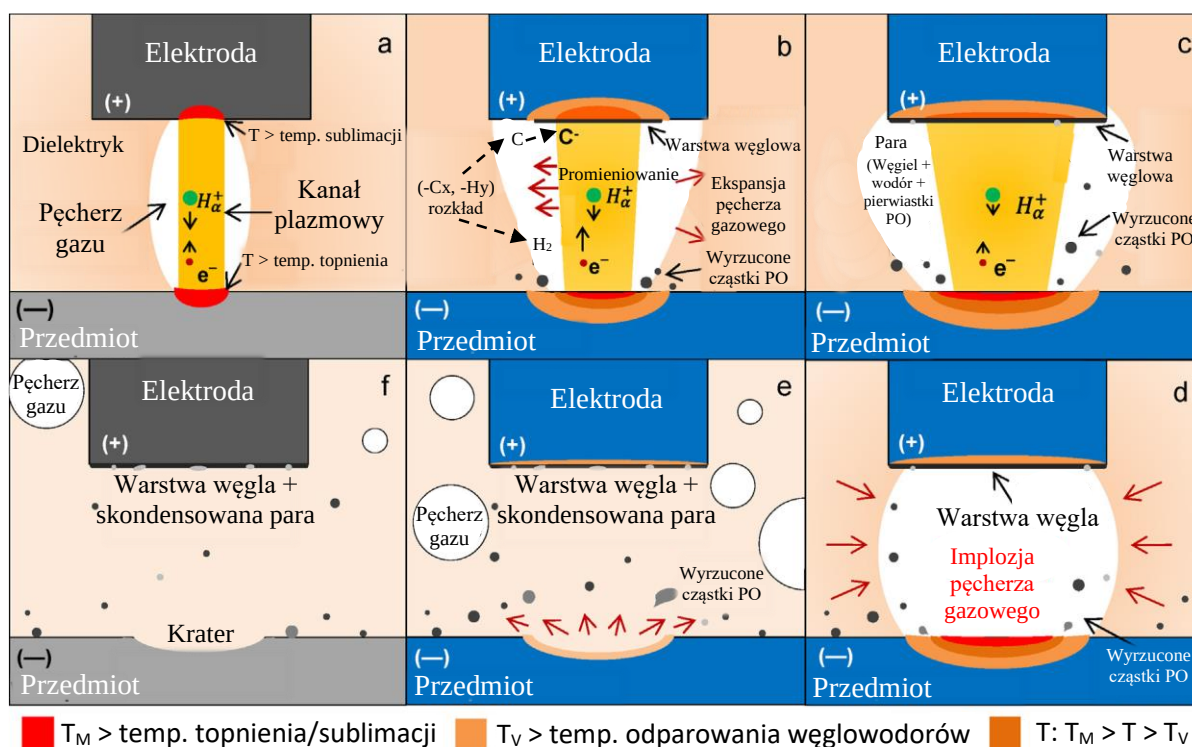


Rys. 2.17. Rozkład energii w procesie EDM [48]

Xia [48, 56] oraz Natsu [57] stwierdzili, iż ilość erodowanego materiału elektrod wykonanych z tych samych materiałów nie może być w pełni wyjaśniona rozkładem energii wyładowania na powierzchni katody i anody. Różnica w ilości usuwanego materiału jest spowodowana głównie zjawiskiem osadzania się węgla na powierzchni anody, gdy stosowane są dielektryki węglowodorowe, a zarówno katoda, jak i anoda są wykonane z miedzi. Motoki [58] wykazał, iż stopień zużycia elektrody roboczej zmniejsza się dzięki ochronnemu działaniu warstwy węglowej na powierzchni anody o wysokiej temperaturze sublimacji i odporności termicznej.

Ze względu na złożony charakter zjawisk fizycznych występujących w szczelinie w trakcie wyładowania elektrycznego, zespół naukowców [59] zbudował uproszczony model termiczny opisujący proces osadzania węgla na elektrodzie roboczej. Przyjęto, że zjawisko osadzania węgla w EDM jest rodzajem procesu fizyko-chemicznego osadzania z fazy gazowej, w którym ujemnie naładowane jony węgla i kondensacja pary węglowej są głównymi źródłami osadzania. Na rys. 2.18 przedstawiono etapy powstawania warstwy węglowej na ER w trakcie pojedynczego wyładowania. Początkowo, po przebicciu elektrycznym (a), strumień ciepła z kanału plazmowego generuje temperaturę powyżej punktu topnienia lub sublimacji, w lokalnych obszarach elektrody i przedmiotu obrabianego. Wraz z dalszym wydłużeniem czasu wyładowania elektrycznego (b) ciepło uwalniane przez kanał plazmowy odparowuje olej węglowodorowy, tworząc pęcherz gazowy, który składa się głównie z wodoru i pary węglowej. W wyniku jonizacji wodoru obszar plazmy rozszerza się. Kanał plazmowy składa się głównie z elektronów i dodatnio naładowanego wodoru H^+ , co zaobserwował Descoeudres [33]. Ze względu na przewodzenie ciepła do elektrody i przedmiotu obrabianego, a także

zmniejszenie strumienia ciepła w wyniku ekspansji kanału plazmowego, temperatura elektrody stopniowo maleje wraz z czasem wyładowania, a przy odpowiednio długim czasie impulsu elektrycznego temperatura spada poniżej punktu topnienia lub sublimacji materiału elektrody (c). Przy tak długim czasie wyładowania można uzyskać w przybliżeniu zerowe zużycie elektrody roboczej. Warstwa węglowa na elektrodzie powstaje w wyniku kondensacji pary węglowej przy założeniu, że temperatura na powierzchni ER, w obszarze wyładowania, jest wyższa od temperatury parowania dielektryka i niższa od temperatury topnienia lub sublimacji materiału elektrody.



Rys. 2.18. Uproszczony model osadzania się warstwy węgla na elektrodzie roboczej: a) przebicie elektryczne, b) rozrost kanału plazmowego i rozkład temperatury na ER i PO, c) osadzanie się warstwy węgla na powierzchni czołowej ER, d) zakończenie wyładowania elektrycznego i kurczenie się pęcherza gazowego, e) implozja pęcherza gazowego, f) dejonizacja kanału międzyelektrodowego [59]

W przypadku elektrody grafitowej, która posiada wysoki punkt sublimacji, kondensacja pary węglowej rozpoczyna się w trakcie przebicia elektrycznego. Po zakończeniu wyładowania elektrycznego następuje implozja pęcherza gazowego, która usuwa jezioro roztopionego materiału z przedmiotu obrabianego, rozpryskując jego metaliczne cząsteczki na powierzchni elektrody (d). Pozostała para węglowa kondensuje w wyniku chłodzenia przez olej dielektryczny (e). Jeśli kolejne wyładowania zostaną wygenerowane w krótkim odstępie czasu,

temperatura na elektrodzie i przedmiocie obrabianym może wzrosnąć szybciej, co doprowadzi do większej objętości osadzania się węgla. Stosowanie krótkiego czasu przerwy między impulsami może powodować zwiększone i nieregularne gromadzenie się węgla na elektrodzie. Również stężenie produktów obróbki w szczelinie wzrasta wraz z wydłużonym czasem erozji. Z powyższych względów w trakcie obróbki należy oczyszczać szczelinę m.in. poprzez przepływ ciekłego dielektryka pod wysokim ciśnieniem. Krótkie czasy przerwy mogą również powodować powstanie zjawisk wyładowań łukowych, które intensyfikują gromadzenie się węgla na ER [60]. Kontrolując czas wyładowania, czas przerwy i warunki oczyszczania szczeliny z produktów erozji, można osiągnąć stabilne i powtarzalne wytwarzanie warstwy węglowej.

Temperatura topnienia lub sublimacji oraz temperatura odparowania węglowodorów są najistotniejszymi parametrami w aspekcie osadzania się par węgla w wyniku kondensacji. Symulacje komputerowe rozkładu temperatury na elektrodach mogą pomóc w eksperymentalnym zdefiniowaniu dokładnych wartości czasu wyładowania oraz przerwy, przy których można uzyskać praktycznie zerowe zużycie elektrody roboczej [59].

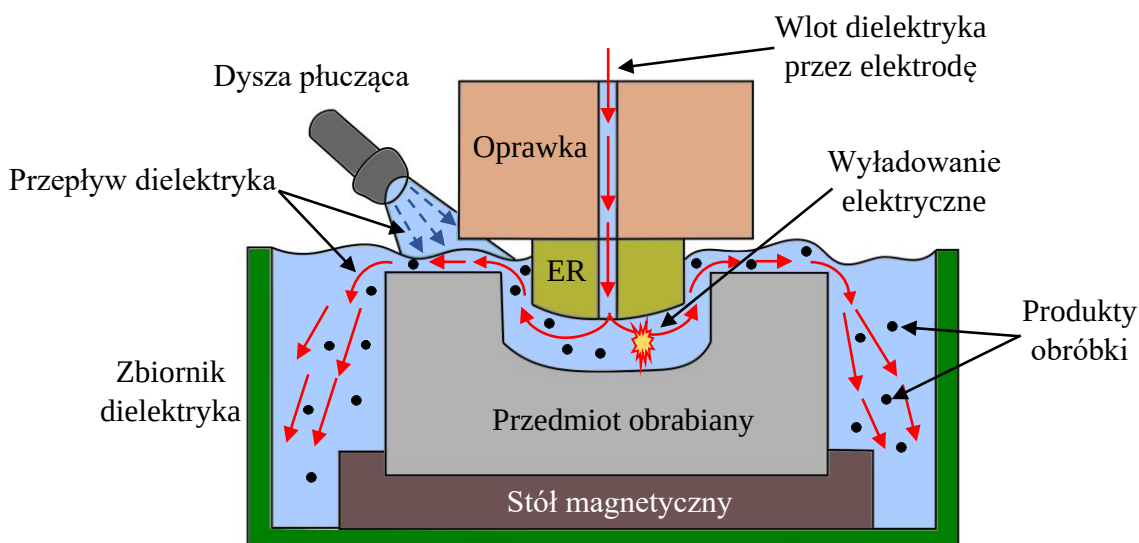
2.4. Rola dielektryka w mechanizmie erozji materiału

Dielektryk odgrywa bardzo istotną rolę w procesie obróbki elektroerozyjnej. Aby odizolować i zapewnić stałą szczelinę między elektrodą roboczą a przedmiotem obrabianym obróbka elektroerozyjna odbywa się w środowisku dielektryka, który może występować w postaci płynnej lub gazowej (rys. 2.19). W przypadku drażenia elektroerozyjnego jako dielektryk stosowany jest najczęściej olej węglowodorowy (nafta), a w wycinaniu elektroerozyjnym woda dejonizowana [38]. Do podstawowych funkcji dielektryków płynnych w procesie EDM należą [61, 62, 63, 64]:

- izolacja elektrody roboczej od przedmiotu obrabianego,
- chłodzenie roztopionego materiału i mikroskopijnych produktów obróbki,
- usuwanie produktów obróbki ze szczeliny międzyelektrodowej.

Główną cechą charakterystyczną płynu dielektrycznego jest jego zdolność do izolacji elektrycznej aż do momentu, w którym pomiędzy elektrodami nie zostanie osiągnięta wartość napięcia granicznego, inicjująca przebiecie elektryczne. Płyn dielektryczny stosowany w obróbce elektroerozyjnej może pozostać izolatorem elektrycznym z wyjątkiem najbliższych

punktów między elektrodą a przedmiotem obrabianym. W tych punktach napięcie wyładowania powoduje zmianę płynu dielektrycznego z izolatora na przewodnik i zainicjowanie przebiecia elektrycznego. Gdy kanał plazmowy zanika, płyn dielektryczny ulega dejonizacji i powraca do stanu izolacji elektrycznej. Opisana zmiana płynu dielektrycznego z izolatora na przewodnik, a następnie z powrotem do izolatora, zachodzi dla każdego cyklu wyładowania elektrycznego. Z tego względu dobry dielektryk powinien charakteryzować się wysoką wytrzymałością dielektryczną tj. największą wartością natężenia pola elektrycznego, przy którym nie nastąpi przebiecie elektryczne [65].



Rys. 2.19. Schemat obiegu dielektryka w szczelinie międzyelektrodowej w procesie EDM

Współczesne trendy w zakresie obróbki elektroerozyjnej skupiają się na badaniach dielektryków przyjaznych dla środowiska [66, 67]. Obecnie stosowane dielektryki w obróbce elektroerozyjnej można zasadniczo podzielić na trzy grupy [68, 69, 70, 71]:

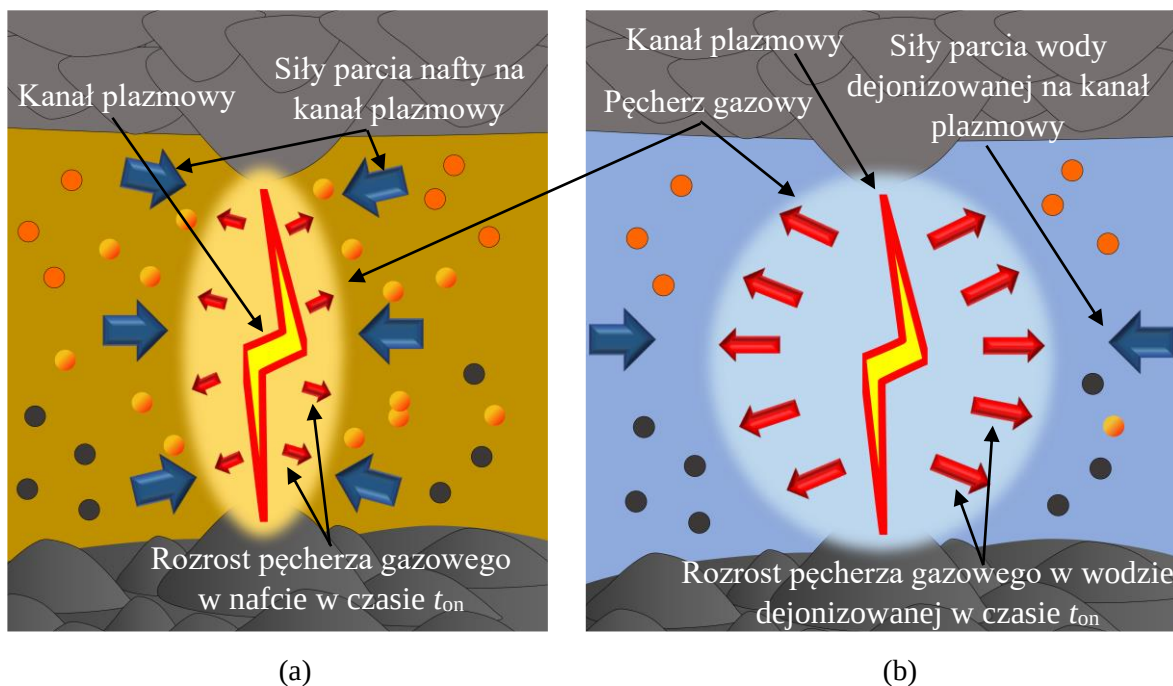
- dielektryki na bazie oleju węglowodorowego,
- dielektryki na bazie wody,
- dielektryki na bazie gazów.

Dielektryk na bazie oleju węglowodorowego jest powszechnie stosowany w procesie EDM. W porównaniu z dielektrykiem na bazie wody lub gazu, nafta nie jest przyjazna dla środowiska. Badania przeprowadzone przez Sivapirakasama [72] wykazały, że podczas stosowania dielektryków na bazie oleju powstają aerozole i niebezpieczne gazy. Stwierdzono, iż większą część aerozolu (około 69%) stanowią cząstki metali. Ostatnie badania przeprowadzone przez Sadagopana [73] ujawniły, iż biodiesel może z powodzeniem być

wykorzystywany jako dielektryk w obróbce EDM. W porównaniu z naftą, biodiesel wydziela mniej gazów oraz umożliwia uzyskanie większych wydajności oraz zmniejszenie zużycia narzędzia.

Dielektryk na bazie wody jest szeroko stosowany w przypadku obróbki WEDM oraz przebijania elektroerozyjnego mikrootworów. Żyra i Skoczypiec [63] wykazali, iż przy elektrodrażeniu stali austenitycznej X5CrNi 1810 w środowisku dielektryka wodnego uzyskana chropowatość powierzchni przedmiotu obrabianego oraz mikrotwardość jest mniejsza w porównaniu z obróbką z wykorzystaniem dielektryka węglowodorowego, przy tych samych ustalonych parametrach technologicznych. W specyficznych sytuacjach woda dejonizowana pozwala zapewnić korzystniejsze warunki obróbki niż nafta w procesie EDM [70]. Erden i Temel [74] zaobserwowali, iż obróbka elektroerozyjna stalowego przedmiotu elektrodą mosiężną, przy ujemnej polaryzacji, w wodzie dejonizowanej i przy czasie wyładowania od 400 do 1500 μ s skutkowała wyższą wydajnością i mniejszym zużyciem elektrody w porównaniu do oleju węglowodorowego. Dla czasu impulsu 800 μ s szybkość usuwania materiału była około 60% wyższa, a zużycie elektrody o 25% mniejsze. Badacze [75] wykazali, iż woda destylowana zapewniła wyższą wydajność usuwania materiału przy obróbce Ti-6Al-4V elektrodą miedzianą. W przypadku oleju węglowodorowego, rozłożony węgiel przylegał adhezyjnie do elektrody, a na powierzchni przedmiotu obrabianego powstawał węgiel tytanu (TiC). Przy obróbce w wodzie destylowanej nie zaobserwowano atomów węgla na elektrodzie, a na powierzchni przedmiotu obrabianego utworzył się tlenek tytanu (TiO₂). Tlenek tytanu posiada niższą temperaturę topnienia niż węgiel, co ułatwia elektrodrażenie stopu Ti-6Al-4V i zwiększa wydajność usuwania materiału.

Chociaż zastosowanie wody dejonizowanej jako dielektryka powoduje w niektórych sytuacjach lepszą wydajność, oleje węglowodorowe okazują się lepsze w szerszym zakresie warunków obróbki [70]. Jest to spowodowane niższą lepkością wody oraz większym przewodnictwem elektrycznym w porównaniu z naftą. W trakcie przebicia elektrycznego w wodzie napięcie wyładowania jest niższe niż w oleju, a średnica kanału plazmowego większa (rys. 2.20), co zmniejszają gęstość energii, a w konsekwencji wydłuża czas obróbki [76, 77]. Kratery powstające na powierzchni przedmiotu po obróbce w wodzie są szerokie i płytkie. Ponadto duża ilość energii cieplnej potrzebnej do podgrzania i odparowania wody, w porównaniu z olejem węglowodorowym, powoduje niższe ciśnienie gazu powstającego w szczelinie. W związku z powyższym, w przypadku wody dejonizowanej, stopiony metal nie jest prawidłowo usuwany przy kolejnym cyklu wyładowania elektrycznego z powodu niskiego podciśnienia powstałego na skutek oddziaływania kanału plazmowego [78].



Rys. 2.20. Schemat rozrostu pęcherza gazowego w: a) naftcie, b) wodzie dejonizowanej

Próbując zwiększyć lepkość wody dejonizowanej niektórzy autorzy [76, 78] przeprowadzili badania doświadczalne polegające na dodawaniu do wody związków organicznych o dużych strukturach molekularnych, takich jak glikol etylenowy, gliceryna, glikol polietylenowy, dekstroza i sacharoza.

König i Jörres [76] stwierdzili, iż najlepsze wyniki pod względem wydajności usuwania materiału uzyskano dzięki zastosowaniu roztworu gliceryny o stężeniu 87%. Przy obróbce zgrubnej stali narzędziowej 56 NiCrMoV 7 osiągnięto wyższą wydajność usuwania materiału (40%) i mniejsze względne zużycie elektrody roboczej (90%) w porównaniu z olejem węglowodorowym. Autorzy tłumaczą, iż związki organiczne w postaci gliceryny w wodzie dejonizowanej ulegają łatwiejszemu rozkładowi w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury kanału plazmowego, wytwarzając w ten sposób gazy o wyższym ciśnieniu niż w przypadku czystej wody.

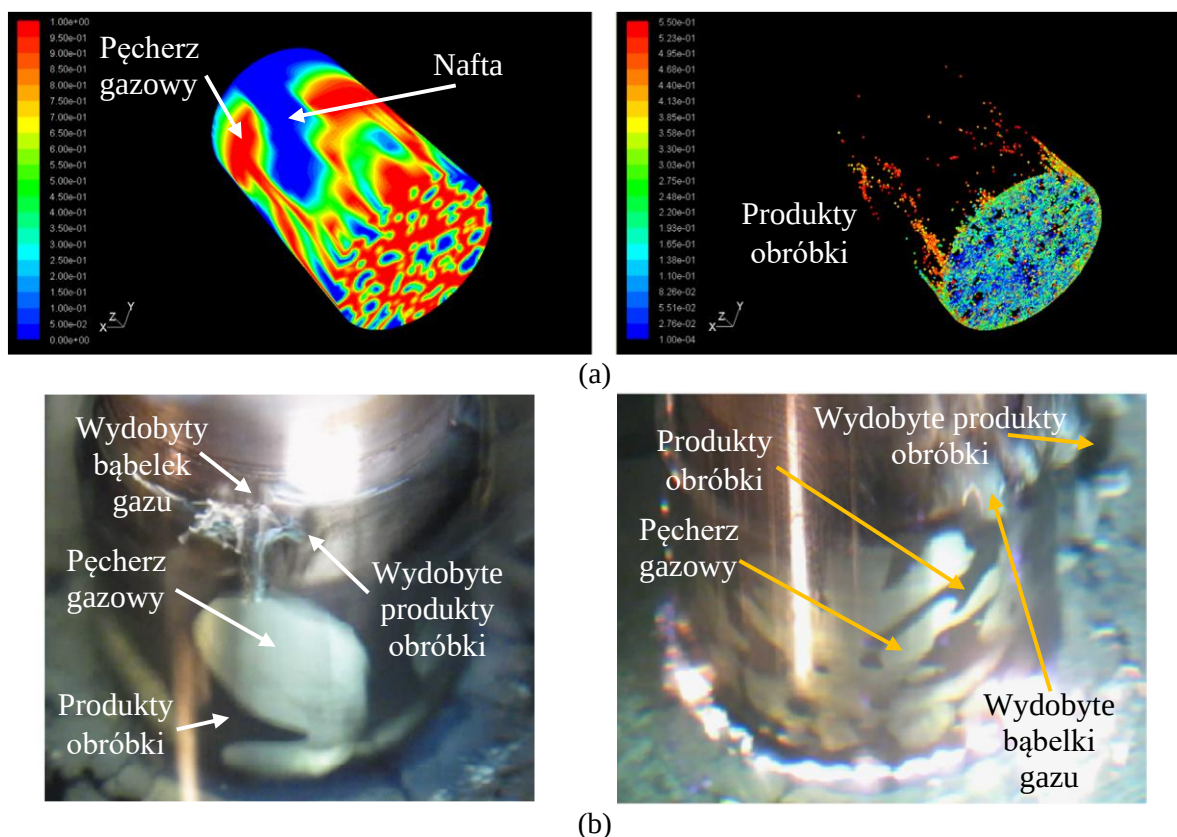
Dielektryki na bazie gazów, w porównaniu z ciekłymi dielektrykami, są bardziej przyjazne dla środowiska i ekonomicznie opłacalne. Przez dość długi czas uważano, że tylko dielektryk w postaci płynnej może być wykorzystywany w procesie EDM, ponieważ kompresuje on pęcherzyki gazu powstałe w wyniku wyładowania elektrycznego, wypłukuje produkty obróbki ze szczeliny i schładza roztopiony materiał [66, 79]. Kunieda [5] oraz Hinduja [80] wykazali, iż ważność przyjętych teorii roli płynnych dielektryków w procesie EDM była podważana przez liczne badania. Haykawa [81] stwierdził, iż usuwanie materiału

ma również miejsce w trakcie wyładowania, a nie tylko po implozyjnym pęknięciu pęcherza gazowego w dielektryku płynnym. Yoshida i Kunieda [82] zaobserwowali, iż istnieją różnice w objętości generowanych mikroskopijnych produktów obróbki oraz w ich rozkładzie na powierzchni obrabianej w cieczy i w powietrzu. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że przy obróbce w powietrzu większość stopionych mikroskopijnych resztek z przedmiotu obrabianego ponownie osadza się na powierzchni elektrody, ponieważ nie można ich zestalić schłodzonym powietrzem. W ciekłym dielektryku stopione cząstki materiału elektrod mogą zestalić się w kuliste kształty i zostać usunięte wraz z przepływającym przez szczelinę dielektrykiem. Yoshida [83] stwierdził, iż ponad 70% stopionego materiału można usunąć z krateru za pomocą wysoko sprężonego przepływu powietrza przez szczelinę. Obecnie liczne badania procesu EDM potwierdziły, iż obróbka może być przeprowadzana w dielektrykach gazowych. Wyładowania elektryczne, które zachodzą w środowiskach gazowych umożliwiają usunięcie materiału lecz nie powodują kompresji pęcherza gazowego, który wytwarza się w szczelinie w trakcie wyładowania elektrycznego [66].

Yang [84] badał mechanizm usuwania materiału wykorzystując symulację dynamiki molekularnej. Stwierdzono, iż fizykę usuwania materiału w mikroobróbce EDM można wyjaśnić na dwa sposoby: przez odparowanie lub eksplozję pęcherza gazowego. Tamura i Kobayashi [50] zmierzili siły impulsowe oddziaływujące na roztopiony materiał, wywołane rozszerzaniem i kurczeniem się pęcherza gazowego, w trakcie pojedynczego wyładowania elektrycznego w nafcie i w gazie. Badacze doszli do wniosku, iż wpływ sił impulsowych na tworzenie krateru jest nieznaczący. Zhang [85] przeprowadził symulację procesu ekspansji pęcherzyka gazowego i stwierdził, iż na kształt krateru i wydajność usuwania materiału znacząco wpłynęła odległość między elektrodami, która może determinować wielkość sił impulsowych.

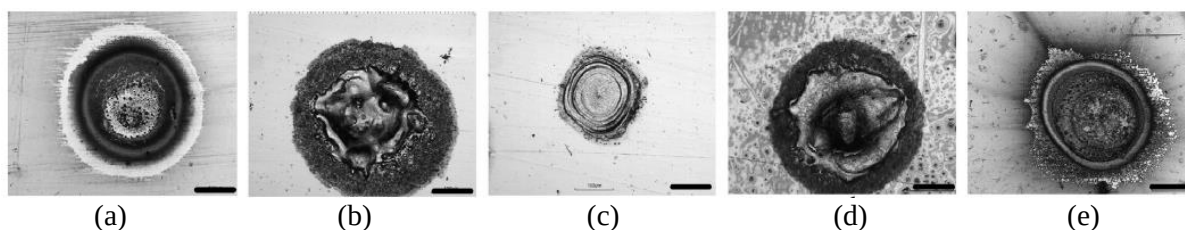
Wang i Han [86] zbudowali model symulacyjny ilustrujący przemieszanie się produktów obróbki oraz pęcherzyków gazu w szczelinie międzyelektrodowej, w trakcie pojedynczego wyładowania (rys. 2.21a). Badacze założyli, iż obróbka odbywa się w dielektryku płynnym – nafcie. W badaniach przyjęto uproszczony model geometrii szczeliny wypełnionej naftą w kształcie walca. Wyniki symulacji ukazały, iż w trakcie wyładowania produkty obróbki wraz z pęcherzykami gazowymi przemieszczały się w kierunku bocznych ścianek, a dno szczeliny było w większości zajęte przez pęcherzyki gazu. Zaobserwowano również zjawisko łączenia się pojedynczych pęcherzyków gazowych w jeden duży pęcherz gazowy. Produkty obróbki przemieszczały się głównie między pęcherzykami gazowymi. Z wyników symulacji oraz rzeczywistych obserwacji (rys. 2.21b) wynika, iż rola tworzonych

pęcherzy gazowych w trakcie wyładowania w dielektrykach płynnych ma kluczowe znaczenie w usuwaniu produktów obróbki poza szczelinę międzyelektrodową.



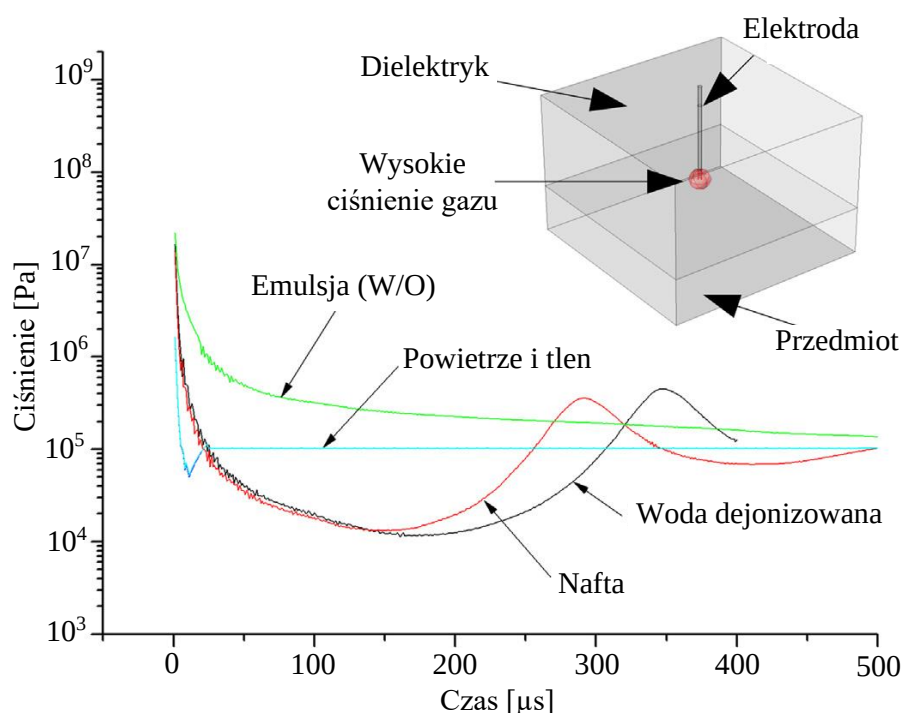
Rys. 2.21. Symulacja przemieszczania się pęcherzyków gazu oraz produktów obróbki w szczelinie międzyelektrodowej: a) symulacja, b) rzeczywiste obserwacje [86]

Zhang i współautorzy [66] zbadali geometrię krateru powstałego na powierzchni stali w wyniku pojedynczego wyładowania elektrycznego w różnych dielektrykach. Jako dielektryk wykorzystano: tlen (99.9% O_2), powietrze (78% N_2 , 21% O_2 , 1% inne gazy), wodę dejonizowaną (100% H_2O), naftę (100% węglowodorów) oraz emulsję wody z węglowodorami W/O (30,8% H_2O , 68,7% węglowodory). Stwierdzono, iż istnieje różnica w kształcie kraterów uformowanych w różnych dielektrykach przy ustalonych parametrach obróbki (rys. 2.22).



Rys. 2.22. Porównanie kształtu krateru po wyładowaniu elektrycznym w: a) powietrzu, b) naftcie, c) wodzie dejonizowanej, d) emulsji W/O, e) tlenie [66]

Po obróbce w nafcie zaobserwowano mniejsze wymiary krateru w porównaniu do innych dielektryków. Skuteczność usuwania materiału była wyższa w ciekłych dielektrykach niż w dielektrykach gazowych. Wyniki symulacji komputerowej wykazały, iż w dielektrykach gazowych ciśnienie po wyładowaniu elektrycznym podlega znacznie szybszemu obniżeniu niż w przypadku dielektryków płynnych (rys. 2.23). Krzywe ciśnienia tlenu i powietrza praktycznie pokrywają się ze sobą z powodu ich podobnych właściwości fizycznych. Naukowcy [66] zaobserwowali, iż w nafcie i wodzie ciśnienie po wyładowaniu elektrycznym spadło do wartości mniejszej niż 0,1 MPa. Wskazuje to, iż ekspansja pęcherza gazowego tworzy w niej podciśnienie. Druga szczytowa wartość ciśnienia występowała w dielektryku na bazie nafty i wody dejonizowanej ze względu na kurczenie się pęcherza gazowego. Różnicę czasową ponownego wzrostu ciśnienia w obu przypadkach autorzy tłumaczą innymi właściwościami fizycznymi (gęstość i lepkość) dwóch dielektryków. W emulsji W/O wysokie ciśnienie po zakończeniu wyładowania elektrycznego może wytrzymać znacznie dłużej niż w nafcie i wodzie dejonizowanej ze względu na stosunkowo wysoką lepkość emulsji W/O, która nie dopuszcza do kurczenia się pęcherza i wzrostu ciśnienia. Naukowcy łącząc wyniki eksperymentów i symulacji stwierdzili, iż wyższa wydajność usuwania materiału w płynnych dielektrykach, szczególnie w emulsji W/O, była spowodowana wyższym ciśnieniem w szczelinie po wyładowaniu elektrycznym.



Rys. 2.23. Przebieg zmian ciśnienia w szczelinie międzyelektrodowej po zakończeniu wyładowania elektrycznego w różnych dielektrykach [66]

2.5. Wpływ właściwości materiału elektrod na proces EDM

Koszty wykonanego elementu metodą drążenia elektroerozyjnego są w głównej mierze determinowane przez koszt elektrody roboczej, który składa się z kosztu surowca i wykonania narzędzia. W skrajnych przypadkach udział kosztu elektrody w całkowitym koszcie operacji drążenia może przekroczyć 70%, a czas przeznaczony na produkcję elektrody może stanowić ponad 50% czasu pracy elektrodrażarki. W przypadku złożonych trójwymiarowych kształtów elektrody można wytwarzać przez obróbkę skrawaniem, odlewanie, elektroformowanie lub natryskiwanie metalu. Współcześnie prowadzonych jest szereg badań nad zaimplementowaniem technologii szybkiego prototypowania do wytwarzania elektrod bezpośrednio z trójwymiarowego modelu CAD [87]. Technologia Rapid Prototyping może znacząco skrócić czas wytworzenia skompilowanych geometrycznie elektrod i obniżyć koszty produkcji [14, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94].

Wybierając materiał elektrody należy uwzględnić jego właściwości mechaniczne oraz fizyko-chemiczne, które mają bezpośredni wpływ na proces elektrodrążenia. Kern [95] stwierdził, iż elektroda robocza jest odpowiedzialna za przenoszenie ładunków elektrycznych i erodowanie materiału z przedmiotu obrabianego w celu osiągnięcia pożądanego kształtu. Kunieda [5] zauważył, iż każdy materiał wykazujący dobrą przewodność elektryczną może być stosowany jako materiał na elektrodę roboczą. Niektóre materiały skutecznie erodują przedmiot obrabiany, ale charakteryzują się wysokim współczynnikiem zużycia. Inne materiały elektrod zużywają się w niewielkim stopniu, ale nie zapewniają wysokiej wydajności procesu.

Główne właściwości materiału elektrod, które wpływają na proces oraz ekonomiczność elektrodrążenia są następujące [14, 32, 88, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106]:

- przewodność elektryczna – w trakcie obróbki przepływ prądu elektrycznego przez ER, a następnie przez kanał plazmowy, jest odpowiedzialny za topnienie i erozję materiału. Generalnie, wyższa przewodność elektryczna zapewnia mniejsze zużycie elektrody roboczej i zwiększa wydajność usuwania materiału,
- przewodność cieplna – wyższa przewodność cieplna elektrody generuje niższą temperaturę na powierzchni narzędzia w trakcie wyładowań elektrycznych. Dlatego materiały o wyższej przewodności cieplnej są preferowane na elektrody robocze, ponieważ lepiej odprowadzają ciepło i zapewniają mniejszy stopień zużycia [107],
- temperatura topnienia – ze względu na wysoką temperaturę panującą na powierzchni elektrody w trakcie przebiegu elektrycznego, materiał powinien charakteryzować się

wysoką temperaturą topnienia/sublimacji, która zmniejszy zużycie i zapewni dokładne odwzorowanie kształtu [5],

- gęstość – wyższa gęstość materiału oznacza, iż atomy są ciasno upakowane i do ich usunięcia z powierzchni elektrody wymagana jest większa energia wyładowania elektrycznego. Materiały o wyższej gęstości charakteryzują się mniejszym stopniem zużycia w trakcie obróbki EDM,
- rozszerzalność cieplna – wysoka rozszerzalność cieplna wpływa niekorzystnie na zużycie elektrody i dokładność elektrodrążenia precyzyjnych elementów, a także może pogarszać warunki wypłukiwania produktów obróbki ze szczeliny międzyelektrodowej,
- odporność elektroerozyjna – właściwość, która definiuje jak materiał reaguje na wyładowania elektryczne na swojej powierzchni. W trakcie wyładowania, choć nie występują siły mechaniczne, generowane iskry działają gwałtownie, indukując naprężenia w skali mikroskopowej, a także tworząc kraterę na powierzchni ER [95]. Odporność elektroerozyjna elektrody jest istotnym czynnikiem determinującym zużycie narzędzia, a także jakość wykończenia powierzchni po obróbce,
- właściwości mechaniczne – w szczególności wytrzymałość na rozciąganie oraz twardość, które będą wpływać na stopień trudności w wytworzeniu elektrody o pożądanym kształcie. Ponadto, ze względu na wysokie ciśnienie panujące w szczelinie w trakcie obróbki, materiał elektrody musi posiadać akceptowalną wytrzymałość mechaniczną, aby zmniejszyć zużycie narzędzia i zwiększyć wytrzymałość ostrych krawędzi i elementów cienkościennych elektrody,
- produktywność – stopień trudności w obróbce materiału do osiągnięcia zamierzonego kształtu. Zalecane są materiały łatwo obrabialne, które skracają czas wytworzenia narzędzia,
- koszt – obejmujący koszt surowca oraz jego obróbki.

Ogólnie materiały o dobrej przewodności elektrycznej i cieplnej oraz wysokiej temperaturze topnienia są powszechnie stosowane jako elektrody w procesie EDM (tabela 2.1). Najczęściej stosowanymi materiałami na elektrody robocze są: miedź oraz grafit, a także mosiądz, grafit impregnowany miedzią, wolfram, miedziowolfram, węgiel wolframu, aluminium i srebro [14, 97].

Tabela 2.1. Właściwości fizyczne materiałów na elektrody robocze [14]

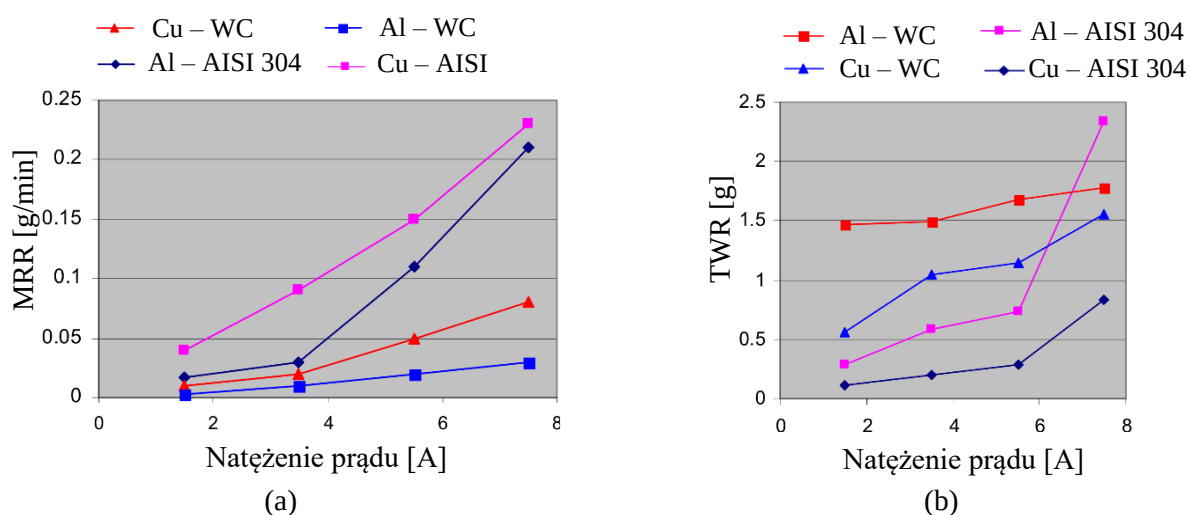
Materiał	Gęstość	Rezystancja	Przewodność cieplna	Temperatura topnienia	Współczynnik rozszerzalności liniowej	Ciepło właściwe
	g/cm ³	μΩcm	W/mK	°C	×10 ⁻⁶ /K	J/kgK
Miedź	8,9	1,7	385	1083	16,4	385
Grafit	1,6-1,9	6000	25	3650	0,6-4,3	707
Miedź-grafit	6,8	4,36	200-300	-	7,4	-
Mosiądz	7,2-8,86	3,18-28	26-233	809-1030	18-26	375-380
Wolfram	19,3	5,65	163	3370	4,4	134
Miedź-wolfram	14,84	3,83	220	1085-3410	10,77	214
Węglik wolframu	15,7	53-80	84	2870	5,2-7,3	171-203
Aluminium	2,69	2,7	210	660	24	900
Srebro	10,49	1,55	419	962	19,9	234
Wolfram-srebro (30% Ag 70%W)	15,28	3,45	160	> 980	-	-

Miedź oraz grafit są najczęściej wykorzystywanymi materiałami na elektrody robocze. Szczegółową analizę wpływu właściwości fizycznych elektrod grafitowych na wskaźniki technologiczne oraz stan WW po obróbce EDM zawarto w podrozdziale 2.6.

Miedź posiada wysoką przewodność elektryczną oraz cieplną. Wadami elektrod miedzianych jest ich wysoka rozszerzalność cieplna (objętościowa), która może pogarszać warunki wypłukiwania produktów obróbki ze szczeliny międzyelektrodowej, a także wpływać na dokładność uzyskanego kształtu. Miedź ma również niską temperaturę topnienia, co w określonych warunkach obróbki zwiększa stopień zużycia narzędzia. Inną wadą miedzi jest jej ciągliwość, która utrudnia obróbkę mechaniczną i usuwanie zadziorów. Dodatek telluru do miedzi poprawia jej skrawalność, ale zwiększa zużycie ER oraz obniża wydajność usuwania materiału w porównaniu z czystą miedzią [95]. Miedź znajduje szerokie zastosowanie w obróbce elektroerozyjnej metali, ceramiki i kompozytów [14, 88, 108].

Torres [109] dokonał analizy wpływu parametrów obróbki elektroerozyjnej Inconelu 600 z wykorzystaniem elektrody miedzianej na MRR, TWR oraz stan warstwy wierzchniej. Stwierdzono, iż w przypadku wskaźnika MRR najbardziej wpływowym czynnikiem jest natężenie prądu przy obu biegunowościach. Przy dodatniej polaryzacji szybkość usuwania materiału jest znacznie wyższa niż przy polaryzacji ujemnej. Ponadto

wyższe wartości natężenia prądu prowadzą do obniżenia stopnia zużycia elektrody roboczej. Podobne zależności zaobserwował także Haron [110]. Zużycie elektrody jest znacznie bardziej intensywne w przypadku polaryzacji ujemnej. W odniesieniu do chropowatości powierzchni, przy obu biegunowościach, natężenie prądu i czas wyładowania były najbardziej wpływowymi czynnikami. Wartości parametru chropowatości Ra uzyskane przy polaryzacji ujemnej są niższe w porównaniu z polaryzacją dodatnią. Wang [111] stwierdził, iż wzrost natężenia prądu zwiększa wydajności, zużycie narzędzia i chropowatość powierzchni przy obróbce żeliwa sferoidalnego ADI elektrodami miedzianymi. Ozgedik i Cogun [112] sformułowali identyczne wnioski podczas elektrodrążenia stali 1040. Badacze wykazali również, iż wydłużenie czasu wyładowania generuje chropowatość powierzchni, zwiększa zużycie i sprzyja wydajniejszemu usuwaniu materiału. Khan i Saifuddin [107] przeprowadzili analizę porównawczą elektrod miedzianych i aluminiowych przy obróbce stali nierdzewnej (AISI 304) i węgla wolframu. Autorzy wykazali, iż w przypadku obu elektrod szybkość usuwania materiału wzrasta wraz ze wzrostem natężenia prądu i napięcia wyładowania (rys. 2.24a). Wydajność usuwania stali nierdzewnej była większa niż węgla. Elektroda miedziana wykazała większą wydajność procesu oraz mniejsze zużycie elektrody roboczej podczas obróbki obu materiałów niż elektroda aluminiowa (rys. 2.24b).



Rys. 2.24. Wpływ natężenia prądu oraz elektrod miedzianych i aluminiowych przy drążeniu węgla wolframu i stali nierdzewnej na: a) wydajność obróbki, b) zużycie elektrody roboczej [107]

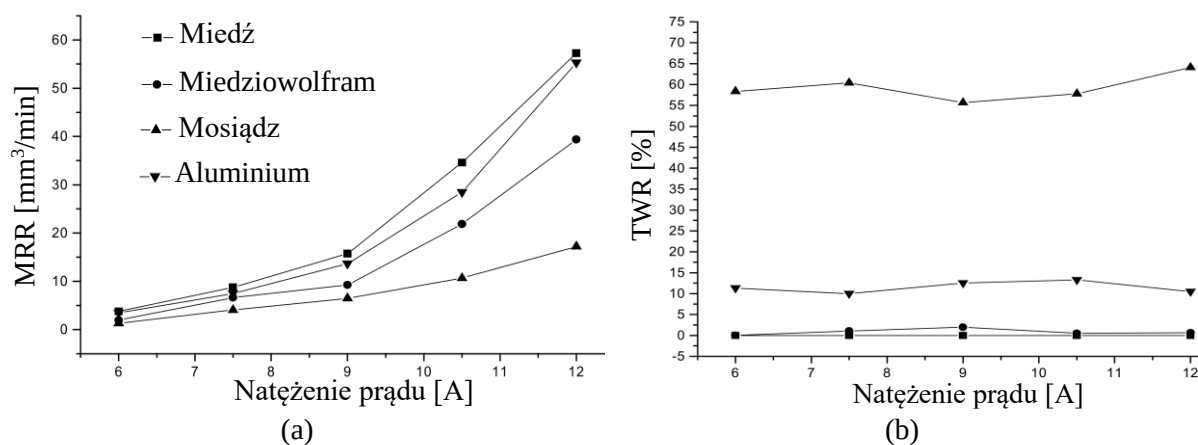
Khan [113] wykazał, iż wraz ze wzrostem natężenia prądu i napięcia wyładowania wzrasta zużycie ER. Stwierdzono również, iż elektrody miedziane zużywają się w mniejszym stopniu niż elektrody mosiężne, zarówno przy obróbce stali miękkiej, jak i stopów aluminium. Her i Weng [114] przeprowadzili badania obróbki mikrootworów w płytce miedzianej przy

użyciu węgla wolframu oraz miedzi jako materiału na elektrodę roboczą. Zauważono, iż w przypadku obu materiałów zużycie elektrod jest większe, gdy wybrana jest biegunowość ujemna. Elektrody miedziane uzyskały mniejszą wydajność i zużycie narzędzia niż elektrody z węgla wolframu, a przy dodatniej biegunowości pozostawiły najniższą chropowatość powierzchni na przedmiocie obrabianym. Singh [115] wykazał, iż elektroda miedziana osiągnęła najlepsze wyniki pod względem MRR i TWR niż elektrody mosiężne, aluminiowe i miedziowolframowe w przypadku obróbki stali narzędziowej EN-31.

Elektrodę z miedziowolframu (Cu-W) zaprojektowano w celu połączenia najlepszych właściwości miedzi (wysokie przewodnictwo elektryczne i ciepłe) i wolframu (wysoka temperatura topnienia). Elektroda z materiału Cu-W jest wytwarzana technikami metalurgii proszków poprzez prasowanie obu materiałów w formie, a następnie ich spiekanie. Zawartość procentowa obu pierwiastków zawiera się na ogół w przedziale: 25–30% Cu i 75–70% W. Obecność wolframu zmniejsza przewodność elektryczną i cieplną materiału, co w konsekwencji powoduje obniżenie wydajności elektrodrążenia. Z drugiej strony wolfram w istotny sposób zwiększa temperaturę topnienia elektrody, co prowadzi do zmniejszenia zużycia narzędzia. Elektrody Cu-W są droższe niż elektrody miedziane, dlatego ich zastosowanie ogranicza się do bardzo specyficznych obróbek, np. elektrodrążenia węgla wolframu z kobaltem (WC-Co), który jest trudny w obróbce z wykorzystaniem elektrod miedzianych [14].

Amorim i Weingaertner [116] wykazali, iż elektrody miedziowolframowe osiągnęły wyższą wydajność usuwania materiału niż elektrody miedziane przy obróbce stopów miedzi z berylem. Singh [115] porównał miedziowolfram z elektrodami miedzianymi, mosiężnymi i aluminiowymi podczas obróbki stali narzędziowej EN-31 (rys. 2.25). Wyniki badań ujawniły, iż elektrody miedziowolframowe uzyskały niskie zużycie ER i niską chropowatość powierzchni przedmiotu przy wysokim natężeniu prądu. Podobnych wniosków byli Salman i Kayacan [117], którzy również zaobserwowali, iż elektrody miedziowolframowe, w porównaniu z elektrodami grafitowymi, wykazały niższą chropowatość powierzchni z parametrami dla obróbki zgrubnej. Mathew [118] stwierdził, iż elektroda Cu-W uzyskała mniejszą wydajność usuwania materiału niż elektroda miedziana podczas obróbki stali narzędziowej AISI H13. Marafona [119] wykorzystał elektrody miedziowolframowe przy obróbce stali narzędziowej D2 w celu optymalizacji parametrów wejściowych procesu EDM i poprawy wskaźników MRR, TWR i chropowatości powierzchni. Wyniki statystyczne wykazały, iż nie ma jednego zestawu parametrów obróbki, który optymalizowałby wszystkie

trzy parametry wyjściowe. Autorzy stwierdzili również, iż elektrody miedziowolframowe są dedykowane w sytuacjach, gdy wymagana się wysoka precyzja obróbki.



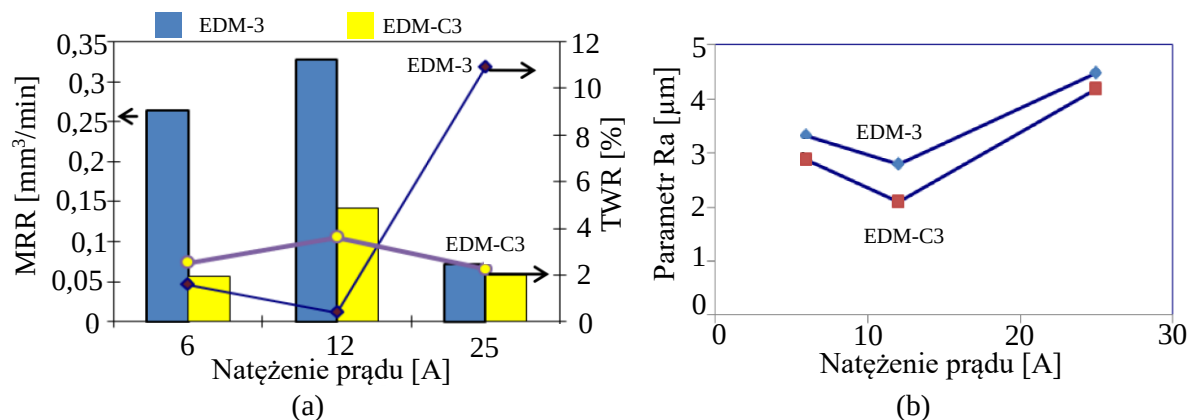
Rys. 2.25. Wpływ natężenia prądu oraz materiału elektrod przy drążeniu stali narzędziowej EN-31 na: a) wydajność usuwania materiału, b) zużycie elektrody roboczej [115]

Mosiądz był jednym z pierwszych materiałów stosowanych na elektrody robocze w procesie EDM ze względu na niski koszt i łatwą obróbkę mechaniczną. W nowoczesnych elektrodrażarkach elektrody mosiężne są rzadko stosowane ze względu na wyższy stopień zużycia w porównaniu z elektrodami miedzianymi lub grafitowymi [115, 120, 121]. Są sporadycznie wykorzystywane na obrabiarkach z zasilaczami RC, w których zużycie narzędzia nie jest najistotniejszym czynnikiem. Przewodność elektryczna i cieplna mosiądzu nie jest tak dobra jak materiałów miedzianych, w związku czym wydajność usuwania materiału jest na ogół mniejsza [14].

Elektroda grafitowa impregnowana miedzią wytwarzana jest z grafitu o kontrolowanej porowatości, który jest następnie infiltrowany przez miedź w wyniku działania kapilarnego w piecu. Otrzymany materiał charakteryzuje się zwiększoną przewodnością cieplną i wytrzymałością mechaniczną [14].

Sundaram [122] przedstawił wyniki badań eksperymentalnych mikro-drażenia hartowanej stali narzędziowej XW42 elektrodą wolframową oraz grafitową impregnowaną miedzią. Wydajność usuwania materiału przez grafit infiltrowany miedzią była około 77% wyższa niż wolframu. Elektroda wolframowa zużywała się w mniejszym stopniu, lecz pozostawiała większą chropowatość na powierzchni obrabianej niż grafit impregnowany miedzią. Autorzy tłumaczą, iż rezystancja elektrody ma kluczowe znaczenie w generowaniu chropowatości powierzchni. Grafit impregnowany miedzią ma znacznie wyższą rezystancję niż wolfram, dlatego generował mniejsze kraterki na powierzchni obrabianej.

Mutammara [123] wykazał, że elektroda POCO EDM-C3 uzyskuje niższą chropowatość powierzchni niż czysty grafit (POCO EDM-3) przy elektrodrażeniu Ti6Al4V (rys. 2.26a). Wydajność usuwania materiału była większa w przypadku elektrody grafitowej, a wyższe zużycie narzędzia zaobserwowano dla grafitu EDM-C3 (rys. 2.26b). Z kolei podczas obróbki SiSiC i B₄C, elektroda grafitowa impregnowana miedzią wykazała mniejsze zużycie niż elektroda grafitowa [124].



Rys. 2.26. Wpływ natężenia prądu oraz materiału elektrod przy drażeniu Ti6Al4V na: a) wydajność usuwania materiału oraz zużycie elektrody roboczej, b) chropowatość powierzchni Ra [123]

Elektroda wolframowa (W) charakteryzuje się wysoką gęstością, wytrzymałością na rozciąganie oraz temperaturą topnienia, co korzystnie wpływa na niższe wartości zużycia ER. Z drugiej strony posiada niską przewodność elektryczną, co prowadzi do obniżenia wydajności erodowania materiału. Jest również trudny w obróbce mechanicznej i wiąże się z wysokimi kosztami zakupu półfabrykatu [14].

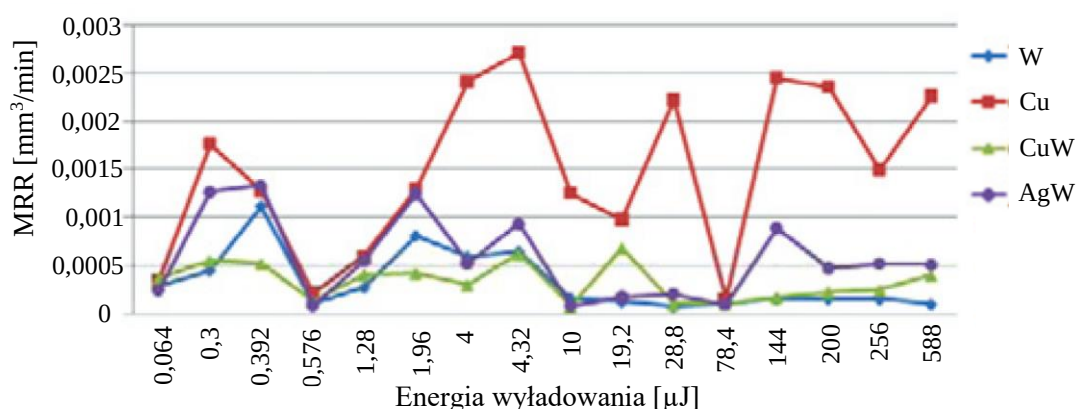
Singh [115] wykazał, iż zużycie elektrody wolframowej przy obróbce stali narzędziowej XW42 jest znacznie niższe niż w przypadku elektrod miedzianych i grafitowych. Jahan [125] również stwierdził, iż w przypadku obróbki węgla wolframu MG18 elektroda wolframowa charakteryzowała się mniejszym zużyciem w porównaniu z miedziowolframem (Cu-W) lub ze spiekami wolframu i srebra (Ag-W). Autorzy zaobserwowali również na powierzchni ukształtowanej przez elektrodę wolframową znacznie większe stężenie węgla. Fu [126] wykazał także, iż elektroda wolframowa przy elektrodrażeniu stali nierdzewnej AISI 304 zapewniła niższe zużycie narzędzia niż elektroda z węgla wolframu.

Srebro charakteryzuje się najlepszą przewodnością elektryczną wśród omawianych materiałów. Połączenie wysokiego współczynnika rozszerzalności cieplnej, niskiej temperatury topnienia i wysokich kosztów surowca ogranicza zastosowanie srebra jako materiału na elektrodę roboczą w procesie EDM [14].

Tsai i Masuzawa [127] wykazali, iż wysoka przewodność cieplna srebra zmniejsza stopień zużycia ER przy obróbce stali nierdzewnej AISI 304. Santoki [128] stwierdził, iż przy obróbce tej samej stali srebro osiąga większą wydajność usuwania materiału niż elektroda grafitowa przy niskich wartościach natężenia prądu.

Spiek wolframu i srebra (Ag-W) łączy w sobie odporność na zużycie wolframu z wysoką przewodnością elektryczną srebra, co zapewnia niskie zużycie ER i wysoką jakość wykończenia powierzchni przedmiotu. Zakres zastosowań elektrody Ag-W jest bardzo ograniczony ze względu na wysoki koszt materiałów. Porównując właściwości spieku wolfram-srebro (70% W, 30% Ag) z miedziowolframem można zauważyć, iż oba materiały mają podobne właściwości.

Jahan [125] wykazał, iż w trakcie mikro-drażenia węgliku wolframu, elektroda Ag-W, w porównaniu z elektrodami wolframowymi i miedziowolframowymi, zapewniła uzyskanie najniższej chropowatości powierzchni przedmiotu. Zużycie elektrody Ag-W było najwyższe spośród trzech badanych materiałów. Zespół profesora Kadirvela [129] porównał różne elektrody podczas mikro-drażenia stali matrycowej EN-24. Elektroda Ag-W uzyskała większą wydajność usuwania materiału z przedmiotu obrabianego w porównaniu z elektrodami Cu-W i W, ale mniejszą od elektrod miedzianych (rys. 2.27).



Rys. 2.27. Wpływ energii wyładowania elektrycznego oraz materiału elektrod przy drażeniu stali EN-24 na wydajność objętościową obróbki [129]

Węglik wolframu (WC) charakteryzuje się wysoką temperaturą topnienia, a także twardością i sztywnością, co umożliwia wykonywanie z tego materiału cienkich elektrod o bardzo małych średnicach i dużym współczynniku stosunku długości do średnicy. Z tego względu węglik wolframu jest najczęściej stosowany jako materiał na elektrodę roboczą w operacjach elektrodrażenia małych otworów [14, 130].

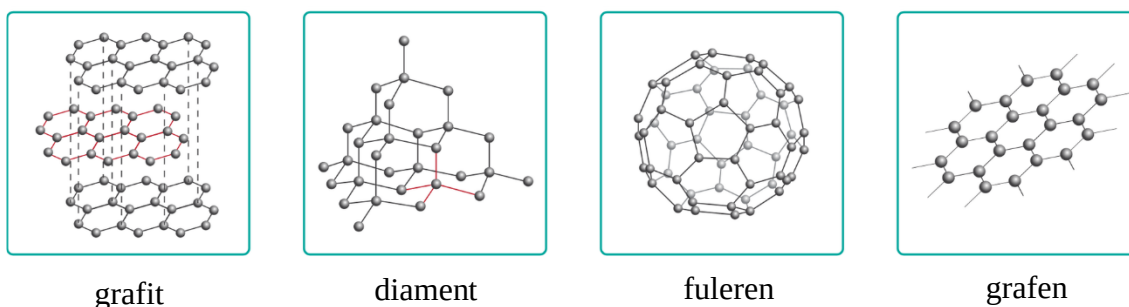
Badania Hera i Wenga [114] wykazały, iż elektroda z węgla wolframu uzyskała wyższą wydajność usuwania materiału z przedmiotu obrabianego niż elektroda miedziana przy mikro-drażeniu otworów w płytkach miedzianych. D'Urso i Merla [120, 131] zaobserwowali, iż elektrody WC zapewniły niższy wskaźnik zużycia narzędzia niż elektrody mosiężne w trakcie obróbki stali nierdzewnej AISI 304. Natężenie prądu, napięcie i częstotliwość wyładowań były głównymi czynnikami determinującymi wskaźniki TWR i MRR. Podobne zależności zaobserwował Bhaumik [132] przy obróbce tej samej stali elektrodami WC. Fu [126] porównał elektrody WC i W podczas mikro-drażenia stali AISI 304 stwierdzając, iż elektroda z węgla wolframu osiąga większe zużycie w porównaniu z wolframem.

Aluminium ze względu na dobre przewodnictwo elektryczne i cieplne może być wykorzystywane jako materiał na ER. Z drugiej strony aluminium charakteryzuje się wysokim współczynnikiem rozszerzalności liniowej, rozszerzając się bardziej niż inne elektrody podczas obróbki elektroerozyjnej, oraz niską temperaturą topnienia, co przekłada się na wyższe zużycie narzędzia i niższą dokładność obróbki niż w przypadku innych materiałów.

Khan i Saifuddin [107] przeprowadzili analizę porównawczą elektrod aluminiowych i miedzianych podczas obróbki elektroerozyjnej stali nierdzewnej (AISI 304) i stopu węgla wolframu z kobaltem (WC-Co). Autorzy stwierdzili, iż elektroda aluminiowa zapewniła uzyskanie najniższej chropowatości powierzchni dla obu materiałów obrabianych. Badacze [133] wykazali, iż zastosowanie elektrody aluminiowej przy elektrodrażeniu Ti6Al4V pozwoliło zminimalizować liczbę mikropęknięć na powierzchni obrabianej i uzyskać niższą chropowatość powierzchni w porównaniu z elektrodami grafitowymi i miedzianymi.

2.6. Elektrody grafitowe

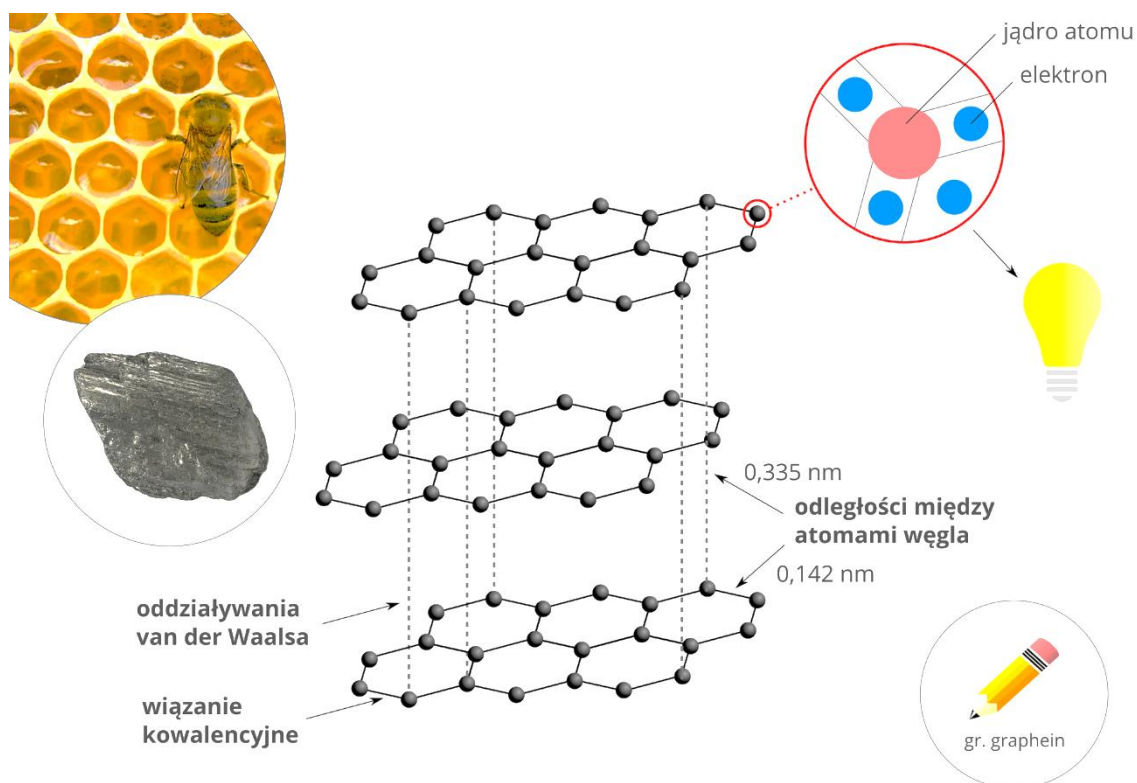
Podstawowymi odmianami alotropowymi węgla występującymi w przyrodzie są: węgiel amorficzny, diament oraz grafit. Współczesne badania naukowców doprowadziły do powstania kolejnych odmian alotropowych węgla: fuleren oraz grafen (rys. 2.28). Różne odmiany alotropowe węgla posiadają odmienne właściwości. Diament jest najtwardszym minerałem występującym w przyrodzie (twardość w skali Mohsa: 10) i nie przewodzi prądu elektrycznego, natomiast grafit jest jedną z substancji o najmniejszej twardości (twardość w skali Mohsa: 1) i przewodzi prąd elektryczny. Poszczególne właściwości odmian alotropowych węgla są ściśle uzależnione od budowy sieci krystalicznej oraz sposobu w jaki atomy węgla tworzą ze sobą wiązania [134, 135].



Rys. 2.28. Podstawowe odmiany alotropowe węgla [135]

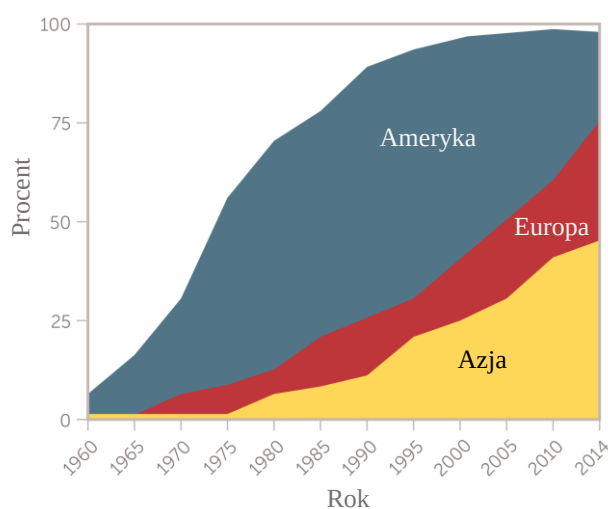
Struktura grafitu składa się z szeregu równoległych warstw, rozmieszczonych jedna pod drugą, w których atomy węgla ułożone są w regularne sześciokąty o wspólnych bokach (rys. 2.29). Atomy węgla w obrębie każdej warstwy połączone są silnymi wiązaniami kowalencyjnymi z trzema sąsiednimi atomami tego pierwiastka. Budowa każdej warstwy przypomina strukturę plastra miodu. W strukturze grafitu tylko trzy z czterech elektronów walencyjnych węgla tworzą wiązania kowalencyjne z sąsiednimi atomami węgla (hybrydyzacja Sp^2). Niesparowany elektron na ostatniej powłoce umożliwia przewodnictwo elektronowe. Między warstwami występują niewielkie oddziaływania sił Van der Waalsa, które stanowią zaledwie 2% energii wiązań między atomami w płaszczyźnie. Odległości między poszczególnymi płaszczyznami są około 2,5 razy większe niż długość wiązań kowalencyjnych między atomami węgla w zamkniętych pierścieniach. Z tego względu grafit charakteryzuje się bardzo niską twardością, dobrymi właściwościami smarnymi i stosunkowo łatwo się rozdziela, co można zaobserwować za każdym razem przyciskając ołówek do kartki papieru [134, 135, 136].

Grafit jest jednym z najczęściej stosowanych materiałów na elektrody robocze w obróbce elektroerozyjnej, z uwagi na dobre właściwości elektryczne i termiczne oraz łatwą obróbkę mechaniczną [14]. W przeciwieństwie do miedzi grafit posiada wysoką odporność na zużycie w trakcie elektrodrążenia ze względu na wysoką temperaturę sublimacji, która wynosi 3650°C (temperatura topnienia miedzi wynosi 1083°C). Jego wytrzymałość mechaniczna jest znacznie niższa niż materiałów metalicznych, choć właściwości te nie mają istotnego znaczenia, ponieważ w trakcie obróbki elektroerozyjnej nie występują siły mechaniczne pomiędzy elektrodą a przedmiotem [5].



Rys. 2.29. Struktura krystaliczna grafitu [135]

Grafit jest dominującym materiałem stosowanym na elektrody robocze w Stanach Zjednoczonych, gdzie został pierwotnie opracowany, co najmniej 95% elektrod jest wytwarzanych z tego materiału. W przypadku Europy i Azji preferowanym materiałem jest wciąż miedź, jednakże użycie grafitu w tych rejonach stale rośnie (rys 2.30). Mercer [137] stwierdził, iż obecnie ponad 70 % światowego rynku wykorzystuje grafit jako materiał na elektrody robocze w EDM.



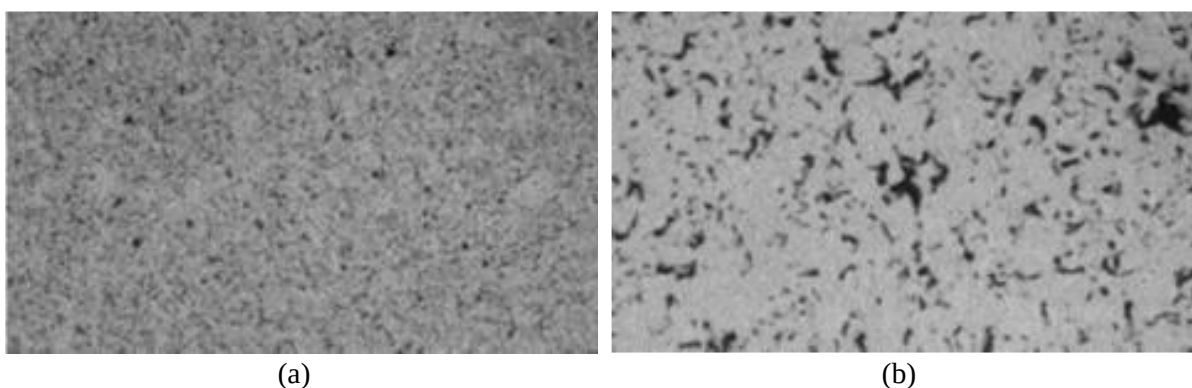
Rys. 2.30. Wykorzystanie grafitu na rynkach światowych [137]

Niektóre właściwości grafitu mają istotny wpływ na przebieg obróbki elektroerozyjnej, mianowicie wielkość ziarna (mniejsze rozmiary cząsteczek powodują poprawę właściwości mechanicznych grafitu, co minimalizuje zużycie narzędzia i zapewnia lepsze wykończenie powierzchni), porowatość (która może oddziaływać na właściwości elektryczne i termiczne grafitu), wytrzymałość na zginanie oraz twardość [14].

Grafit, w porównaniu z miedzią, zapewnia w wielu przypadkach wyższą wydajność drążenia oraz mniejsze zużycie ER, podczas gdy porównywalna jakość wykończenia powierzchni jest w głównej mierze determinowana od rodzaju grafitu. Jedną z wad grafitu jest generowanie dużej ilości pyłu w trakcie obróbki skrawaniem, który może wnikać w elementy mechaniczne maszyny skracając jej żywotność [138].

2.6.1. Grafit o wysokiej izotropowości (POCO)

Grafit konwencjonalny w porównaniu z grafitem o wysokiej izotropowości (POCO) wykazuje znaczące różnice mikrostrukturalne, które są bezpośrednio związane z materiałem surowca oraz parametrami procesu wytwarzania grafitu. Na rys. 2.31 ciemne oraz czarne obszary reprezentują porowatość, podczas gdy jaśniejsze obszary uwidaczniają grafitową matrycę (cząstki grafitu). Matryca jest złożona z kryształów ułożonych warstwa po warstwie, które tworzą cząstki lub ziarno. Cząstki połączone są ze sobą w sposób mechaniczny lub chemiczny [134, 139, 140].



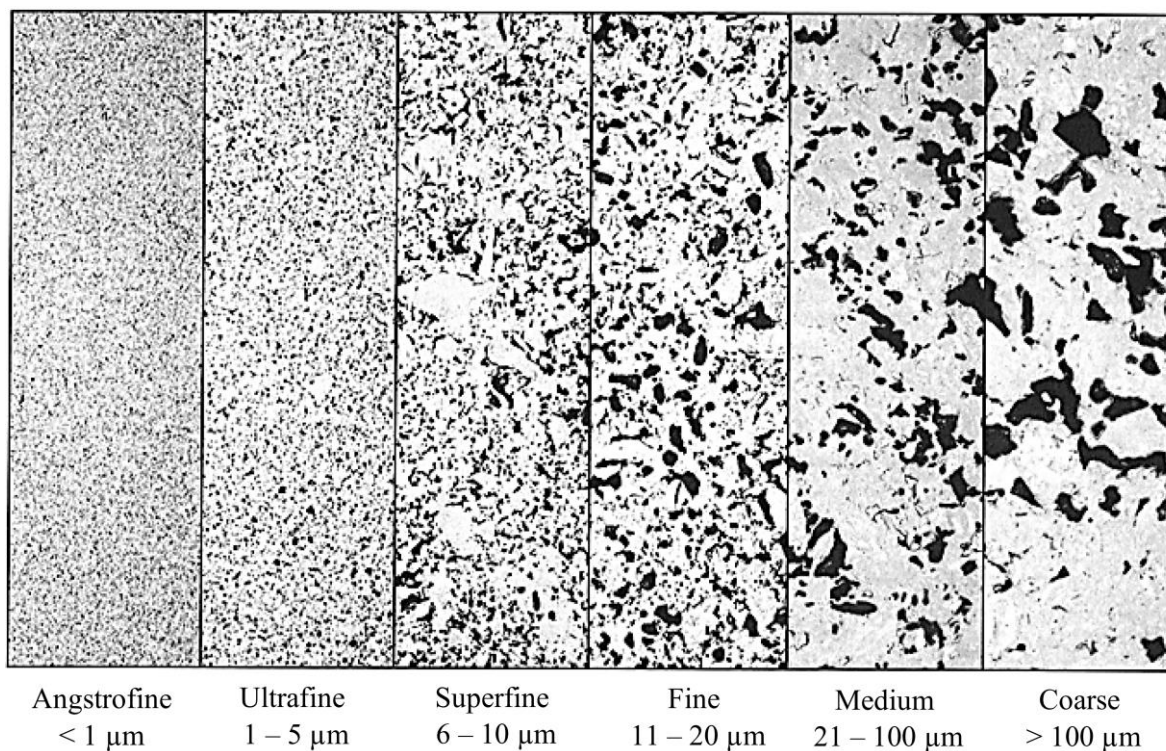
Rys. 2.31. Mikrostruktura grafitu a) o wysokiej izotropowości (POCO), b) konwencjonalnego [140]

Grafit POCO jest wytwarzany w zastrzeżonym procesie i został pierwotnie opracowany w latach sześćdziesiątych XX wieku jako materiał na osłonę cieplną w statkach kosmicznych. Obecnie grafity POCO są wykorzystywane w przemyśle komputerowym, reaktorach

termojądrowych, statkach kosmicznych i innych zaawansowanych technologiach, w tym jako materiały na elektrody robocze w obróbce elektroerozyjnej [139].

Właściwości mechaniczne oraz fizyko-chemiczne grafitu POCO są bezpośrednio lub pośrednio determinowane rozmiarem cząstek, które w różny sposób wpływają na przebieg obróbki elektroerozyjnej. W związku z powyższym grafity POCO są klasyfikowane według wielkości cząstek (ziarna grafitu) – rys. 2.32. Każdy gatunek grafitu jest dostosowany do oczekiwanego poziomu wydajności oraz jakości wykończenia powierzchni. Grafity POCO można sklasyfikować na sześć podstawowych gatunków [139] :

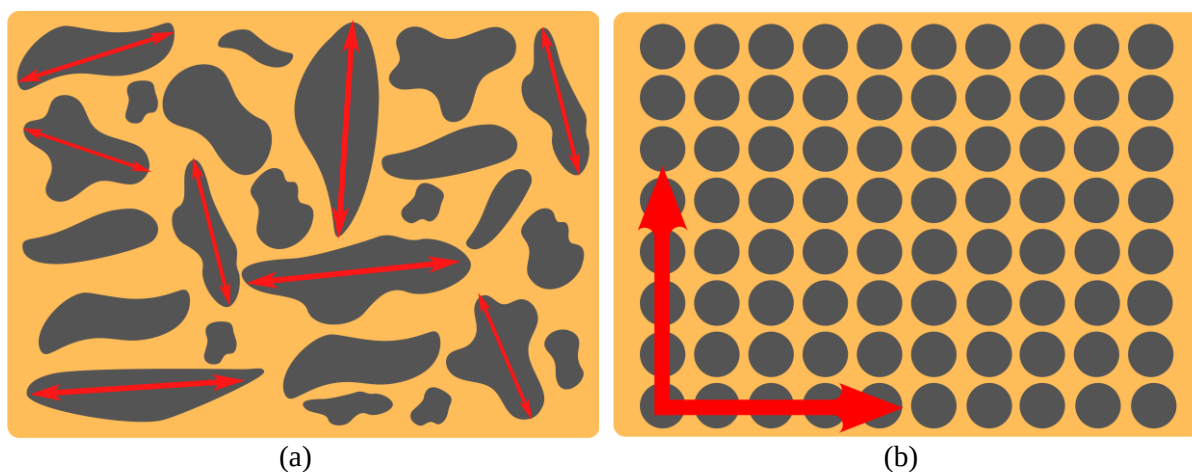
- angstro-drobnziarnisty (*Angstrofine*) - wielkość ziarna poniżej 1 μm ,
- ultradrobnziarnisty (*Ultrafine*) - wielkość ziarna 1-5 μm ,
- wysoce drobnziarnisty (*Superfine*) - wielkość ziarna 6-10 μm ,
- drobnziarnisty (*Fine*) - wielkość ziarna 11-20 μm ,
- średnioziarnisty (*Medium*) - wielkość ziarna 21-100 μm ,
- gruboziarnisty (*Coarse*) - wielkość ziarna powyżej 100 μm .



Rys. 2.32. Klasyfikacja grafitu na podstawie wielkości ziarna przez firmę POCO [139]

Pod względem struktury krystalicznej grafit POCO ma typową strukturę heksagonalną. Wszystkie cząstki mają identycznie małe kształty i są zaokrąglone. Większość grafitów POCO

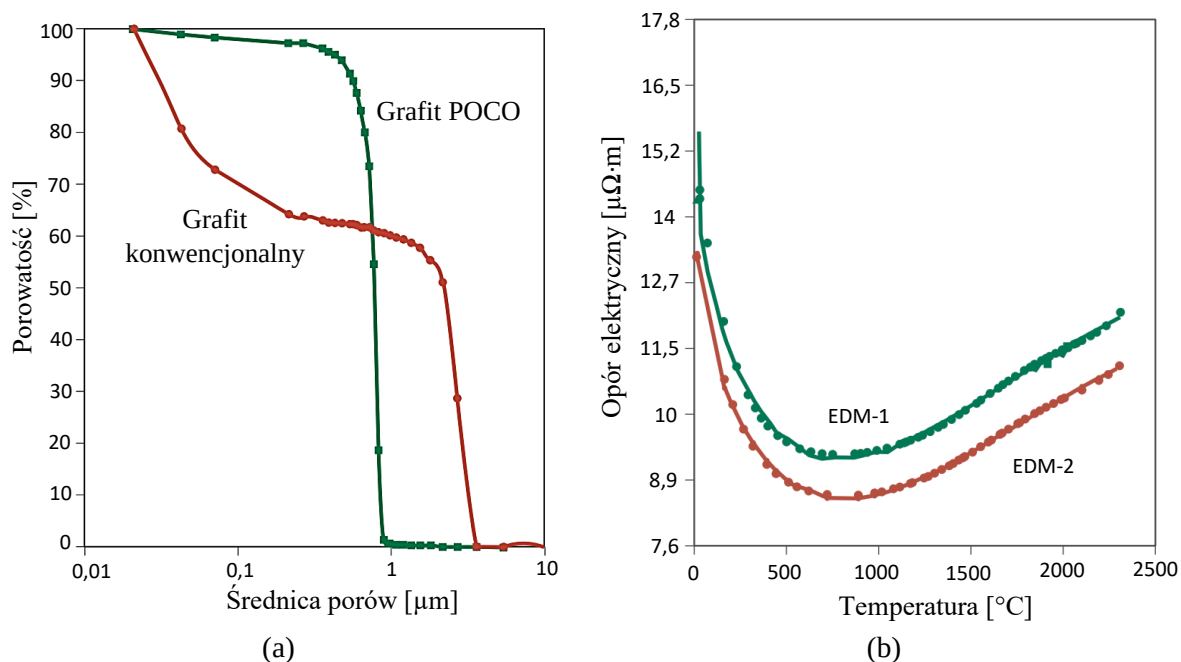
posiada gęstość pozorną w zakresie 1,55 - 1,85 g/cm³. Materiały grafitowe są porowate, stąd wykorzystuje się tu termin gęstości pozornej. Objętość porów jest niewielka i są małych rozmiarów, zwykle nie przekraczają wielkości 2 µm. Z uwagi na okrągły kształt cząstek, nie mają one dłuższej osi jak w przypadku cząstek w graficie konwencjonalnym (rys. 2.33a). W graficie POCO nie występuje preferowany kierunek orientacji ziarna, dlatego materiał ten jest wysoce izotropowy pod względem swojej struktury i właściwości (rys. 2.33b). Współczynnik izotropii zawiera się w przedziale 0,97 – 1,03, przy czym 1,00 oznacza wartość idealną. Wiele konwencjonalnych grafitów posiada strukturę anizotropową. Wysoki stopień izotropii grafitu POCO sprawia, iż właściwości takie jak wytrzymałość lub oporność elektryczna są takie same we wszystkich kierunkach. Pozwala to również na ich szersze wykorzystanie jako elektrody do drążenia przestrzennego, ponieważ orientacja obróbki nie ma znaczenia w przypadku materiałów izotropowych [134, 139, 140, 141].



Rys. 2.33. Struktura grafitu a) anizotropowa, b) izotropowa

Zgodnie z normą ASTM C709, która odnosi się do definicji terminów związanych z wyrobami z węgla i grafitu, standardowa definicja porowatości to: „procent całkowitej objętości materiału zajmowanego przez pory otwarte i zamknięte” [134]. Obecnie w normie nie ma zdefiniowanej metody pomiaru porowatości grafitu. Objętość porów dla grafitów o tej samej gęstości pozornej jest taka sama. Średnia wielkość porów grafitu POCO zawiera się w przedziale od 0,2 do 2,0 µm dla różnych gatunków i gęstości. Pory mają ogólnie kuliste kształty. Konwencjonalny grafit posiada pory wielkości kilku mikrometrów. W przypadku grafitu POCO rozkład wielkości porów jest bardzo wąski, podczas gdy w przypadku konwencjonalnego grafitu jest na ogół szerszy (rys. 2.34a). Pory w graficie POCO są nie tylko równomiernie rozłożone, ale także dobrze ze sobą połączone. Wraz ze wzrostem temperatury

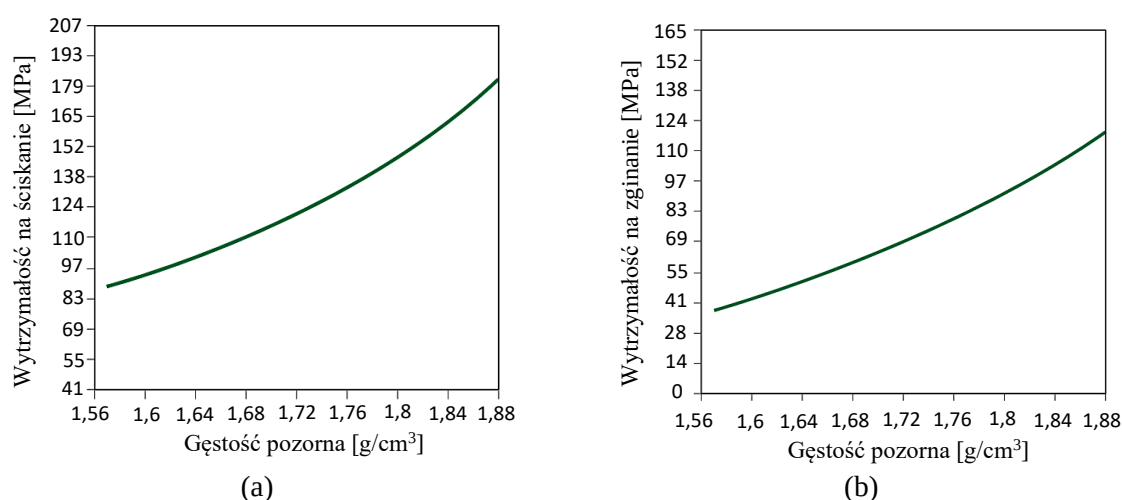
pory ulegają rozszerzeniu aż do momentu otwarcia wcześniej zamkniętych porów. Wielkość porów w graficie jest tym wyższa im większa jest gęstość pozorna materiału [134, 140].



Rys. 2.34. a) Rozkład wielkości porów grafitu konwencjonalnego i izotropowego, b) wpływ temperatury na opór elektryczny grafitu POCO [140]

Grafity POCO, w zależności od gatunku, posiadają wartości rezystywności elektrycznej w zakresie od około 12 do 27 $\mu\Omega\cdot m$. Opór właściwy miedzi jest znacznie mniejszy i wynosi około 0,017 $\mu\Omega\cdot m$. Rezystywność elektryczna w obróbce elektroerozyjnej ma znaczenie głównie w przypadku cienkościennych elektrod. Oporność elektryczna grafitu POCO maleje od temperatury pokojowej do około 700°C, a następnie wzrasta (rys. 2.34b). Wraz ze wzrostem gęstości grafitu POCO zmniejsza się jego rezystywność elektryczna i wzrasta przewodność cieplna. Przewodność cieplna grafitów POCO zawiera się w przedziale 69 - 121 W/mK i maleje wraz ze wzrostem temperatury. Miedź ma wyższą przewodność cieplną, która wynosi 385 W/mK. Większość grafitów POCO posiada twardość w skali Shore'a mieszczącą się w zakresie 45 - 85. Najbardziej preferowanym do obróbki jest grafit o wysokiej wytrzymałości i twardości z przedziału 55 - 75 według skali Shore'a. Grafit o niskiej wytrzymałości i wysokiej twardości charakteryzuje się zbyt dużą kruchością. Wytrzymałość na ściskanie grafitu POCO waha się od 70 do 210 MPa, w zależności od wybranego gatunku. Wartości te są od dwóch do trzech razy wyższe niż w przypadku większości innych grafitów konwencjonalnych. Wytrzymałość na zginanie grafitów POCO jest mniejsza niż wytrzymałość na ściskanie i mieści się w zakresie od 35 do 125 MPa. Grafit konwencjonalny posiada dużo mniejszą wytrzymałość na zginanie w zakresie 7 - 42 MPa. Grafit POCO posiada taką samą wytrzymałość we

wszystkich kierunkach ze względu na izotropową strukturę ziarna. Większość konwencjonalnych grafitów jest anizotropowa i w zależności od kierunku orientacji ziaren wytrzymałość na zginanie może się zmieniać od 30 do nawet 50 %. Wytrzymałość grafitu jest ściśle skorelowana z wielkością ziarna oraz porów. Wiązania między poszczególnymi cząstkami grafitów typu *Angstrofine* i *Ultrafine* są dużo silniejsze niż w przypadku gatunków o większych rozmiarach ziaren. Generalnie, właściwości mechaniczne oraz fizyczne poprawiają się wraz ze wzrostem gęstości pozornej grafitu (rys. 2.35). W przypadku wytrzymałości na ściskanie oraz zginanie, ich wartości stale rosną wraz ze wzrostem gęstości pozornej grafitu [134, 139, 142].



Rys. 2.35. Wpływ gęstości pozornej grafitu POCO na: a) wytrzymałość na ściskanie, b) wytrzymałość na zginanie [140]

Obecnie grafit firmy POCO jest dostępny na rynku pod różnymi oznaczeniami handlowymi, które określają wielkość ziarna i obszar ich zastosowania (tabela 2.2).

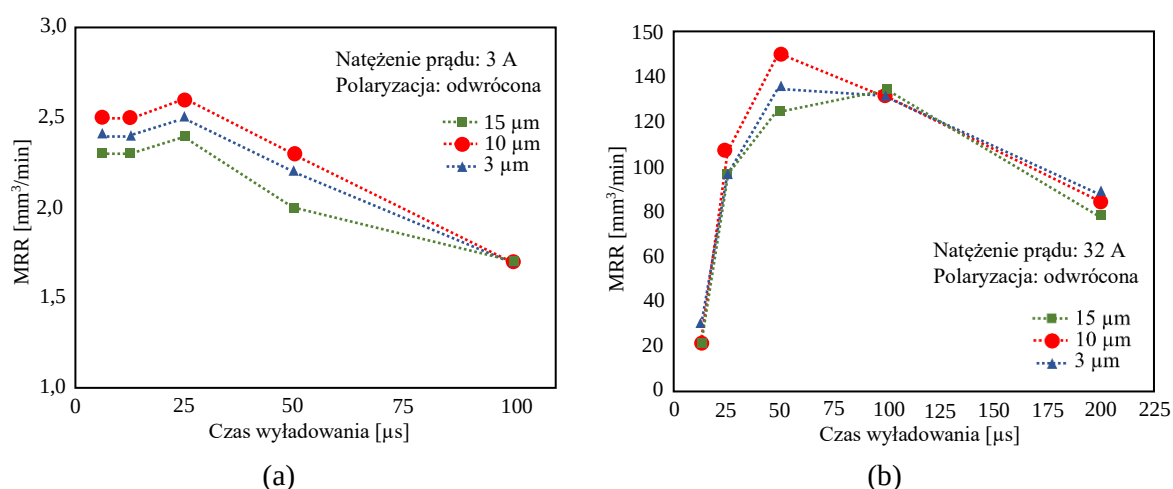
Tabela 2.2. Klasyfikacja grafitów POCO [143]

Struktura ziarnistości	Oznaczenie grafitu	Rozmiar ziarna	Gęstość pozorna	Twardość (Shora)	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	Opór właściwy
		[μm]	[g/cm³]			[$\mu\Omega\text{m}$]
Standardowa	S-180	10	1,78	66	58	13
	EDM-200	10	1,81	68	62	14,7
Drobna	EDM-1	5	1,63	69	67	19,3
	EDM-2	5	1,67	71	77	15,8
	EDM-3	5	1,73	73	92	15,6
Bardzo drobna	AF-5	< 1	1,8	83	100	21,6
Nasycona miedzą	EDM-C3	5	3	66	114	3,2
	EDM-C200	10	3	62	90	2,9

2.6.2. Elektrody grafitowe w obróbce elektroerozyjnej

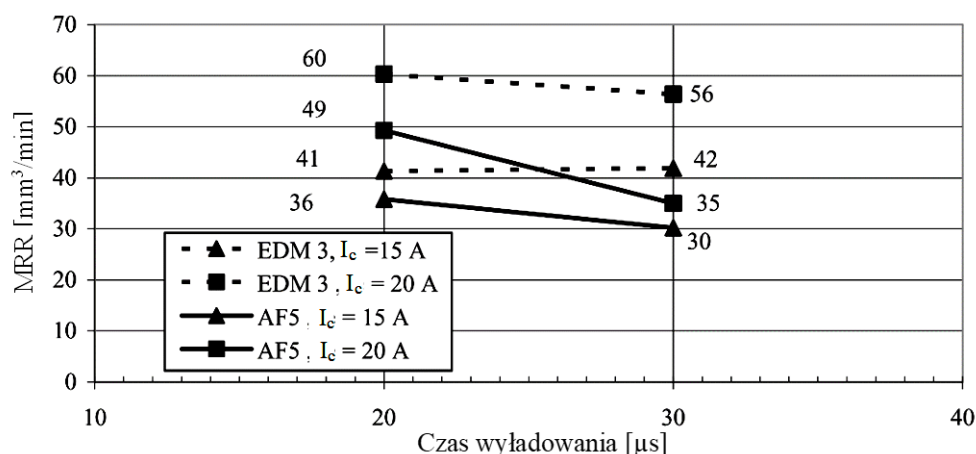
W dostępnych publikacjach naukowych autorzy często porównują elektrody grafitowe z innymi materiałami (najczęściej miedzią) w aspekcie wydajności procesu, zużycia narzędzia oraz jakości wykończenia powierzchni przedmiotu po obróbce elektroerozyjnej. W nielicznych publikacjach badacze uwzględniają właściwości fizyczne grafitu na efekty obróbki oraz jak wielkość ziarna determinuje mechanizm erozji przedmiotu [144].

Jednym z pierwszych zespołów badawczych, który dokonał analizy wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych na wskaźniki technologiczne procesu EDM byli brazylijscy naukowcy z Uniwersytetu w Parana [145]. Badacze przeprowadzili analizę wpływu parametrów elektrycznych przy elektrodrażeniu stopu tytanu Ti-6Al-4V za pomocą elektrod grafitowych o wielkości ziarna 3, 10 i 15 μm . Próby drażenia były przeprowadzane przy polaryzacji ujemnej. Wyniki badań wykazały, iż wzrost wielkości ziarna z 3 do 10 μm powoduje zwiększenie wydajności usuwania materiału poprzez odrywanie się większych cząsteczek grafitu od elektrody, w wyniku efektu spallingu, które następnie zderzają się z ciekłym jeziorkiem stopionego materiału i usuwają go z krateru (rys. 2.36). Zwiększenie wielkości ziarna grafitu z 10 do 15 μm powoduje obniżenie wydajności usuwania materiału. Autorzy przypuszczają, że odrywanie większych cząsteczek grafitu powoduje w trakcie zderzenia z roztopionym materiałem w kraterze tworzenie się odprysków, które w nadmiernych ilościach zalegają w szczelinie i blokują efektywny przepływ dielektryka. Zjawisko to sprzyja zanieczyszczeniu szczeliny międzyelektrodowej, co ostatecznie prowadzi do powstania impulsów zwarciovych i zmniejszenia wskaźnika MRR.



Rys. 2.36. Wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych przy polaryzacji odwróconej dla natężenia prądu: a) 3 A, b) 32 A [145]

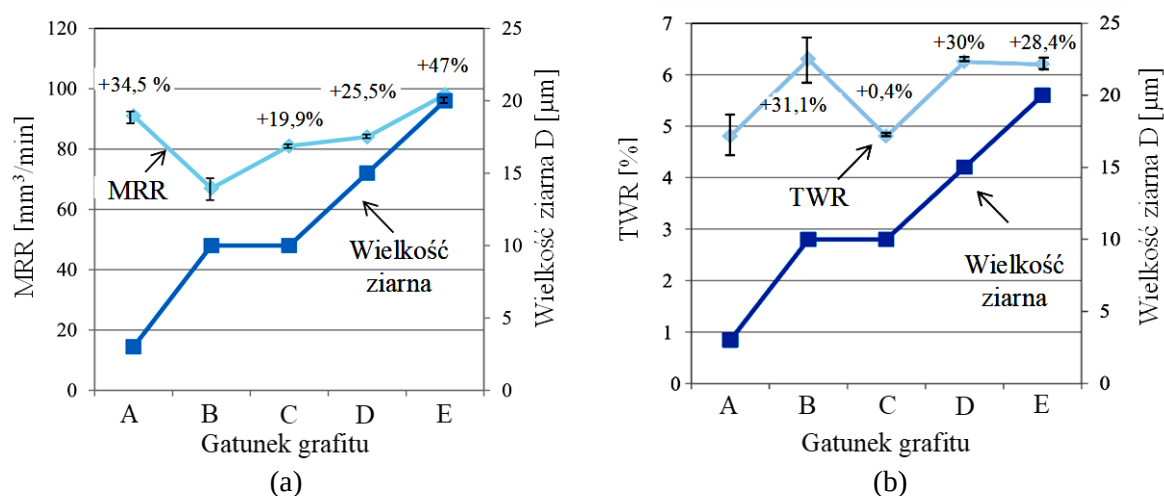
Aas [146] jako jeden z nielicznych naukowców dokonał porównania dwóch gatunków elektrod grafitowych o wysokiej izotropowości firmy POCO: AF-5 i EDM-3, przy obróbce „szczelin uszczelniających” w łopatkach turbin wykonanych ze stopu na bazie niklu. Wydajność usuwania materiału dla elektrody EDM-3 była znacząco większa (tj. 15 - 65 %) niż dla elektrody AF-5 (rys.2.37). Badacz wykazał, że im mniejsza wielkość ziarna elektrody grafitowej tym mniejszy wskaźnik zużycia narzędzia.



Rys. 2.37. Wpływ wielkości ziarna elektrody grafitowych oraz parametrów obróbki na objętościową wydajność usuwania materiału [146]

Torres [147] przeprowadził badania wpływu polaryzacji elektrod na efekty obróbki elektroerozyjnej stopu Inconel 600 elektrodą grafitową EDM-1. Wyniki badań wykazały, iż natężenie prądu było dominującym czynnikiem determinującym wydajność procesu i zużycie ER, zarówno przy polaryzacji dodatniej, jak i ujemnej. Przy tych samych parametrach obróbki większą wydajność usuwania materiału osiągnięto dla polaryzacji odwróconej. Przy polaryzacji ujemnej zaobserwowano wysoki stopień zużycia ER oraz zwiększoną adhezję węgla na powierzchni obrabianej. W przypadku polaryzacji dodatniej cząsteczki węgla były niewidoczne. Natężenie prądu i czas wyładowania elektrycznego były najważniejszymi parametrami wpływającymi na parametry SGP. Przy polaryzacji dodatniej osiągnięto mniejsze wartości chropowatości powierzchni po obróbce (parametr *Ra*) niż przy tych samych parametrach stosując polaryzację odwróconą. Autorzy [147] dokonali analizy uzyskanych wyników badań w kategoriach ekonomicznych dla potrzeb przemysłu. W tym celu porównali zarówno koszty produkcji, jak i czas wytworzenia elektrody grafitowej z kosztami uzyskanymi dla elektrod miedzianych. Stwierdzono, iż zastosowanie elektrody grafitowej z ujemną polaryzacją jest najbardziej ekonomiczną opcją wśród rozważanych przypadków. Podobne zależności wykazał także Kumar [148].

Grupa niemieckich naukowców [149] dokonała analizy wpływu właściwości fizycznych 5 różnych gatunków grafitu na wydajność drążenia i zużycie ER. Badacze wykazali, iż natężenie prądu ma główny wpływ na szybkość usuwania materiału, a czas wyładowania na zużycie ER. Na podstawie szczegółowej analizy stwierdzono, że nie ma bezpośredniej zależności między wydajnością i zużyciem narzędzia a rozmiarem ziarna elektrody grafitowej (rys. 2.38). Naukowcy stwierdzili, iż główną właściwością fizyczną materiału elektrody wpływającą na wydajność drążenia jest przewodność elektryczna. Określenie dominującej właściwości fizycznej ER w przypadku zużycia narzędzia nie było tak oczywiste. Przypuszcza się, że stanowi to połączenie wielkości ziarna i rezystancji elektrycznej materiału elektrody.



Rys. 2.38. Wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych na: a) objętościową wydajność usuwania materiału, b) względne zużycie elektrody roboczej [149]

Profesor Muttamara [123] przeprowadził badania drążenia stopu tytanu Ti-6Al-4V elektrodą grafitową EDM-3 oraz impregnowaną miedzią EDM-C3. Przy tych samych parametrach obróbki uzyskano niższą chropowatość powierzchni oraz większą wydajność usuwania materiału dla elektrody grafitowej EDM-3. Naukowiec tłumaczy to szybszym zużyciem elektrody infiltrowanej miedzią. Grafit EDM-3 ze względu na wyższą temperaturę sublimacji (3650 °C) zużywa się wolniej niż grafit impregnowany miedzią (EDM-C3). Dodatkowo, w trakcie wyładowania elektrycznego, część miedzi zawartej w elektrodzie EDM-C3 znacznie łatwiej ulega topnieniu niż sublimacja węgla w elektrodzie grafitowej EDM-3. Zaobserwowano również, iż stopień zużycia naroża elektrody EDM-C3 po procesie EDM był wyraźnie większy od zużycia na elektrodzie grafitowej EDM-3 (rys. 2.39).



Rys. 2.39. Zużycie naroża elektrody roboczej po procesie EDM dla elektrody: a) EDM-3, b) EDM-C3 [123]

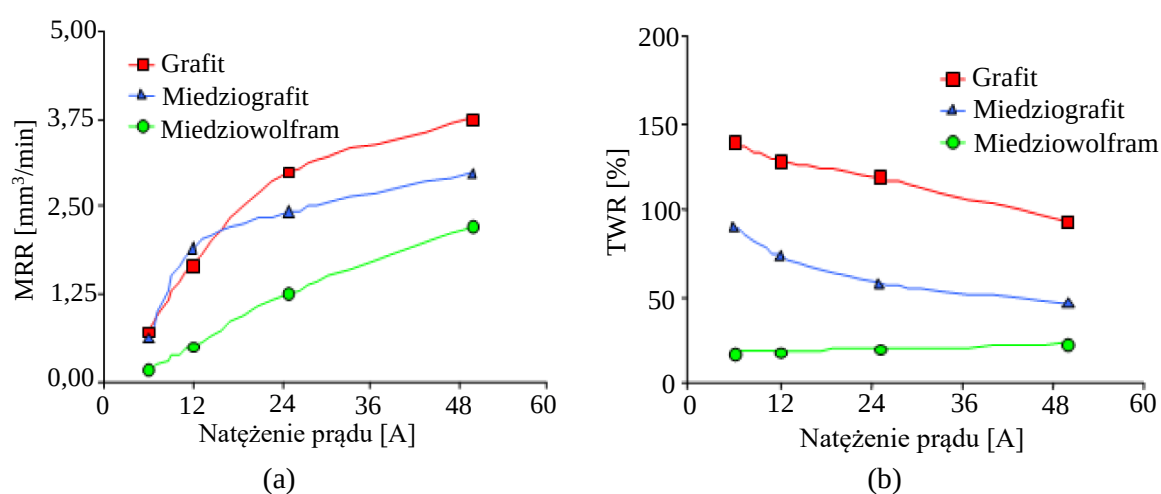
Ayesta wraz z zespołem [150] przeprowadził badania obróbki elektroerozyjnej stopu lotniczego na bazie niklu C1023 wykorzystując elektrodę grafitową EDM-3. Wyniki badań ujawniły, iż zużycie elektrody roboczej było najmniejsze przy wysokim natężeniu prądu i długim czasie wyładowania. Niższe czasy jednostkowe drążenia uzyskano przy wysokim natężeniu prądu i niskim napięciu wyładowania. W przypadku wysokich wartości natężenia prądu najlepsze wyniki uzyskano przy długim czasie impulsu, a przy niskich wartościach natężenia prądu najkorzystniejsze wyniki otrzymano przy krótkim czasie wyładowania elektrycznego. Badacze stwierdzili, iż niskie zużycie elektrody i wysoką wydajność drążenia uzyskuje się poprzez połączenie niskiej intensywności wyładowań elektrycznych przy długim czasie impulsu i niskim napięciu wyładowania.

Zespół profesora Muttamara [151] wykazał, iż w trakcie elektrodrążenia aluminium większą wydajność usuwania materiału uzyskano dla elektrody grafitowej impregnowanej miedzią niż dla czystej miedzi oraz grafitu EDM-3. Naukowcy przypuszczają, że może to wynikać z wysokiej rezystancji elektrody grafitowej, która obniża MRR. Najmniejsze zużycie ER otrzymano dla elektrody EDM-C3 i polaryzacji prostej. Dodatnia biegunowość narzędzia zapewnia wyższy wskaźnik MRR i mniejszy stopień zużycia elektrody (TWR). Najmniejszą wartość parametru chropowatości Ra uzyskano dla elektrody EDM-C3.

Uhlmann i Domingos [152] wykazali, iż elektrody grafitowe infiltrowane miedzią EDM-C3 osiągają większą wydajność obróbki niż czysty grafit EDM-3 przy drążeniu stopu na bazie niklu MAR-M247. Krótszy czas jednostkowy drążenia osiągnięty przez elektrodę EDM-C3 naukowcy tłumaczą lepszymi właściwościami fizycznymi, w tym niższym właściwym oporem elektrycznym i wyższym przewodnictwem cieplnym, w porównaniu z elektrodą grafitową EDM-3. Stwierdzono również, iż natężenie prądu, a także czas wyładowania są najistotniejszymi czynnikami determinującymi wydajność drążenia.

Zespół hiszpańskich naukowców z Uniwersytetu w Bilbao [153] dokonał analizy zużycia grafitowej elektrody roboczej (EDM-200) o złożonej geometrii w trakcie drążenia stali F114 na obrabiarce wieloosiowej. Przy wysokich wartościach natężenia prądu i czasu wyładowania ostre narożniki elektrody uległy wyraźnemu zaokrągleniu. Naukowcy zaobserwowali również narosty na powierzchni ER, które są wynikiem osadzania się węgla na powierzchni narzędzia w trakcie pirolizy dielektryka. Wyniki badań wskazały nieprzewidywalność geometrii warstwy węglowej dla elektrod o złożonej geometrii. Stwierdzono, iż wygenerowana warstwa jest również funkcją ścieżki obróbki określająca rzeczywiste obszary, w których występują wyładowania elektryczne, oraz geometrii narzędzia. Według autorów zachodzące zjawiska fizyczne na powierzchni ER obligują producentów obrabiarek do wdrożenia we współczesnych drążarkach elektroerozyjnych strategii kontrolowanego zużycia narzędzia.

Janmanee i Muttamara [154] zbadali oddziaływanie różnych materiałów na elektrody robocze przy elektrodrążeniu węgla wolframu. W badaniach zastosowano elektrodę grafitową EDM-3 i impregnowaną miedzią EDM-C3 oraz elektrodę z miedziowolframu. Naukowcy zaobserwowali, iż zmniejszenie współczynnika wypełnienia impulsu skutkuje mniejszą wydajnością usuwania materiału. Wzrost natężenia prądu jest głównym czynnikiem determinującym wysokie wartości MRR. Elektroda grafitowa przy polaryzacji ujemnej zapewniła spośród trzech badanych elektrod największą szybkość usuwania materiału oraz niską chropowatość powierzchni przedmiotu, przy jednocześnie wysokim współczynniku zużycia elektrody roboczej (rys. 2.40).



Rys. 2.40. Wpływ materiału ER oraz natężenia prądu w trakcie drążenia elektroerozyjnego węgla wolframu na: a) wydajność usuwania materiału, b) względne zużycie elektrody roboczej [154]

Zespół naukowców z Uniwersytetu Thammasat w Bangkoku [155] dokonał optymalizacji parametrów obróbki elektroerozyjnej miedziowolframu (Cu-70% i W-30%) elektrodą EDM-3 wykorzystując metodę Taguchi. Wzrost prądu wyładowania do wartości 25 A powodował wzrost MRR, a następnie spadek. Wydłużenie czasu wyładowania zwiększało wydajność obróbki, natomiast wzrost napięcia wyładowania do 150 V powodował jej spadek. Zużycie ER zmniejszało się wraz z obniżeniem współczynnika wypełnienia impulsu oraz napięcia wyładowania. Najniższą wartość zużycia zaobserwowano dla biegunowości ujemnej z minimalnym napięciem wyładowania i czasem impulsu oraz maksymalnym natężeniem prądu i czasem przerwy. Podobne zależności zaobserwował również Puertas i współautorzy [156]. Chropowatość powierzchni uległa pogorszeniu wraz ze wzrostem napięcia i natężenia prądu.

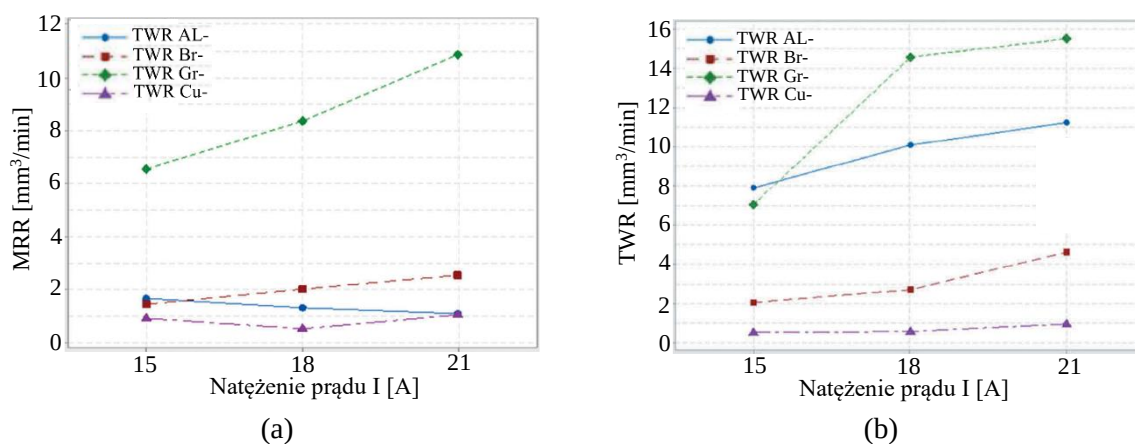
Profesor Sundaram wraz z zespołem [157] przeprowadził badania drażenia mikro-rowków w stali narzędziowej XW 42 wykorzystując oddziaływanie pola magnetycznego w szczelinie międzyelektrodowej. Autorzy wykorzystali 3 materiały na „foliowe” elektrody robocze o szerokości około 50 μm : wolfram, grafit EDM-3 oraz stal nierdzewną. Wydajność drażenia z wykorzystaniem grafitu była około od 30 do 40 razy większa niż dla pozostałych dwóch materiałów. Autorzy tłumaczą, iż elektrody „foliowe” ze stali i wolframu topią się podczas wyładowania elektrycznego i doprowadzają do zwarcia z przedmiotem obrabianym poprzez utworzenie półstopionego mostka w kształcie igły. W przypadku grafitu, który posiada wysoką temperaturę sublimacji, badacze nie zaobserwowali wspomnianego zjawiska podczas wyładowania elektrycznego. Obecność pola magnetycznego w strefie obróbki poprawiała efektywność usuwania produktów erozji ze szczeliny, dzięki czemu osiągnięto większą wydajność drażenia bez znaczącej zmiany chropowatości powierzchni.

Podobne badania wpływu hybrydowej obróbki elektroerozyjnej wspomaganiej oddziaływaniem pola magnetycznego w szczelinie międzyelektrodowej przeprowadzili badacze z Helwan University w Egipcie [158] przy obróbce wysokowydajnej stali pancernej elektrodami miedzianymi i grafitowymi. Autorzy zaobserwowali, iż wzrost gęstości strumienia magnetycznego w szczelinie powoduje zmniejszenie MRR w sposób nieliniowy w przypadku elektrod grafitowych. Wynika to z gromadzenia się dużej ilości produktów obróbki w szczelinie przy wysokiej energii wyładowań elektrycznych. Zanieczyszczenia w szczelinie mogą stworzyć ścieżkę przewodzącą prąd elektryczny pomiędzy anodą a katodą i wytworzyć łuk, który uszkodzi powierzchnię przedmiotu oraz elektrody roboczej.

Uhlmann i Domingos [159] dokonali optymalizacji procesu drażenia głębokich otworów w stopie odlewniczym na bazie niklu MAR-M247 z wykorzystaniem drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej. W badaniach zastosowano dwa rodzaje elektrod

grafitowych: EDM-3 i HK-6 firmy Tokai Carbon o wielkości ziarna 3 μm . Wzrost wydajności usuwania materiału z wykorzystaniem drgań ultradźwiękowych był wyraźnie większy dla elektrody EDM-3 niż w przypadku elektrody HK-6. Głównym powodem wysokiego wzrostu wydajności procesu wspomaganego wibracjami ER jest poprawa warunków oczyszczania szczeliny międzyelektrodowej z produktów obróbki. W przypadku obu elektrod względne zużycie objętościowe narzędzia pozostawało stałe podczas drążenia z wibracjami ER oraz bez ich udziału. Wskaźnik zużycia narzędzia był wyższy dla elektrody EDM-3 w porównaniu z HK-6, głównie z powodu większego rozmiaru ziarna elektrody firmy POCO.

Ahmed wraz z zespołem [160, 161] przeprowadził badania eksperymentalne drążenia elektroerozyjnego stopu tytanu Ti-6Al-4V, z biegunowością dodatnią i ujemną, z wykorzystaniem różnych materiałów na elektrody robocze (grafit, aluminium, miedź i mosiądz). Wyniki badań wykazały, iż niezależnie od zastosowanej polaryzacji narzędzia, zwiększenie natężenia prądu i stosunku czasu wyładowania do czasu przerwy zwiększało stopień zużycia prawie wszystkich materiałów na elektrody robocze. Zarówno przy biegunowości dodatniej, jak i ujemnej elektroda miedziana zapewniła minimalne TWR (rys. 2.41a). Autorzy tłumaczą to wysoką gęstością miedzi ($8,9 \text{ g/cm}^3$) oraz przewodnością cieplną (385 W/mK). Wysoka gęstość miedzi oznacza, iż atomy są ciasno upakowane, dlatego do ich usunięcia z powierzchni elektrody potrzebna jest większa energia wyładowania elektrycznego niż w przypadku wykorzystanej w badaniach elektrody grafitowej ($2,3 \text{ g/cm}^3$) lub aluminiowej ($2,7 \text{ g/cm}^3$). Elektroda grafitowa wykazywała najwyższą wydajność usuwania materiału spośród czterech badanych elektrod (rys. 2.41b). Badacze doszli do wniosku, iż optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie elektrody grafitowej z polaryzacją ujemną do obróbki zgrubnej i z polaryzacją dodatnią do obróbki wykończeniowej.



Rys. 2.41. Wpływ materiału elektrody roboczej i natężenia prądu przy polaryzacji odwróconej na: a) wydajność usuwania materiału, b) zużycie elektrody roboczej [160, 161]

Podobne badania zrealizowali naukowcy z Malezji [162], którzy dokonali optymalizacji drążenia Tytanu Ti-6Al-4V elektrodami miedzianymi, mosiężnymi i grafitowymi. Wyniki badań wykazały, iż elektroda grafitowa zapewniła uzyskanie najniższej chropowatości powierzchni oraz mniejszego stopnia zużycia narzędzia niż w przypadku elektrod miedzianych i mosiężnych. Badacze tłumaczą to wysoką temperaturą sublimacji grafitu.

Che Haron i inni [163, 156] zaobserwowali, iż szybkość usuwania materiału w przypadku obróbki stali narzędziowej XW42 jest wyższa dla elektrody grafitowej, natomiast elektroda miedziana uzyskuje niższy stopień zużycia. Podobne zależności zaobserwował Mohanty [164], który wykazał, iż w trakcie elektrodrążenia Inconelu 718 elektrody grafitowe zapewniają najwyższą wydajność usuwania materiału, a następnie miedź, przy jednocześnie wysokiej chropowatości powierzchni po obróbce. Z kolei zespół badaczy z Indii [165] stwierdził, iż elektroda miedziana uzyskuje większą wydajność usuwania materiału przy obróbce stali narzędziowej H13 niż elektroda grafitowa. W przypadku wykończenia powierzchni przedmiotu elektroda grafitowa zapewnia uzyskanie niższych parametrów chropowatości niż elektroda miedziana. Badacze doszli do wniosku, iż elektrodę miedzianą można stosować do obróbki zgrubnej, a grafitową do wykończenia powierzchni. Świercz [166] natomiast wykazał, iż przy obróbce stali WNL nie zaobserwowano wyraźnych różnic w stanie WW oraz wydajności procesu stosując elektrodę miedzianą lub grafitową EDM-3.

Soundhar [167] przeprowadził optymalizację parametrów obróbki EDM stopu stosowanego w implantach ortopedycznych: Ti-13Nb-13Zr. W trakcie badań zastosował grafitową elektrodę roboczą z polaryzacją odwróconą. Autor wykazał, iż wydłużenie czasu wyładowania oraz czasu przerwy między impulsami powoduje zwiększenie wydajności procesu. Na zużycie elektrody roboczej znaczący wpływ miał czas wyładowania i czas przerwy oraz natężenie prądu. Chropowatość powierzchni po obróbce była tym większa im wyższe były wartości natężenia prądu i czasu wyładowania. Czas przerwy między impulsami miał pomijalny wpływ na tworzenie się chropowatości na powierzchni PO.

2.7. Warstwa wierzchnia

Stan warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej jest jednym z podstawowych zagadnień implementacji tej technologii w wytwarzaniu gniazd form wtryskowych, specjalistycznych części w przemyśle lotniczym, kosmicznym, energetycznym, nuklearnym, a także medycznym. Współczesne badania procesu EDM są skoncentrowane nad optymalizacją parametrów

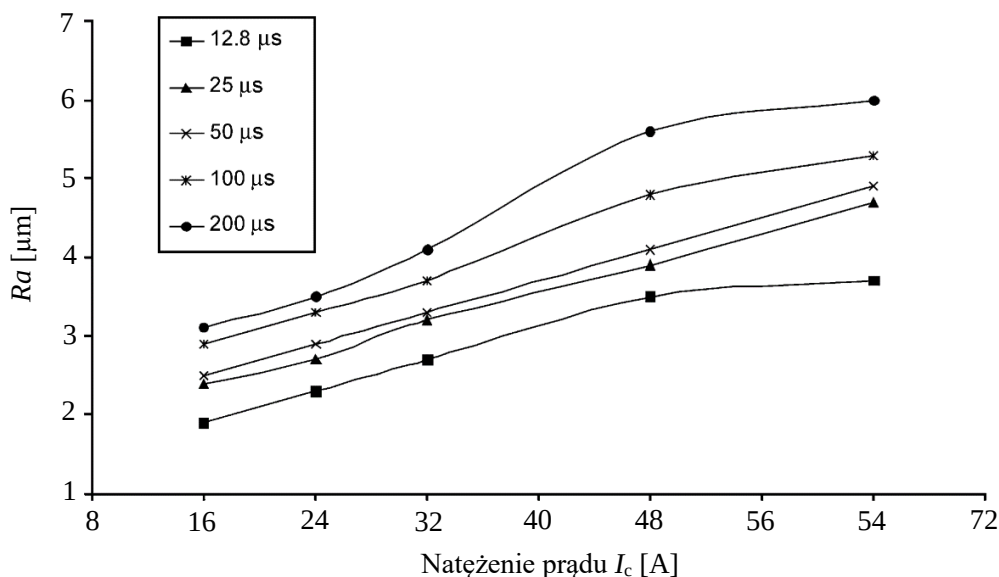
obróbki, które zapewnią odpowiednią jakość wykończenia powierzchni, grubość warstw przekształconych w taki sposób, aby zredukować do niezbędnego minimum udział dodatkowych obróbek wykończeniowych w wytwarzaniu poszczególnych części [168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175].

Struktura geometryczna powierzchni po obróbce elektroerozyjnej posiada izotropowy charakter i konstytuowana jest w wyniku nakładania się śladów pojedynczych wyładowań elektrycznych. Kształt oraz głębokość poszczególnych kraterów są skorelowane z charakterem impulsów elektrycznych. Główne parametry obróbki, które determinują wymiary krateru to: natężenie prądu, napięcie wyładowania, czas wyładowania oraz czas przerwy. Wzrost natężenia prądu powoduje zwiększenie objętości erodowanego materiału w trakcie pojedynczego wyładowania elektrycznego. Czas wyładowania odpowiada za ilość energii cieplnej dostarczonej do materiału obrabianego i również w istotny sposób wpływa na objętość usuniętego materiału. Długie czasy wyładowania powodują zwiększenie średnicy i głębokości krateru oraz absorpcję większej ilości energii cieplnej przez obrabiany element, co skutkuje wzrostem głębokości warstw przekształconych [65, 148, 176, 177, 178, 179, 180, 181].

Wielu autorów [168, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192] stwierdziło, iż natężenie prądu jest głównym czynnikiem determinującym chropowatość powierzchni – parametr Ra .

Torres [147] wraz z zespołem stwierdzili, iż natężenie prądu i czas wyładowania są dominującymi czynnikami wpływającymi na chropowatość powierzchni (parametr Ra , Rt i Pc), zarówno przy polaryzacji dodatniej, jak i ujemnej. Wzrost natężenia prądu prowadzi do generowania głębszych kraterów o większych średnicach. Dastagiri i Kumar [193] w swoich badaniach wykazali, iż czas wyładowania elektrycznego ma istotny wpływ na głębokość i promień krateru. Głębokość krateru wzrasta wraz z czasem impulsu, a przy bardzo długim czasie wyładowania zaczyna się zmniejszać. Z kolei promień krateru powiększa się wraz z czasem impulsu ze względu na zwiększenie średnicy kanału plazmowego. Podobną zależność zaobserwował także Williams [194]. Guu i Hou [195, 196] natomiast wskazują, że przy mniejszych wartościach natężenia prądu, decydującym czynnikiem wpływającym na parametr Ra jest czas impulsu. Tomadi [197] wraz z zespołem wykazał, iż głównym czynnikiem wpływającym na chropowatość powierzchni (Ra) jest napięcie wyładowania, a następnie czas przerwy między impulsami. Natężenie prądu wyładowania i czas impulsu według autorów nie odgrywają znaczącej roli w kształtowaniu topografii powierzchni po obróbce. Keskin [198] w swojej pracy zwrócił uwagę na wysoką korelację parametru chropowatości Ra z mocą wyładowania elektrycznego. Wraz ze wzrostem mocy wyładowania generowana jest

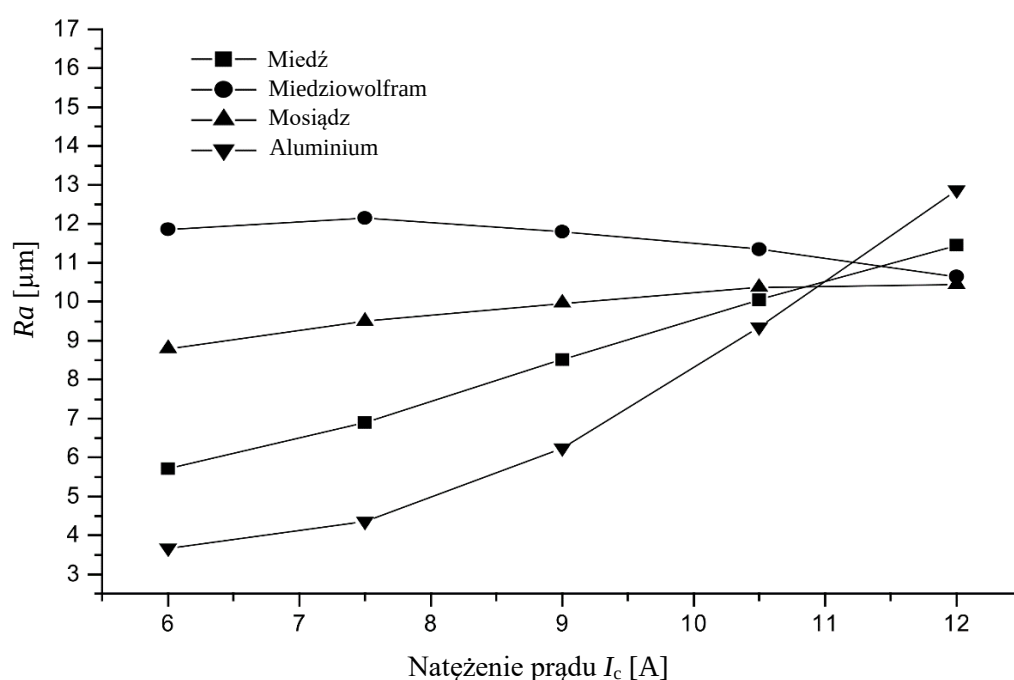
większa chropowatość powierzchni. Sundaram [157] podkreślił, iż chropowatość powierzchni po obróbce elektroerozyjnej jest uzależniona od rozmiaru i kształtu krateru. Promień krateru jest wprost proporcjonalny do prądu wyładowania, a odwrotnie proporcjonalny do rezystancji narzędzia, dlatego elektrody o wyższej rezystancji generują mniejsze kratery. Vikas [199] stwierdził, iż natężenie prądu jest dominującym czynnikiem w tworzeniu chropowatości powierzchni. Wpływ pozostałych parametrów, czasu wyładowania i przerwy oraz napięcia, jest pomijalnie mały. Guo [200] w swojej publikacji wykazał, iż wartość parametru Ra rośnie wraz ze wzrostem natężenia prądu, czasu wyładowania oraz ciśnienia przepływu dielektryka przez szczelinę. Lee [201] zaobserwował, że chropowatość powierzchni stale wzrasta wraz z wydłużeniem czasu wyładowania elektrycznego (rys. 2.42). Chikalthankar [202] wykazał, iż w celu uzyskania gładkiej powierzchni należy stosować niskie natężenie prądu i napięcie w szczelinie oraz krótki czas impulsu. Świercz i Papazoglou [166, 203] w swoich badaniach wykazali między innymi, iż parametry wysokościowe chropowatości są uzależnione w głównej mierze od energii wyładowania elektrycznego. Autorzy [204, 205, 206] stwierdzili, iż dodatek proszków przewodzących prąd elektryczny w dielektryku wpływa na zmniejszenie chropowatości powierzchni.



Rys. 2.42. Wpływ natężenia prądu oraz czasu wyładowania elektrycznego na wartość parametru Ra [201]

Dotychczasowe publikacje naukowe skupiają się przede wszystkim na określeniu wpływu parametrów elektrycznych na jakość wykończenia powierzchni przedmiotu. Badania doświadczalne wskazują, iż parametry obróbki (natężenie prądu, napięcie elektryczne, czas

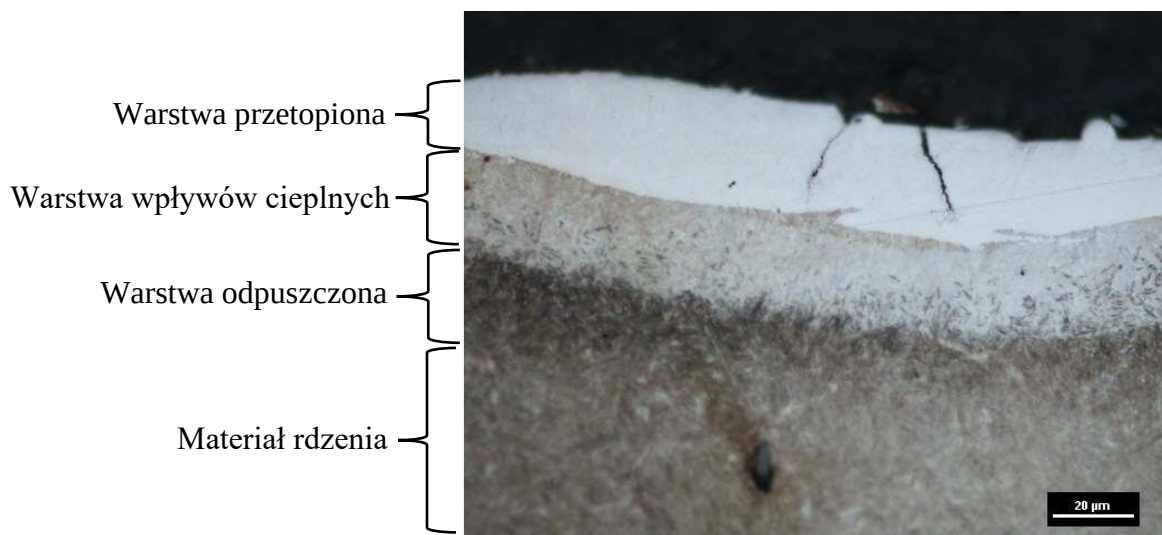
wyładowania oraz czas przerwy między impulsami) w różny sposób wpływają na stan WW. Obecne wymagania związane z wysoką dokładnością oraz jakością wykończenia powierzchni przedmiotu po procesie EDM stwarzają potrzebę zbadania wpływu materiału elektrod na zminimalizowanie defektów strukturalnych oraz chropowatości powierzchni po obróbce elektroerozyjnej w celu całkowitego wyeliminowania lub ograniczenia do niezbędnego minimum dodatkowych operacji wykończeniowych [182]. Niektórzy autorzy [115, 157] wykazują, że parametry SGP zależą w dużym stopniu od parametrów elektrycznych, ale również od materiału elektrody roboczej, przy ustalonych pozostałych warunkach obróbki (rys. 2.43).



Rys. 2.43. Wpływ materiału elektrody oraz natężenia prądu na wartość parametru R_a [115]

W wyniku oddziaływania lokalnych procesów termicznych w trakcie obróbki elektroerozyjnej konstituowane są trzy charakterystyczne warstwy w strukturze metalograficznej (rys. 2.44) [207, 208]:

- przetopiona (zwana potocznie warstwą białą),
- strefa wpływów cieplnych (HAZ – *Heat Affected Zone*),
- odpuszczona, w postaci ciemnej smugi.

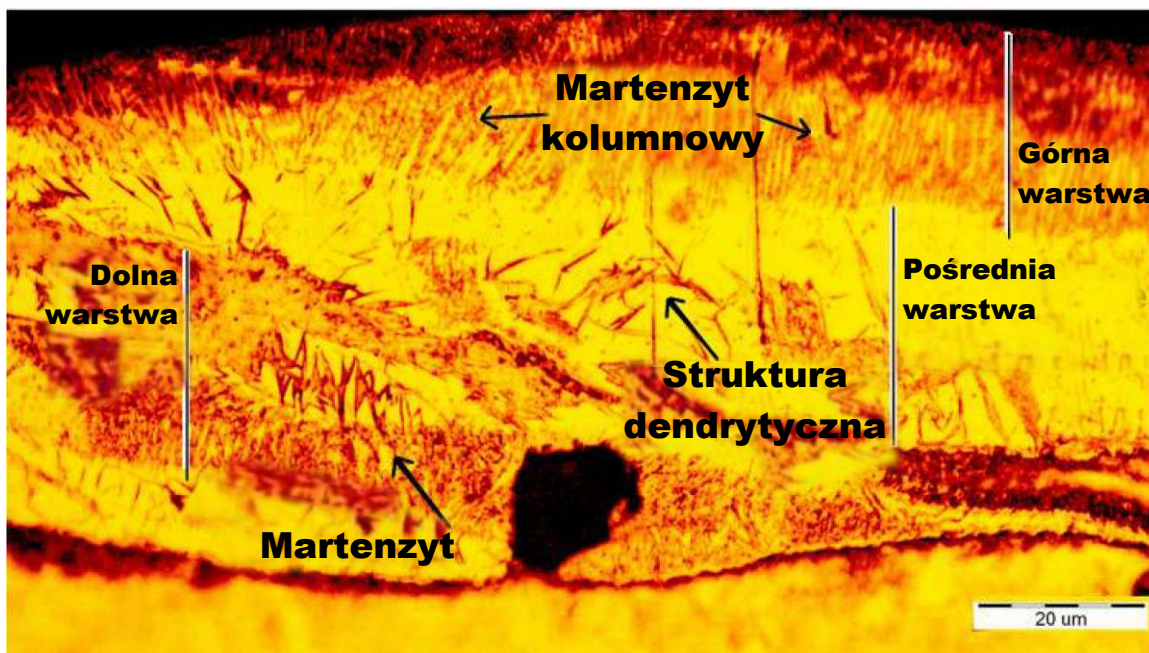


Rys. 2.44. Mikrostruktura powierzchni po obróbce elektroerozyjnej [209]

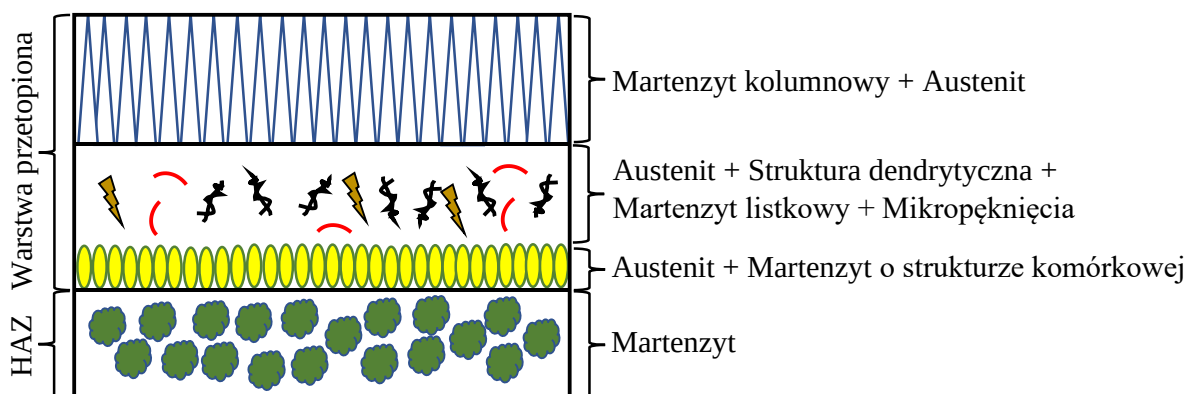
W warstwie przetopionej można wyróżnić trzy podwarstwy (rys. 2.45). Pierwsza z nich stanowi górny poziom warstwy przetopionej i składa się z kolumnowego martenzytu o strukturze równoosiowej igły. Cienka i wydłużona struktura powstała w wyniku szybkiego chłodzenia przez ciecz dielektryczną z prędkością około 10^6 K/s. Przenikanie ciepła pomiędzy górną częścią warstwy przetopionej a dielektrykiem odbywa się w sposób konwekcyjny. Kolumnowy martenzyt propaguje prostopadle do powierzchni, ponieważ sieć krystaliczna martenzytu orientuje się w kierunku prędkości chłodzenia [210].

Druga podwarstwa stanowi poziom pośredni pomiędzy górną i dolną podwarstwą warstwy przetopionej. Szybkość chłodzenia w tej warstwie jest niższa niż w przydatku górnego i dolnego odcinka. Główną fazę stanowi austenit szczątkowy. Dyfuzja atomów węgla z materiału rodzimego oraz rozkładu dielektryka (nafty) do roztopionego materiału, w trakcie prosu rekrytalizacji, zwiększa udział austenitu szczątkowego. W warstwie pośredniej można zaobserwować zazębiające się struktury dendrytyczne, które ze względu na niską prędkość chłodzenia mogą być martenzytem listkowym lub bainitem. Warstwa pośrednia jest źródłem mikropęknięć w warstwie przetopionej [210].

Trzecia podwarstwa stanowi dolny poziom warstwy przetopionej i składa się z martenzytu o strukturze komórkowej i austenitu szczątkowego. Mechanizm wymiany ciepła pomiędzy dolną warstwą a materiałem rdzenia odbywa się na drodze kondukcji. Szybkość chłodzenia w warstwie dolnej jest wyższa w porównaniu z warstwą pośrednią, dlatego struktura martenzytyczna jest bardziej zauważalna. Struktura martenzytu orientuje się w sposób prostopadły do warstwy HAZ, w kierunku prędkości chłodzenia. Na rys. 2.46 przedstawiono schematycznie mikrostrukturę warstwy przetopionej oraz HAZ [210].

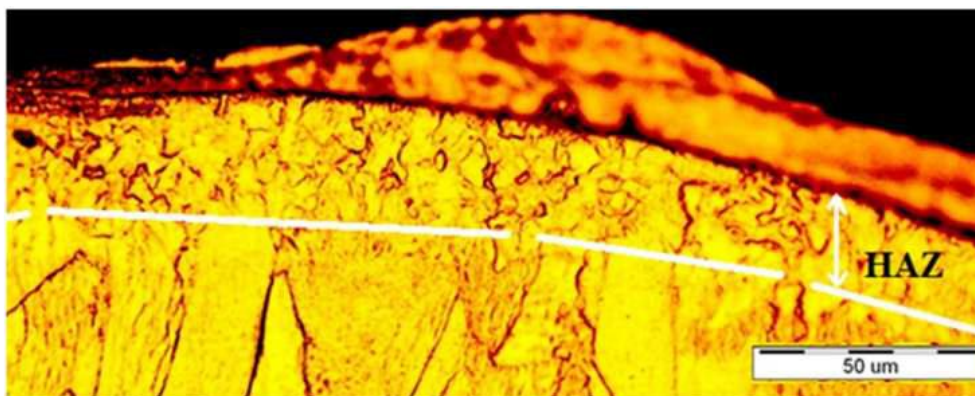


Rys. 2.45. Mikrostruktura warstwy przetopionej [210]



Rys. 2.46. Schematyczna reprezentacja mikrostruktury warstwy przetopionej [210]

Strefa wpływów cieplnych (warstwa HAZ) znajduje się bezpośrednio pod warstwą przetopioną i zbudowana jest głównie z martenzytu listkowego. W bezpośrednim sąsiedztwie warstwy przetopionej występuje strefa austenitu szczątkowego, której grubość zawiera się w przedziale od 0,5 do 5 μm (w zależności od zastosowanych parametrów elektrycznych). Wielkość ziaren w warstwie wpływów cieplnych jest większa niż w warstwie przetopionej. Wynika to z niskiej prędkości chłodzenia strefy HAZ, która wydłuża czas wzrostu ziaren i hartowania. Na rys. 2.47 przedstawiono przykładową mikrostrukturę warstwy przetopionej i strefy wpływów cieplnych [210].

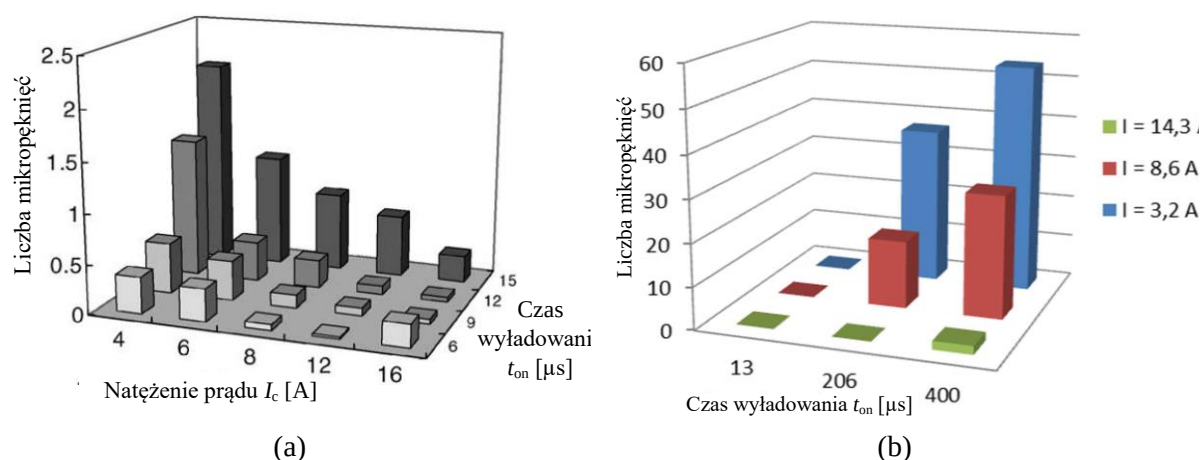


Rys. 2.47. Mikrostruktura warstwy przetopionej i strefy wpływów cieplnych [210]

Usuwanie materiału w obróbce elektroerozyjnej związane jest z oddziaływaniem energii cieplnej wyładowania elektrycznego, która prowadzi do zmiany struktury metalograficznej oraz powstawania defektów – mikropęknięć. Kierunek i głębokość penetracji mikropęknięć oraz ich gęstość zależą od warunków obróbki i właściwości przedmiotu obrabianego, a także materiału elektrody roboczej. W większości przypadków mikropęknięcia propagują prostopadle do obrabianej powierzchni. Najbardziej zauważalne jest mikropęknięcie w kierunku równoległym, ponieważ zazwyczaj cały odcinek warstwy przetopionej powyżej pęknięcia może zostać oderwany od materiału rdzenia [210]. Według autorów [133, 211] natężenie prądu wyładowania wpływa na gęstość mikropęknięć, podczas gdy czas wyładowania elektrycznego determinuje głębokość penetracji mikropęknięć.

Badacze [212, 213, 214] stwierdzili, że istnieje silna zależność pomiędzy defektami mikrostrukturalnymi (mikropęknięciami) oraz grubością warstwy przetopionej. Głównym czynnikiem determinującym grubość warstwy przetopionej i strefy wpływu ciepła jest energia wyładowania elektrycznego. Wzrost natężenia prądu oraz skrócenie czasu wyładowania powoduje wzrost grubości warstwy przetopionej oraz zmniejszenie gęstości mikropęknięć (rys. 2.48). Świercz [191] wykazał, iż średnia grubość warstwy białej zależy od ilości energii cieplnej dostarczonej do przedmiotu obrabianego. Guu [195] natomiast wskazuje, iż czas wyładowania elektrycznego jest dominującym czynnikiem wpływającym na gęstość mikropęknięć w WW. Lee [215] w swoich badaniach udowodnił, iż wyładowania elektryczne nie wpływają na zmianę mikrostruktury materiału rdzenia, znajdującego się pod trzema charakterystycznymi warstwami. Naukowcy [216, 217, 218] stwierdzili, iż rodzaj zastosowanego dielektryka wpływa na gęstość oraz szerokość mikropęknięć. Dwivedi [219] wykazał, iż zastosowanie obrotów elektrody roboczej powoduje zmniejszenie grubości warstwy przetopionej oraz liczby mikropęknięć. Younis [220] zauważyła, iż większa zawartość

węgla w materiale zwiększa gęstość mikropęknięć, a naprężenia resztkowe w warstwie przetopionej są mniejsze w warunkach obróbki zgrubnej. Rajendran [221] stwierdził, iż powstawanie mikropęknięć ma związek przede wszystkim z właściwościami materiału rodzimego, zużyciem elektrody roboczej i grubością warstwy przetopionej. Autorzy [222] zwrócili uwagę, iż gęstość mikropęknięć można zminimalizować zmniejszając natężenie prądu i skracając czas wyładowania elektrycznego. Chen wraz z zespołem [223] udowodnił, iż rodzaj zastosowanego materiału elektrody roboczej ma istotny wpływ na konstytuowanie się warstwy przetopionej oraz propagację mikropęknięć.



Rys. 2.48. Zależność mikropęknięć w warstwie przetopionej od natężenia prądu oraz czasu wyładowania elektrycznego dla stali: a) D2 (1.2379), b) WNL (1.2717) zahartowanej do 52 HRC [213, 214]

Zespół naukowców [224, 225] wykazał, iż proces nawęglania warstwy przetopionej zachodzi przy obróbce elementów stalowych w dielektryku węglowodorowym, natomiast w przypadku wody dejonizowanej obserwuje się odwrotne zjawisko – odwęglanie warstwy przetopionej. Nawęglanie następuje z powodu termicznego rozkładu węgla znajdującego się w oleju węglowodorowym, który następnie zostaje związany w warstwie przetopionej w trakcie procesu rekrytalizacji. Wzrost zawartości węgla w warstwie przetopionej może zwiększyć mikrotwardość [224]. Zjawisko odwęglania polega na spadku zawartości węgla w warstwie przetopionej z powodu wiązania węgla (ze stali) z wodorem i tlenem w wodzie [70]. Kruth [224] zauważył, iż przy obróbce stali C35 w oleju węglowodorowym warstwa przetopiona zawierała około cztery razy więcej węgla niż materiał podstawowy. Podczas obróbki w wodzie dejonizowanej w warstwie przetopionej stwierdzono zmniejszenie o prawie 50% zawartości węgla w odniesieniu do materiału rdzenia.

3. CEL I ZAKRES PRACY

3.1. Uzasadnienie podjęcia pracy

Z przeprowadzonego przeglądu literatury wynika, iż proces obróbki elektroerozyjnej elektrodami grafitowymi ma złożony charakter. Ma to bezpośredni związek z szeregiem zjawisk fizycznych zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej, które są uzależnione m.in. od parametrów elektrycznych oraz mechanizmu zużycia elektrod grafitowych. Autorzy w wielu publikacjach naukowych koncentrują się głównie na analizie wpływu wybranych parametrów elektrycznych na efekty obróbki, wykorzystując w tym celu jedną elektrodę grafitową o określonej wielkości ziarna i nie porównują uzyskanych wyników z grafitem o innej granulacji. Najczęściej porównanie grafitu ogranicza się do jego zestawienia z elektrodami miedzianymi lub grafitowymi impregnowanymi miedzią. W większości publikacji naukowcy porównują grafity konwencjonalne o wysokiej anizotropowości. Dodatkowo autorzy rzadko, przy analizie uzyskanych wyników badań, uwzględniają inne właściwości fizyczne elektrod grafitowych na efekty obróbki, takie jak: gęstość pozorną, przewodność elektryczna lub porowatość.

W dostępnych publikacjach naukowych nie analizuje się kompleksowego wpływu właściwości fizycznych i wielkości ziarna elektrod grafitowych o wysokiej izotropowości, a także parametrów elektrycznych na wskaźniki technologiczne i stan warstwy wierzchniej po obróbce EDM. Przy analizie struktury geometrycznej powierzchni autorzy ograniczają się głównie do parametru Ra , nie uwzględniając parametrów powierzchniowych chropowatości. Uzyskane tym samym informacje nie umożliwiają szczegółowej analizy złożoności tekstury powierzchni. Aktualne badania nie zawierają również analizy wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych na właściwości tribologiczne warstwy wierzchniej, które są bardzo istotnymi parametrami określającymi funkcje użytkowe elementów maszyn wykonanych metodą obróbki EDM.

W przytoczonych publikacjach naukowych badacze nie uwzględniają monitorowania rzeczywistych charakterystyk prądowo-napięciowych w trakcie obróbki elektroerozyjnej elektrodami grafitowymi, bazując wyłącznie na wartościach nastawianych. Na podstawie wstępnych badań własnych autora wynika, iż istnieją wyraźne różnice w wartościach parametrów elektrycznych nastawionych na obrabiarce w stosunku do rzeczywistych wartości zmierzonych. Zjawiska fizyczne mające miejsce w szczelinie mogą wprowadzać istotne zmiany w charakterze pojedynczego wyładowania elektrycznego, z uwagi na złożony charakter zużycia

elektrod grafitowych. Dotychczasowe badania naukowe wskazują, iż w sektorach przemysłu produkcyjnego, z przyczyn ekonomicznych oraz technologicznych, powszechnie obserwowane jest sukcesywne zastępowanie elektrod miedzianych na grafitowe. Ich racjonalna implementacja w obróbce materiałów trudnoobrabialnych wymaga opracowania adekwatnej strategii obróbkowej umożliwiającej osiągnięcie pożądanej jakości wykończenia powierzchni, przy jednoczesnym zapewnieniu niskiego wskaźnika zużycia narzędzia i wysokiej wydajności procesu. Na podstawie szczegółowej analizy literatury stwierdzono, iż brak jest szczegółowych badań wpływu parametrów EDM na stan warstwy wierzchniej stopu Hastelloy C-22 z wykorzystaniem elektrod grafitowych S-180 i AF-5 firmy POCO. Tematyka rozprawy doktorskiej charakteryzuje się nowym podejściem do zagadnienia konstytuowania się warstwy wierzchniej stopu Hastelloy C-22 przez elektrody grafitowe w obróbce EDM w stosunku do obecnie wysoko stawianym wymaganiom jakości wykończenia powierzchni przedmiotu. Opracowane statystyczne modele matematyczne opisujące wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych oraz parametrów elektrycznych na wskaźniki technologiczne oraz stan warstwy wierzchniej mogą zostać wykorzystane jako wytyczne do doboru odpowiednich parametrów w projektowaniu technologii obróbki EDM. Uzyskane wyniki badań doświadczalnych poddane optymalizacji wielokryterialnej mogą zostać uogólnione i zaadoptowane we współczesnych drążarkach elektroerozyjnych.

3.2. Cel pracy

Celem pracy jest wyznaczenie wpływu parametrów elektrycznych oraz wielkości ziarna elektrod grafitowych o wysokiej izotropowości (AF-5 i S-180) na wydajność objętościową drążenia elektroerozyjnego, względne zużycie elektrody roboczej i wynikowy stan warstwy wierzchniej, oraz wyznaczenie statystycznych modeli matematycznych umożliwiających dobór odpowiednich warunków obróbki w zależności od oczekiwanych wskaźników technologicznych procesu drążenia i jakości wykończenia powierzchni przedmiotu.

Szczegółowe cele rozprawy:

- określenie wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych, polaryzacji elektrod oraz charakteru impulsów natężenia prądu, czasu wyładowania elektrycznego i czasu przerwy między impulsami na wskaźniki technologiczne procesu elektroerozji,

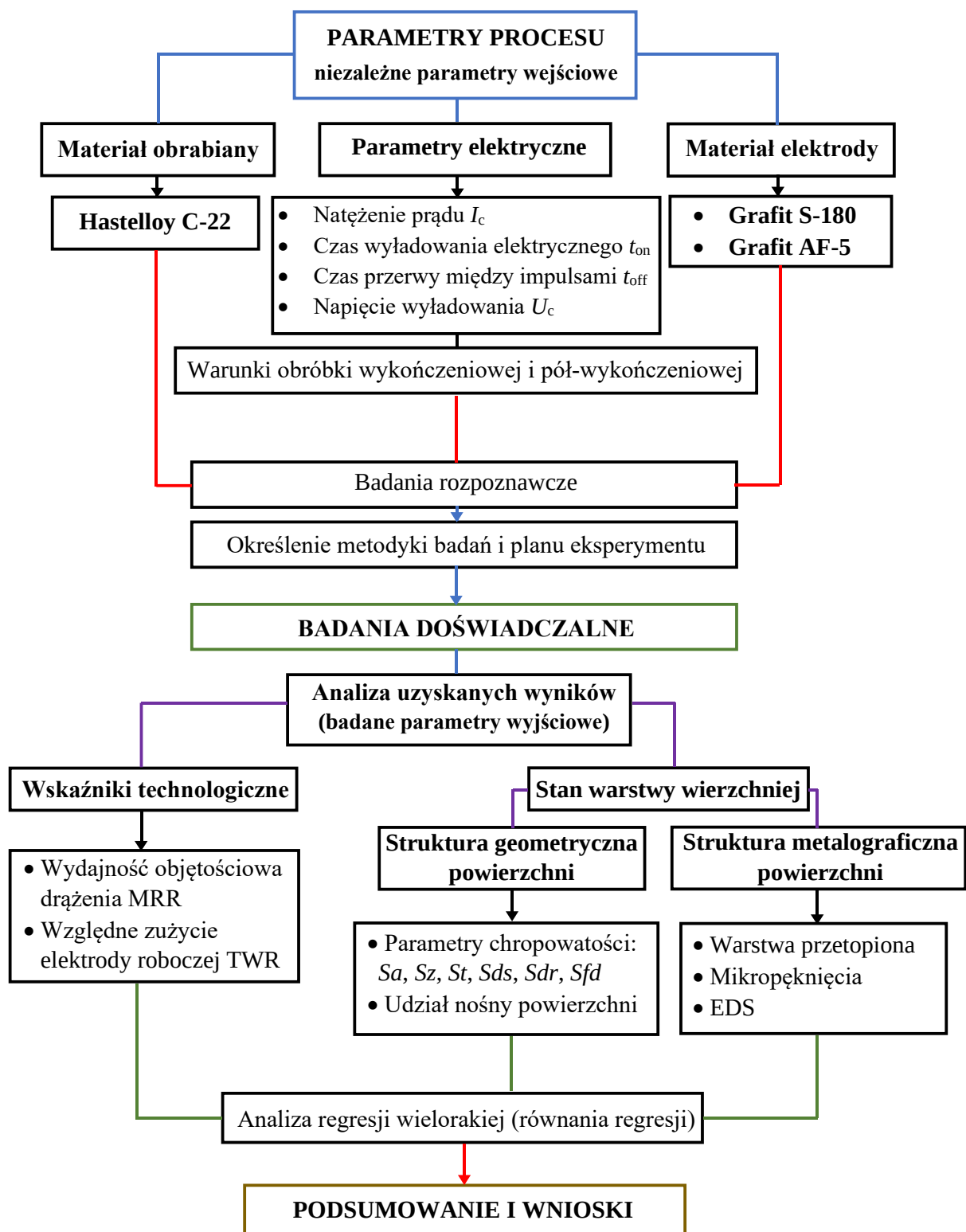
- wyznaczenie wpływu wielkości ziarna oraz parametrów elektrycznych na wynikowy stan warstwy wierzchniej powierzchni po obróbce elektroerozyjnej.

3.3. Zakres pracy

Rozprawa doktorska w swoim zakresie obejmuje:

- wyznaczenie rzeczywistych charakterystyk prądowo-napięciowych generatora drążarki,
- przeprowadzenie wstępnych badań rozpoznawczych w celu ustalenia zakresu zmienności stabilnych parametrów obróbki,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych wpływu właściwości fizycznych oraz wielkości ziarna elektrod grafitowych oraz parametrów elektrycznych i polaryzacji elektrod na wskaźniki technologiczne, takie jak: objętościową wydajność usuwania materiału oraz względne zużycie elektrody roboczej,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych oraz charakteru impulsów elektrycznych i polaryzacji narzędzia na stan struktury geometrycznej powierzchni po obróbce,
- przeprowadzenie badań składu chemicznego powierzchni elektrod i przedmiotu po obróbce elektroerozyjnej,
- analiza wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych i parametrów elektrycznych na właściwości tribologiczne warstwy wierzchniej,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych oraz charakteru impulsów elektrycznych na stan struktury metalograficznej,
- określenie charakterystyki defektów mikrostrukturalnych warstwy wierzchniej,
- opracowanie na podstawie uzyskanych wyników badań doświadczalnych statystycznych modeli matematycznych opisujących wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych oraz charakteru impulsów elektrycznych i polaryzacji narzędzia na stan struktury geometrycznej i metalograficznej powierzchni oraz względne zużycie elektrody roboczej i wydajność procesu.

Metodyka badań doświadczalnych realizowanych w ramach rozprawy została podsumowana i graficznie zilustrowana na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Metodologia eksperymentu planowanego

3.4. Przedmiot badań

Badaniom eksperymentalnym poddano próbki ze stopu Hastelloy C-22. Zdecydowano się na ten rodzaj materiału ze względu na trudność jego obróbki konwencjonalnymi metodami wytwarzania oraz szeroki zakres zastosowań w przemyśle. Dotychczasowe badania naukowe nie zawierają wyników opracowanej technologii obróbki EDM stopu Hastelloy C-22 z wykorzystaniem elektrod grafitowych o wysokiej izotropowości. Skład chemiczny stopu podano w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Skład chemiczny stopu Hastelloy C-22 (2.4602)

Skład chemiczny [%]							
Ni	Cr	Mo	Fe	W	Co	Mn	C
50.0-63.0	20.0-22.5	12.5-14.5	2.0-6.0	2.5-3.5	2.5 max	0.5 max	0.015 max

Stop Hastelloy C-22 dzięki wysokiej zawartości chromu, molibdenu i wolframu charakteryzuje się wysoką odpornością na utlenianie oraz korozję szczelinową i naprężeniową (pęknienia). Jest szczególnie odporny na wżery wywołane chlorkami. Posiada wysoką odporność na kwas siarkowy, solny i octowy, chlor gazowy, wodę morską i solanki oraz wiele innych roztworów chemicznych organicznych i nieorganicznych, które stwarzają agresywne środowisko pracy. W podwyższonych temperaturach wysoka zawartość chromu skutecznie przeciwdziała utlenianiu i nawęglaniu. Stop może być wykorzystywany jako materiał do pracy w wysokich temperaturach w silnie korozyjnych warunkach o wysokiej zawartości kwasów mineralnych lub innych roztworów chemicznych, m.in. w reaktorach do produkcji kwasu octowego, wymiennikach ciepła, kolumnach, systemach odprowadzania spalin z utylizowanych odpadów, rurach transportujących roztwory chemiczne i innych urządzeniach w przemyśle przetwórstwa chemicznego, petrochemicznego, farmaceutycznego, energetycznego oraz celulozowo-papierniczego. Charakteryzuje się bardzo dobrą spawalnością oraz może być formowany na zimno. Stop jest trudnoobrabialny konwencjonalnymi metodami obróbki. W trakcie skrawania generowana jest wysoka temperatura w strefie obróbki powodująca wzrost twardości materiału i szybkie zużycie narzędzia skrawającego. Wybrane właściwości fizyczne stopu Hastelloy C-22 zawarto w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Właściwości fizyczne stopu Hastelloy C-22 (2.4602)

Gęstość [g/cm ³]	8,61
Zakres temperatury topnienia [°C]	1351-1387
Ciepło właściwe [J/kg·°C]	381
Rezystancja [μΩm]	1,215
Moduł Younga (dynamiczny) [GPa]	209
Współczynnik rozszerzalności (21-193°C) [μm/m°C]	12,42

Podstawowym celem badań jest określenie wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych o wysokiej izotropowości na wskaźniki technologiczne procesu EDM oraz wynikowy stan warstwy wierzchniej, przy ustalonych pozostałych warunkach obróbki. Zdecydowano się na użycie dwóch elektrod grafitowych firmy POCO: AF-5 oraz S-180. Z katalogu firmy POCO wybrane materiały grafitowe posiadają skrajnie różne wielkości ziaren. Grafit AF-5 posiada wielkość ziarna poniżej 1 μm, natomiast grafit S-180 wyróżnia się 10-krotnie większym rozmiarem cząstek. Wykorzystanie powyższych materiałów w badaniach eksperymentalnych pozwoli na kompleksowe porównanie wpływu wielkości ziarna dwóch elektrod grafitowych o różnej granulacji na jakościowe efekty obróbki elektroerozyjnej stopu Hastelloy C-22. Dokładna specyfikacja właściwości fizycznych oraz mechanicznych powyższych grafitów została zawarta w tabeli 2.2 w podrozdziale 2.6.1.

Na podstawie analizy zdjęć mikroobszarów przełomów badanych elektrod na mikroskopie skaningowym zaobserwowano wyraźną porowatość pomiędzy ziarnami grafitu (rys. 3.2 – 3.5). W przypadku grafitu S-180 pory są zdecydowanie większe i bardziej nieregularne niż w graficie AF-5. Średnia wielkość cząstek grafitu AF-5 nie przekraczała wartości 1 μm. W przypadku grafitu S-180 wielkość ziaren jest zdecydowanie większa i wynosi około 10 μm. Dokładne obserwacje mikroskopowe wskazują ponadto, iż w obrębie obserwowanych ziaren grafitu S-180 występują liczne mikropory o wielkości wyraźnie powyżej 1 μm. W graficie AF-5 obecność tak dużych porów jest znikoma. Wstępne obserwacje mikrostruktury ziaren grafitów potwierdzają specyfikację zawartą przez producenta.

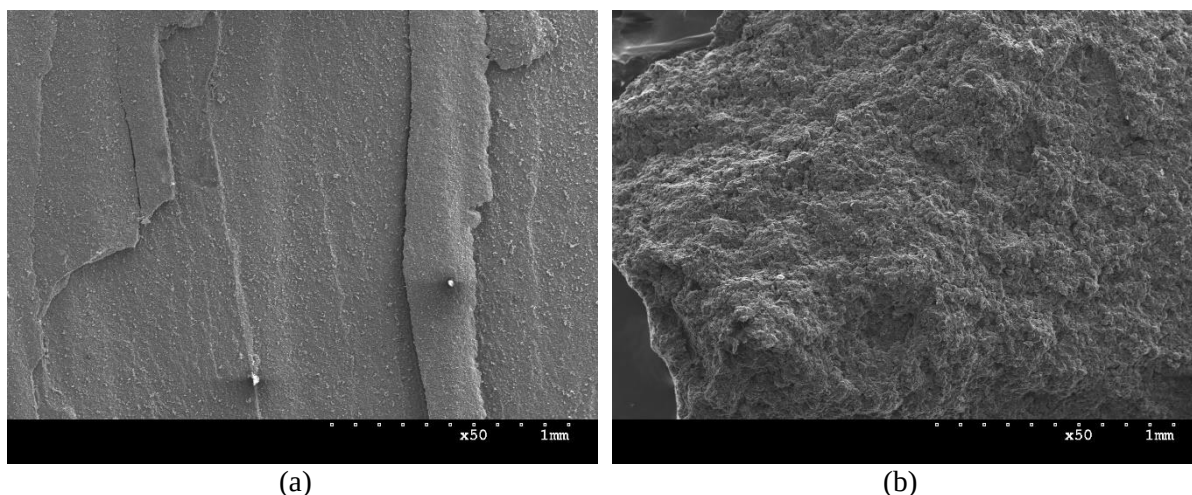
Obserwacje mikroskopowe dowodzą o istotnych różnicach w porowatości obu materiałów, a także gęstości pozornej. W celu weryfikacji tych różnic przeprowadzono badania gęstości badanych grafitów trzema różnymi metodami: piknometru helowego, ważenia hydrostatycznego oraz porozymetrii rtęciowej.

W pierwszej metodzie gęstość materiału została wyznaczona przy użyciu piknometru helowego UltraPycnometer 1000 firmy Quantachrome Instruments. Metoda ta wykorzystuje

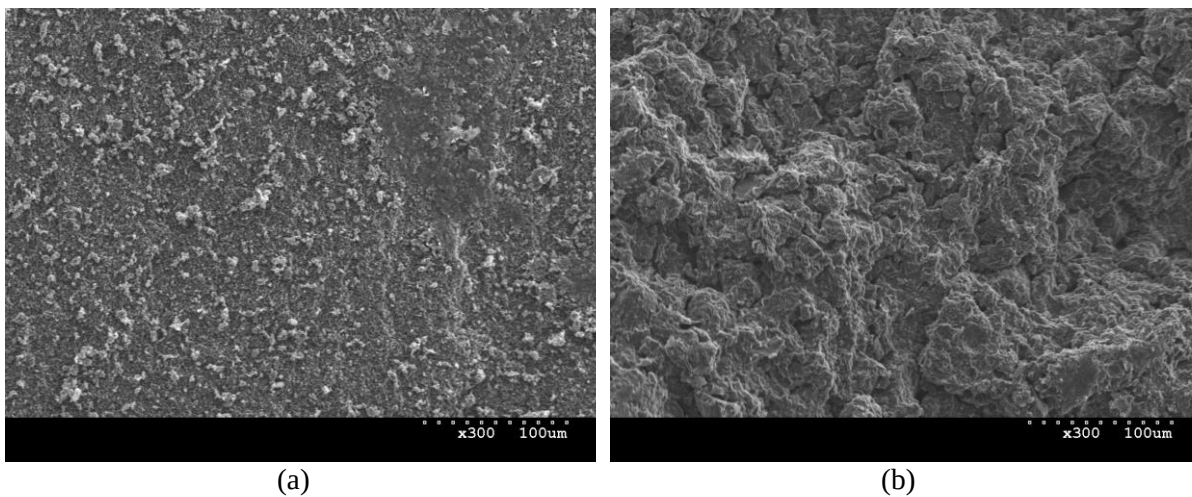
prawo Archimiedesa oraz prawo Boyle'a, które opisują zachowanie się gazu doskonałego w przemianie izotermicznej. Za wykorzystanie helu jako gazu przemawia fakt, iż jest on obojętny chemicznie oraz posiada mały promień atomowy, co zapewnia penetrację w pory o wielkości nawet 25 nm. Sam pomiar sprowadza się do wyznaczenia objętości badanej próbki, a następnie jej gęstości pozornej na podstawie zmierzonej masy.

Badanie gęstości metodą ważenia hydrostatycznego polega na określeniu objętości próbki w wyniku pomiaru różnicy jej masy w powietrzu i cieczy. Na podstawie zmierzonej masy suchej próbki oraz nasyconej wodą, a także masy samej cieczy, możliwe staje się wyznaczenie gęstości pozornej oraz porowatości grafitu.

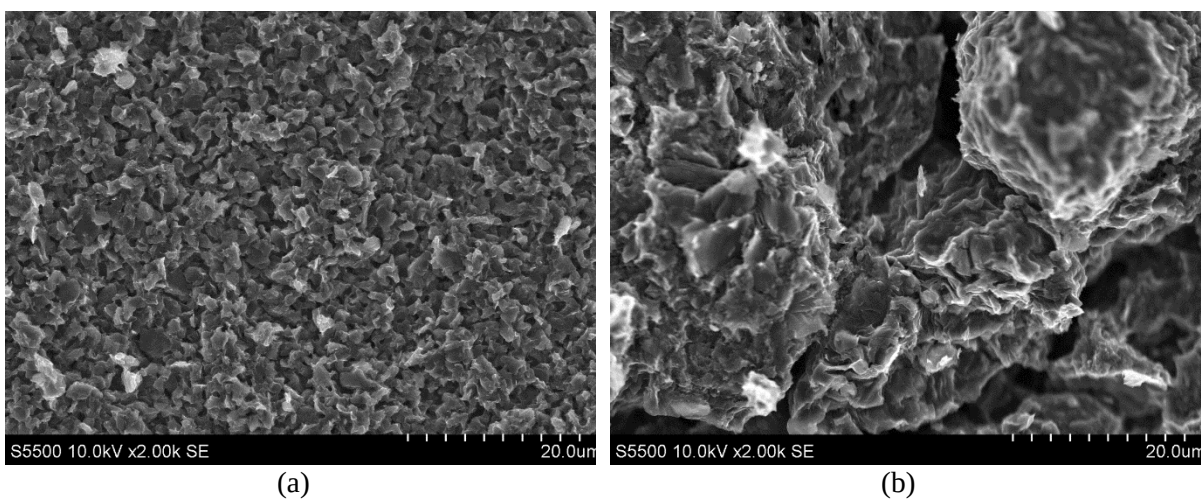
Badanie gęstości pozornej oraz porowatości metodą porozymetrii rtęciowej polega na monitorowaniu objętości rtęci wchodzącej do porów w próbce, na skutek działania wysokiego ciśnienia w zamkniętym pojemniku. Przeprowadzono standardowe badania intruzji w zakresie ciśnienia od 0,0007 do 414 MPa, które umożliwiają badanie porów o średnicy do około 0,003 μm . Objętość rtęci, która wnika do próbki, w wyniku wzrostu ciśnienia, jest równa objętości porów w powiązonym zakresie rozmiarów zgodnie z równaniem Washburna. Dla określonego rodzaju materiału powinna wystąpić odwrotnie proporcjonalna zależność pomiędzy wielkością porów a ciśnieniem potrzebnym do ich wypełnienia przez rtęć. Na podstawie badań wyznacza się charakterystyczne wielkości definiujące porowatość, takie jak: całkowita objętość intruzji [ml/g], całkowita powierzchnia porów [m^2/g] oraz przedstawienia rozkładu porów w preparatach jako ilość intruzji przypadająca na określoną frakcję porów.



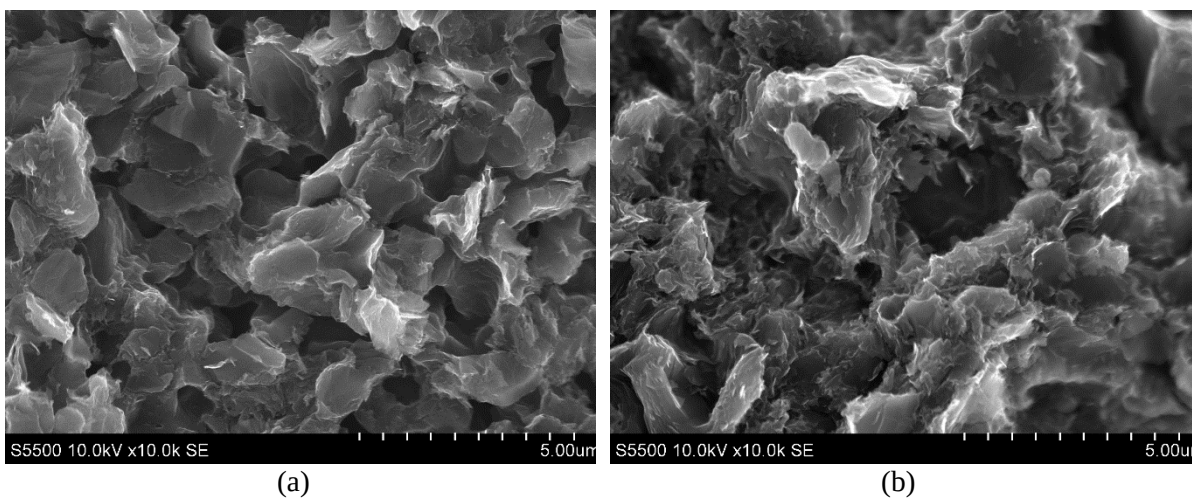
Rys. 3.2. Mikrostruktura przełomu grafitu przy powiększeniu x50 dla próbek: a) AF-5, b) S-180



Rys. 3.3. Mikrostruktura przełomu grafitu przy powiększeniu x300 dla próbek: a) AF-5, b) S-180



Rys. 3.4. Mikrostruktura przełomu grafitu przy powiększeniu x2000 dla próbek: a) AF-5, b) S-180



Rys. 3.5. Mikrostruktura przełomu grafitu przy powiększeniu x10000 dla próbek: a) AF-5, b) S-180

W tabeli 3.3 przedstawiono wyniki pomiarów gęstości pozornej próbek grafitowych wykonanych metodą piknometrii helowej. Zmierzona objętość odniesiona do masy próbek wskazuje na wyższą gęstość pozorną grafitu AF-5. Ze względu na fakt, iż piknometr helowy nie uwzględnia porowatości otwartej, uzyskane wyniki mogą w istotny sposób różnić się od stanu faktycznego.

Tabela 3.3. Wyniki pomiarów gęstości pozornej grafitu metodą piknometryczną

Grafit POCO	Masa [g]	Objętość [cm³]	Gęstość pozorna [g/cm³]
AF-5	4,761	2,182 ± 0,002	2,182
S-180	4,691	2,256 ± 0,002	2,080

W związku z powyższym przeprowadzono także badanie gęstości metodą ważenia hydrostatycznego, która umożliwia uwzględnienie porowatości otwartej. Wyniki analizy zaprezentowano w tabeli 3.4. Można zauważyć znacznie wyższe zmierzone objętości tych samych próbek, co przekłada się bezpośrednio na niższą gęstość pozorną. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła także stwierdzić, iż porowatość całkowita badanych materiałów zawiera się w granicach 20 – 30%.

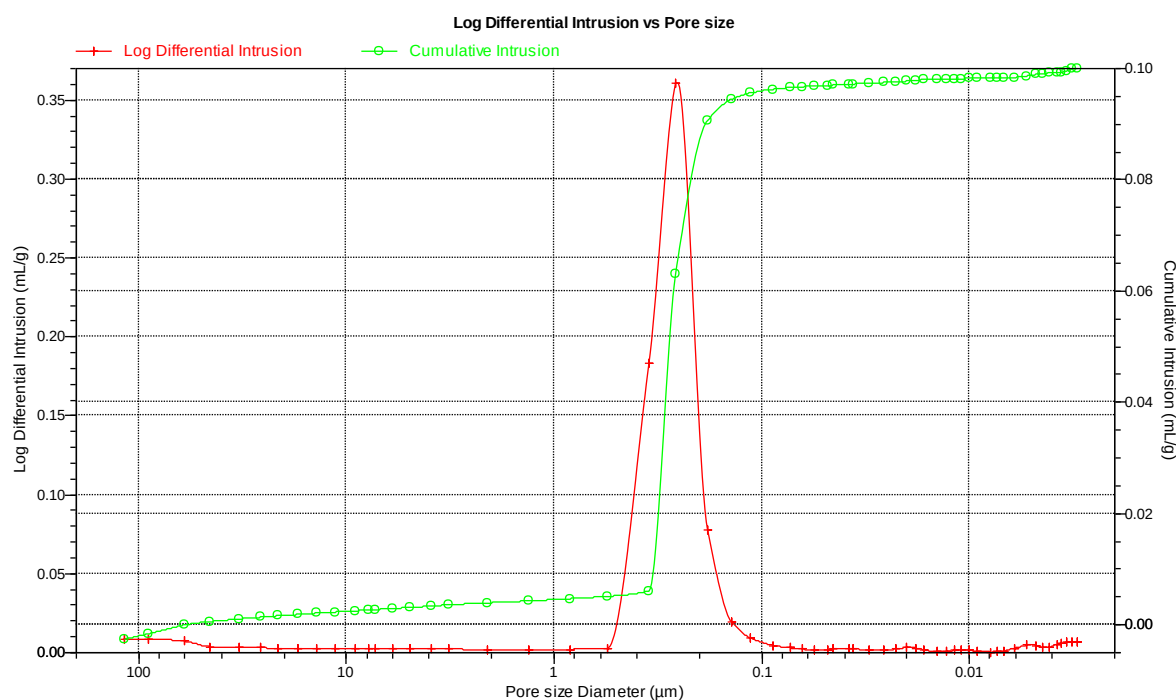
W trakcie badań hydrostatycznych wykorzystywano wodę. Materiały węglowe wykazują silną hydrofobowość, co utrudnia dokładny pomiar. Ponadto, ze względu na zjawisko napięcia powierzchniowego, istnieje pewna graniczna wielkość poru, która woda jest w stanie spenetrować. Metodą, która w przypadku badanych materiałów pozbawiona jest błędów związanych z oddziaływaniami fizycznymi pomiędzy badanym materiałem a medium pomiarowym jest porozymetria rtęciowa.

Tabela 3.4. Wyniki pomiarów gęstości pozornej grafitu metodą ważenia hydrostatycznego

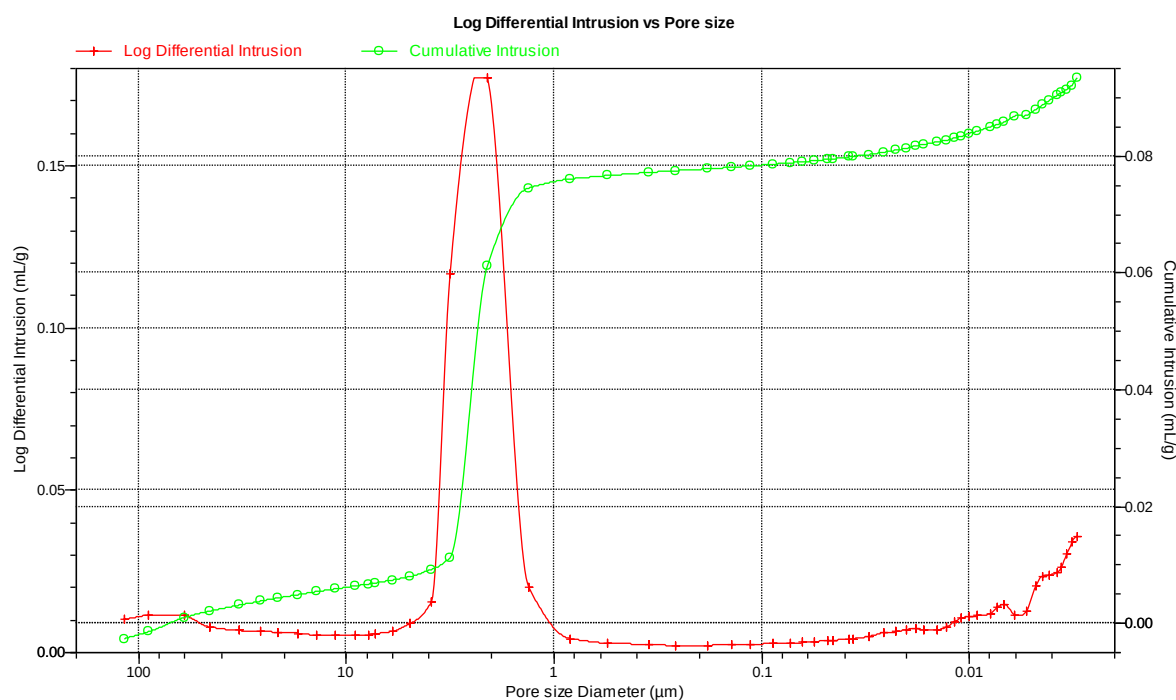
Grafit	Objętość próbki	Gęstość pozorna	Porowatość zamknięta	Porowatość całkowita	Porowatość otwarta	Porowatość względna
	[cm³]	[g/cm³]	[%]	[%]	[%]	[%]
AF-5	2,638	1,806	19,018	23,167	4,148	80,98
S-180	2,593	1,810	18,817	28,263	9,446	81,18

Na rys. 3.6 i 3.7 przedstawiono intruzję rtęci w funkcji wielkości porów dla preparatów pobranych z badanych próbek grafitowych. Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić

istotne różnice w rozkładzie średniej wielkości porów pomiędzy próbkami. W przypadku grafitu AF-5 potwierdzono obecność porów o wielkości w zakresie od 0,1 do 0,6 μm . W przypadku próbki pobranej z grafitu S-180 potwierdzono z kolei obecność porów w zakresie wielkości od 1 do 6 μm , a także wyraźny udział porów o wielkości poniżej 30 nm.



Rys. 3.6. Intruzja rtęci w funkcji wielkości porów dla elektrody grafitowej AF-5



Rys. 3.7. Intruzja rtęci w funkcji wielkości porów dla elektrody grafitowej S-180

Na podstawie otrzymanych krzywych wyznaczono parametry opisujące porowatość badanych materiałów, które zestawiono w tabeli 3.5. W przypadku grafitu AF-5 średnia wielkość porów wynosi 0,278 μm , a ich sumaryczny udział 28,5%. W przypadku grafitu S-180 średnia wielkość porów wynosi 2,362 μm , a ich sumaryczny udział kształtuje się na poziomie 26,4%.

Tabela 3.5. Wyniki analizy porowatości metodą porozymetrii rtęciowej

Grafit	Mediana średniej wielkości porów [μm]	Porowatość [%]
AF-5	0,278	28,532
S-180	2,362	26,420

Przeprowadzone badania gęstość pozornej analizowanych grafitów są zbliżone do wartości podanych w specyfikacji materiału przez producenta (tabela 2.2). Badania mikroskopowe potwierdziły, iż wielkość ziarna grafitu AF-5 jest blisko 10-krotnie mniejsza niż grafitu S-180. Uzyskane wykresy wielkości intruzji rtęci w funkcji wielkości porów sugerują także, iż próbka AF-5 wykazuje wyższy stopień jednorodności rozkładu średniej wielkości porów w stosunku do próbki S-180. Wyniki te znalazły potwierdzenie w obserwacjach mikrostrukturalnych, które wskazują również na większą jednorodność mikrostruktury grafitu AF-5 pod względem wielkości ziaren grafitu z jakich jest zbudowany.

4. WARUNKI I METODYKA BADAŃ

Badania wpływu parametrów procesu drążenia elektroerozyjnego na wskaźniki technologiczne oraz pomiary charakterystycznych wielkości warstwy wierzchniej zrealizowano w większości na obrabiarkach i urządzeniach technologicznych znajdujących się w Zakładzie Obróbek Wykańczających i Erozyjnych Instytutu Technik Wytwarzania Politechniki Warszawskiej. Poniżej przedstawiono podstawową charakterystykę zastosowanych urządzeń oraz koncepcję i warunki badań doświadczalnych.

4.1. Aparatura badawcza

4.1.1. Drążarka elektroerozyjna

Badania doświadczalne drążenia elektroerozyjnego zostały zrealizowane na obrabiarce elektroerozyjnej Form 2-LC ZNC firmy Charmilles (rys. 4.1). Obrabiarka jest wyposażona w izoenergetyczny impulsowy generator tranzystorowy. Elektrodrążarka umożliwia obróbkę jednoosiową wgłębną ze zmianą biegunowości elektrod oraz z nastawianymi wartościami natężenia prądu I_c , czasu wyładowania elektrycznego t_{on} oraz czasu przerwy między impulsami t_{off} (tabela 4.1).



Rys. 4.1. Drążarka elektroerozyjna Form 2-LC ZNC firmy Charmilles

Tabela 4.1. Dane techniczne drążarki elektroerozyjnej Charmilles Form 2-LC ZNC

Dane techniczne	Form 2-LC ZNC
wymiary zbiornika roboczego	820 x 500 x 300 mm
wymiary stołu	500 x 300 mm
maksymalny ciężar detalu	500 kg
maksymalny ciężar elektrody roboczej	60 kg
rozdzielczość pomiarowa	0,001 mm
maksymalny prąd roboczy	50 A
czas impulsu wyładowania	3 – 2400 μ s
czas przerwy między impulsami	3 – 2400 μ s
oś sterowana numerycznie	Z
minimalna chropowatość powierzchni (dla stali)	$Ra = 0,32 \mu\text{m}$

W badaniach doświadczalnych poddano obróbce EDM walcowe próbki ze stopu Hastelloy C-22 o wymiarach $\varnothing 12 \times 2,5$ mm. Zastosowano dwa materiały elektrod grafitowych firmy POCO o różnej wielkości ziarna: AF-5 (1 μm) i S-180 (10 μm). Dla każdego zestawu parametrów w badaniach doświadczalnych przygotowano nowe elektrody grafitowe o wymiarach 12 x 12 x 20 mm. Elektrody były mocowane we wrzecionie drążarki w specjalnie zaprojektowanym uchwycie EROWA. Próbki oraz elektrody grafitowe zostały przygotowane na wycinarce elektroerozyjnej, a następnie poddano je operacjom docierania i polerowania. Wyjściowa chropowatość powierzchni przygotowanych próbek oraz elektrod wynosiła $Sa < 0,2 \mu\text{m}$. Drażone próbki były mocowane w imadle precyzyjnym na stole magnetycznym elektrodrążarki. Równoległość powierzchni obrabianych próbek względem powierzchni elektrody roboczej była każdorazowo ustawiana na elektrodrążarce przy użyciu zegarowego czujnika mikrometrycznego firmy Mitutoyo. W celu wyeliminowania wpływu zmienności warunków obróbki wgłębnej EDM wraz ze zmianą głębokości drążenia, zdecydowano się na przeprowadzenie badań metodą obróbki swobodnej (elektroda robocza pracowała powierzchnią czołową i nie było szczelin bocznych). Nie stosowano dodatkowych węży do przepływu dielektryka pod wysokim ciśnieniem przez szczelinę międzyelektrodową. Próby drążenia przeprowadzano przy pełnym zanurzeniu elektrod w dielektryku na bazie mieszaniny węglowodorów parafinowych – nafcie EDMfluid 108 MP-SE. Do oczyszczania nafty z produktów obróbki zastosowano filtry olejowe Mann&Hummel H15 475/1.

4.1.2. Profilometr skanujący

Pomiary parametrów struktury geometrycznej powierzchni (SGP) próbek po obróbce elektroerozyjnej dokonano przy użyciu profilometru skanującego FORM TALYSURF Series 2 firmy Taylor Hobson GB (rys. 4.2). Urządzenie pomiarowe jest dedykowane do zaawansowanych pomiarów 3D stereometrii powierzchni, profili oraz konturu przedmiotu. Podstawowe dane techniczne profilometru zawarto w tabeli 4.2.



Rys. 4.2. Profilometr skanujący FORM TALYSURF Series 2 firmy Taylor Hobson.

Tabela 4.2. Dane techniczne profilometru skanującego firmy Taylor Hobson

Dane techniczne	FORM TALYSURF Series 2
rozdzielczość	0,6 nm
zakres pomiarowy	+/- 0,5 mm
długość odcinka pomiarowego	50 mm
zakres przesuwu na osi X	50 mm
zakres przesuwu na osi Y	50 mm
zakres przesuwu na osi Z	450 mm
promień igły pomiarowej	2 μ m
klasa dokładności	1
sterowanie	CNC

4.1.3. Mikroskopy do badań mikrostruktury warstwy wierzchniej

Badania struktury metalograficznej powierzchni zrealizowano z wykorzystaniem mikroskopu optycznego OLYMPUS BX51M (rys. 4.3a) sprzężonego z komputerowym analizatorem obrazu Olympus Stream Essentials. Obserwacje zglądów metalograficznych dokonano w polu jasnym z powiększeniem x200, x 500 oraz x 1000.

Obserwacje makroskopowe zewnętrznej topografii powierzchni dokonano przy użyciu mikroskopu stereoskopowego SZX10 firmy OLYMPUS. (rys. 4.3b). Badania powierzchni przeprowadzono z powiększeniem x 6,3. Otrzymane obrazy były analizowane w dedykowanym oprogramowaniu Olympus Stream Essentials.

Zdjęcia na mikroskopie optycznym i stereoskopowym były wykonywane z wykorzystaniem kamery cyfrowej Olympus SC50 o rozdzielczości 5 mlnpix.

Analiza składu chemicznego powierzchni próbek oraz elektrod grafitowych po drażeniu elektroerozyjnym przeprowadzono z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego Hitachi SU 3500 z modułem do analizy składu chemicznego EDS (*Energy Dispersion Spectroscopy*). W trakcie obserwacji stosowano napięcie przyspieszenia elektronów równe 30 kV.



(a)



(b)

Rys. 4.3. Mikroskop a) optyczny BX51M, b) stereoskopowy SZX10

4.1.4. Karta oscyloskopowa

Wyznaczenie rzeczywistych charakterystyk prądowo-napięciowych generatora drążarki w trakcie procesu EDM dokonano przy wykorzystaniu karty oscyloskopowej National Instruments NI USB-5133 (rys. 4.4). Dwukanałowa karta oscyloskopowa dedykowana jest do cyfrowego i analogowego pomiaru i rejestracji szybkozmiennych sygnałów elektrycznych. Specyfikacja techniczna wykorzystanej karty została zawarta w tabeli 4.3.



Rys. 4.4. Karta oscyloskopowa National Instruments NI USB-5133

Tabela 4.3. Specyfikacja techniczna karty oscyloskopowej National Instruments NI USB-5133

Dane techniczne	National Instruments NI USB-5133
rozdzielczość	8 bitów
typ złącza wejściowego	BNC
typ złącza wyjściowego	USB
liczba analogowych kanałów próbkowanych	2
liczba wejść/wyjść cyfrowych	1
zakres częstotliwości próbkowania	1,529 kS/s – 100 MS/s
maksymalny zakres pomiaru napięcia	+/- 25 V
minimalny zakres pomiaru napięcia	+/- 25 mV

Pomiary wartości natężenia prądu oraz napięcia były rejestrowane przez dwa wejściowe kanały analogowe (CH0 oraz CH1). Wyjście karty oscyloskopowej zostało podłączone z komputerem PC (procesor Intel I5-11400, 16 Gb RAM) poprzez kabel USB. Obserwacje rejestrowanych sygnałów w czasie rzeczywistym przeprowadzono w dedykowanym programie NI-SCOPE Soft Front Panel firmy National Instruments.

4.2. Charakterystyka impulsów elektrycznych w obróbce elektroerozyjnej

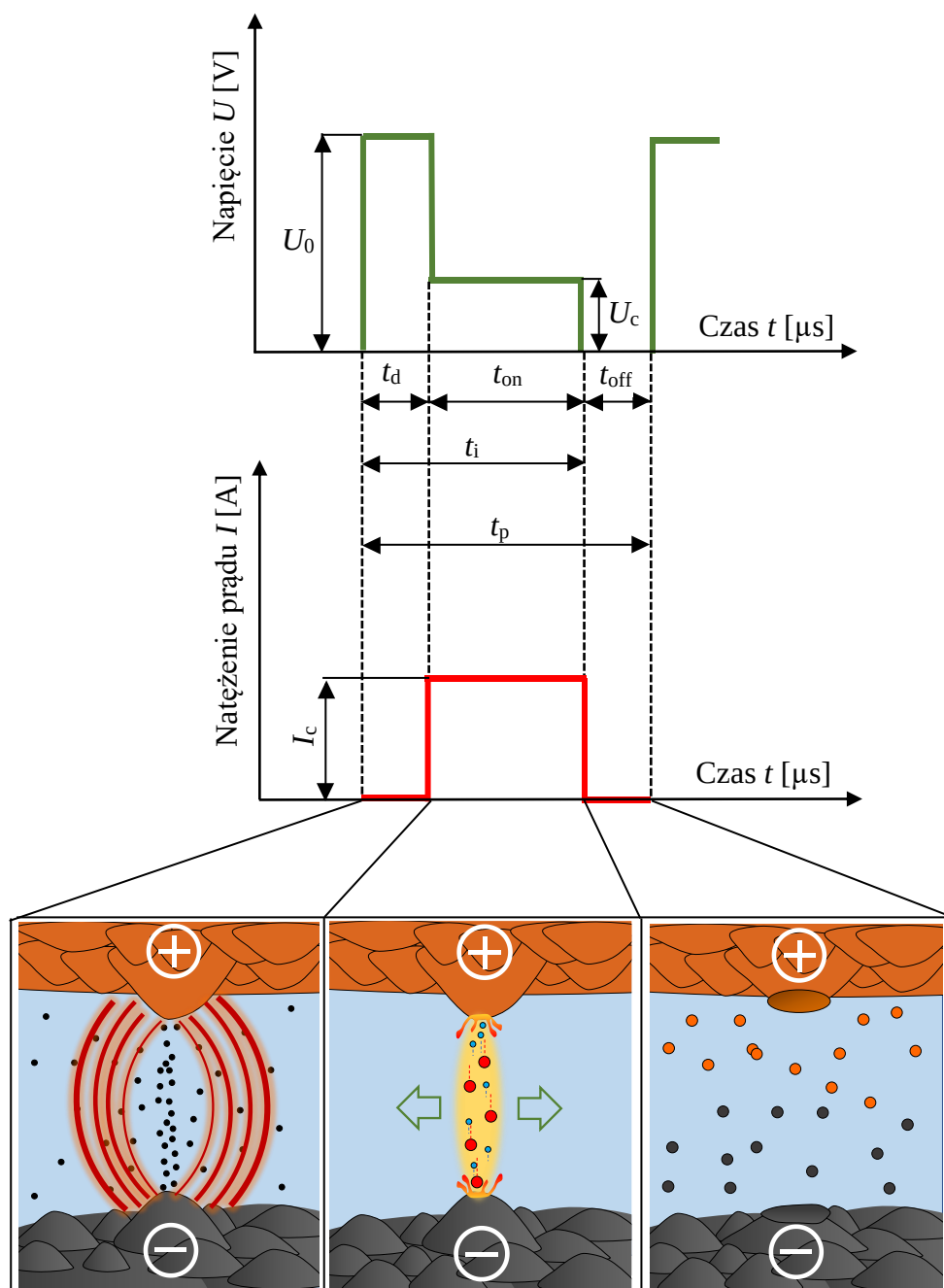
We współczesnych obrabiarkach elektroerozyjnych wykorzystywane są najczęściej generatory tranzystorowe. W zależności od charakteru impulsu elektrycznego można je sklasyfikować jako generatory tranzystorowe izoczęstotliwościowe lub izoenergetyczne. Generatory izoczęstotliwościowe zapewniają stałą wartość czasu wyładowania elektrycznego oraz czasu przerwy między kolejnymi impulsami, natomiast generatory izoenergetyczne utrzymują stałą wartość energii wyładowania elektrycznego w trakcie procesu elektroerozji.

Na rys. 4.5 przedstawiono schematyczny przebieg charakterystyki prądowo-napięciowej pojedynczego wyładowania elektrycznego dla generatora tranzystorowego. Czas pojedynczego cyklu wyładowania elektrycznego t_p składa się z czterech charakterystycznych faz. Pierwsza z nich to faza zapłonu, która reprezentuje czas niezbędny do przebicia z wysokiego napięcia otwartego U_0 , przyłożonego do katody i anody, do niskiego napięcia wyładowania U_c , które zawiera się w zakresie $U_c = 15 - 30$ V. Okres ten definiuje się jako czas opóźnienia zapłonu t_d . Druga faza, która następuje natychmiast po fazie pierwszej, to inicjacja przebicia elektrycznego w postaci kanału plazmowego i przepływ prądu o wartości I_c . Trzecia faza to faza wyładowania elektrycznego, w czasie której wysokoenergetyczny kanał plazmowy jest podtrzymywany przez czas t_{on} . W tym czasie następuje topnienie i parowanie niewielkiej objętości materiału elektrod. Czwarta i ostatnia faza to zanik napięcia i przepływu prądu, co powoduje gwałtowną zmianę ciśnienia w szczelinie i wyrzucenie roztopionego materiału ze sferycznego krateru. W czasie zwanym czasem przerwy między impulsami t_{off} część stopionego i odparowanego materiału jest wypłukiwana przez przepływający dielektryk w szczelinie, a reszta ulega rekrytalizacji w kraterze. W czasie przerwy t_{off} następuje również chłodzenie elektrod oraz dejonizacja szczeliny międzyelektrodowej i proces powtarza się cyklicznie. Na całkowity czas impulsu t_i składa się czas opóźnienia zapłonu t_d oraz czas wyładowania elektrycznego t_{on} [65, 116].

Z przedstawionej charakterystyki impulsu roboczego generatora tranzystorowego można zdefiniować podstawowe wielkości charakteryzujące przebieg wyładowania elektrycznego:

- U_c – napięcie wyładowania elektrycznego [V],
- U_0 – napięcie otwarte [V],
- I_c – natężenie prądu wyładowania [A],
- t_{on} – czas wyładowania elektrycznego [μ s],
- t_{off} – czas przerwy między impulsami [μ s],

- t_d – czas opóźnienia zapłonu [μs],
- t_i – czas impulsu [μs], przy czym $t_i = t_d + t_{on}$,
- t_p – czas pojedynczego cyklu wyładowania elektrycznego [μs], przy czym $t_p = t_i + t_{off}$



Rys. 4.5. Przebieg prądowo-napięciowy wyładowania elektrycznego w generatorach tranzystorowych

Napięcie wyładowania U_c jest skorelowane z wytrzymałością dielektryczną ośrodka płynnego w szczelinie. Wyższa wartość napięcia wyładowania umożliwia zwiększenie szerokości szczeliny międzyelektrodowej, a tym samym stworzenie dogodnych warunków do

odprowadzania produktów erozji przez dielektryk i poprawy stabilności procesu. Wzrost napięcia wyładowania prowadzi do zwiększenia natężenia pola elektrycznego oraz jednoczesnego wzrostu wydajności usuwania materiału, wskaźników zużycia narzędzia oraz chropowatości powierzchni [65, 226, 227].

Natężenie prądu wyładowania I_c wpływa na objętość usuniętego materiału. Wyższe wartości natężenia prądu stosowane są w operacjach obróbki zgrubnej w celu zwiększenia wydajności i w konsekwencji pogorszeniu jakości wykończenia powierzchni [65, 1, 228].

Czas wyładowania elektrycznego t_{on} wraz z natężeniem prądu I_c decyduje o ilości energii cieplnej dostarczonej do materiału obrabianego. Przy długim czasie wyładowania większa objętość materiału ulega przetopieniu. Wytworzone kratery charakteryzują się większą szerokością i głębokością, co przekłada się bezpośrednio na wzrost chropowatości powierzchni. Wydłużenie czasu wyładowania elektrycznego powoduje rozprządzenie większej ilości ciepła w przedmiocie obrabianym, a tym samym zwiększenie głębokości strefy wpływu ciepła.

Czas przerwy między impulsami t_{off} wpływa na szybkość oraz stabilność obróbki. Zbyt krótki czas przerwy uniemożliwia wyrzucenie roztopionego materiału z krateru przez przepływający dielektryk, co może spowodować, że kolejne wyładowanie będzie niestabilne i powtórzone w tym samym punkcie. Niestabilne warunki obróbki powodują nieregularne cykle i cofanie się serwomechanizmu elektrodrażarki, co spowalnia proces erozji.

4.3. Schemat toru pomiarowego do badań charakteru impulsów elektrycznych w procesie EDM

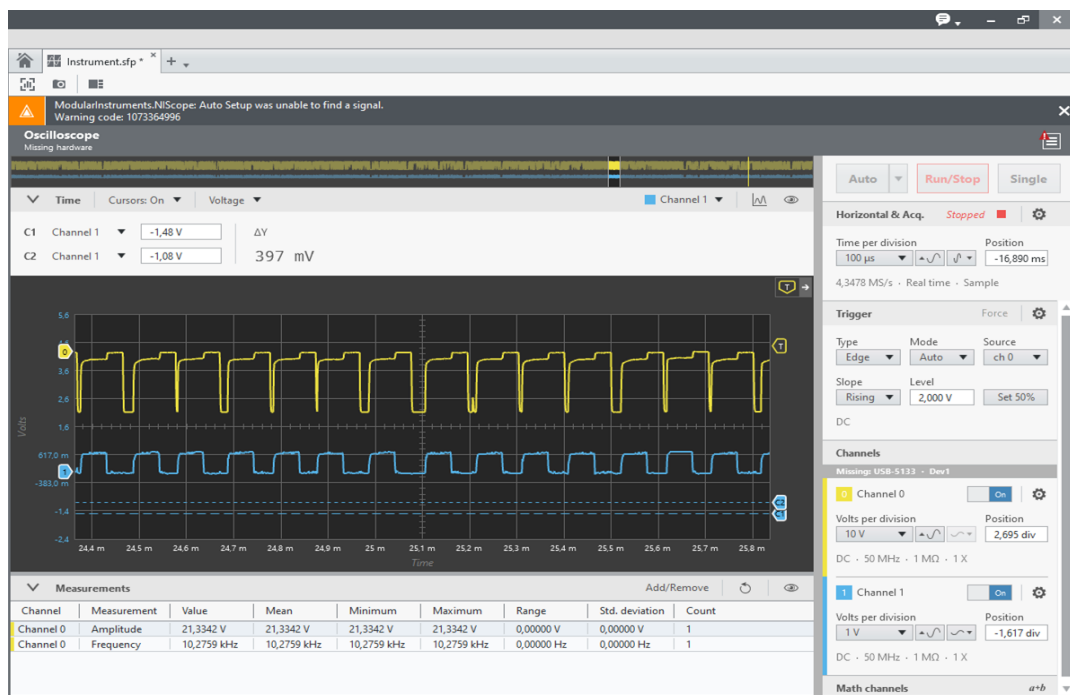
Wykorzystany tor pomiarowy umożliwia rejestrację rzeczywistych przebiegów prądowo-napięciowych w trakcie procesu elektroerozji. Na podstawie zarejestrowanych sygnałów można wyznaczyć charakterystyki generatora drażarki, które są podstawą do zdefiniowania przedziału zmienności rzeczywistych parametrów wejściowych w przyjętym planie eksperymentu.

Stanowisko badawcze wraz z zaimplementowanym torem pomiarowym składało się z następujących podzespołów (rys. 4.6):

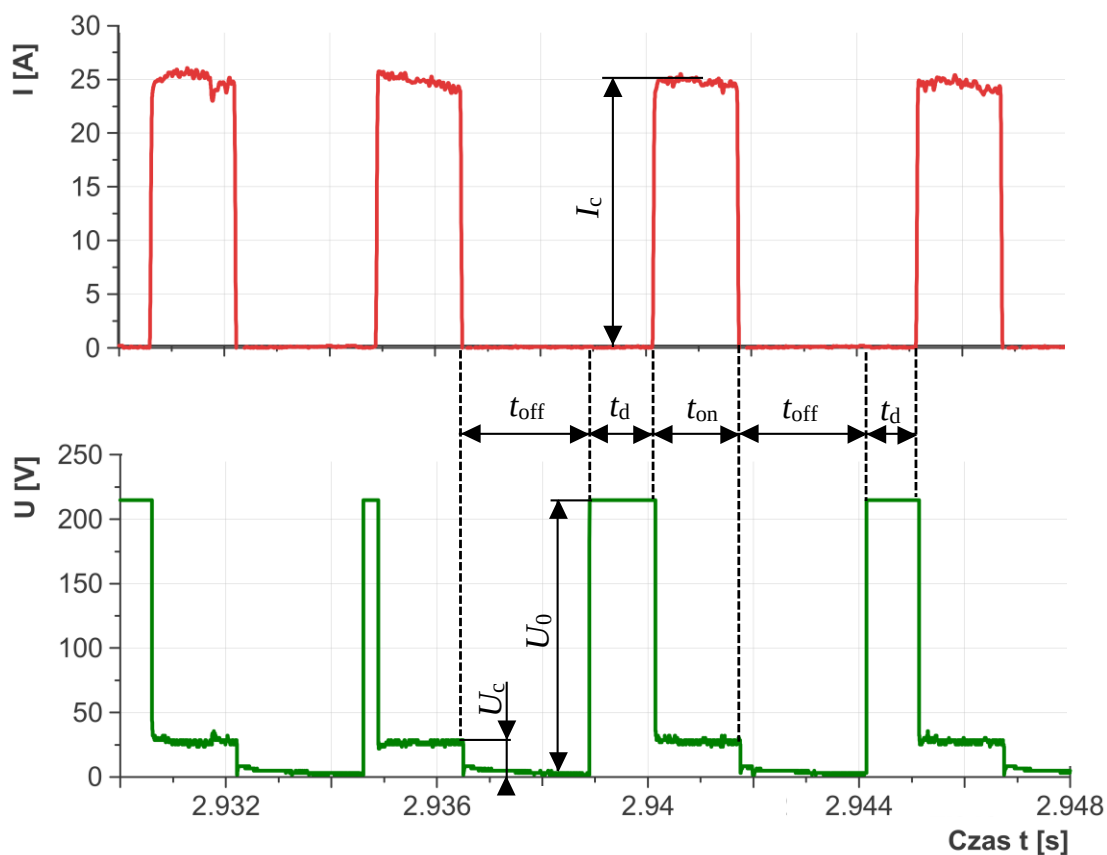
- przedmiot obrabiany – próbka ze stopu Hastelloy C-22,
- elektroda robocza – grafit POCO AF-5 oraz S-180,
- generator drażarki,
- sonda napięciowa Techtronix,

-

Pomiar napięcia wyładowania elektrycznego był realizowany poprzez wykorzystanie sondy napięciowej rejestrującej sygnał 10-krotnie pomniejszony. Pomiar natężenia prądu realizowano metoda pośrednią poprzez spadek napięcia na boczniku bezindukcyjnym. Połączenie sondy napięciowej oraz bocznika prądu z kartą oscyloskopową wykonano za pomocą przewodów koncentrycznych ekranowych zakończonych złączami BNC. Karta oscyloskopowa została podłączona bezpośrednio do komputera za pomocą kabla USB. Sygnały z dwóch kanałów były rejestrowane w oprogramowaniu NI-SCOPE Soft Front Panel firmy National Instruments (rys. 4.7) i zapisywane bezpośrednio na dysku twardym komputera PC. Częstotliwość próbkowania danych otrzymywanych z dwóch kanałów wynosiła 50 MHz. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów prądowo-napięciowych wyznaczono w programie Oscilloscope rzeczywiste wartość natężenia prądu, napięcia wyładowania oraz czasu wyładowania i przerwy stosując odpowiednie przeliczniki: 0,187 V / 1 A – dla pomiaru prądu wyładowania oraz 10-krotne zwiększenie wartości amplitudy dla pomiaru napięcia. Dalsza obróbka i analiza sygnałów została dokonana w programie DIAdem firmy National Instruments. Na rys. 4.8 został przedstawiony przykładowy zarejestrowany i obrobiony przebieg prądowo-napięciowy w programie DIAdem.



Rys. 4.7. Interfejs NI-SCOPE Soft Front Panel firmy National Instruments



Rys. 4.8. Przebieg napięcia i natężenia prądu w funkcji czasu dla wartości parametrów: $U_0 = 220$ V, $U_c = 25$ V, $I_c = 25$ A, $t_{on} = 1200$ μ s, $t_{off} = 1400$ μ s

Na podstawie zarejestrowanych rzeczywistych charakterystyk generatora drążarki możliwe jest wyznaczenie średnich wartości parametrów elektrycznych oraz czasowych korzystając z zależności:

- średnia amplituda napięcia wyładowania U_c :

$$U_c = \frac{1}{t_{on}} \int_0^{t_{on}} U(t) dt \quad [V] \quad (4.1)$$

- średnia amplituda natężenia prądu wyładowania I_c :

$$I_c = \frac{1}{t_{on}} \int_0^{t_{on}} I(t) dt \quad [A] \quad (4.2)$$

- energia pojedynczego wyładowania elektrycznego E :

$$E = \int_0^{t_{on}} U_c(t) \cdot I_c(t) dt \approx U_c \cdot I_c \cdot t_{on} \quad [mJ] \quad (4.3)$$

- moc pojedynczego wyładowania elektrycznego P :

$$P = \frac{1}{t_{on}} \int_0^{t_{on}} U_c(t) \cdot I_c(t) dt \approx \frac{E}{t_{on}} \approx U_c \cdot I_c \quad [W] \quad (4.4)$$

- częstotliwość wyładowań elektrycznych f :

$$f = \frac{1}{t_p} = \frac{1}{t_i + t_{off}} \quad [Hz] = \frac{1}{t_d + t_{on} + t_{off}} \quad [Hz] = \frac{1000}{t_p} \quad [kHz] \quad (4.5)$$

- współczynnik wypełnienia impulsu σ :

$$\sigma = \frac{t_{on}}{t_p} = \frac{t_{on}}{t_i + t_{off}} = \frac{t_{on}}{t_d + t_{on} + t_{off}} \quad (4.6)$$

4.4. Badania wstępne wpływu charakteru impulsów elektrycznych w procesie EDM z wykorzystaniem elektrod grafitowych na efekty obróbki

Wstępne badania rozpoznawcze miały na celu znalezienie zakresu stabilnych parametrów obróbki półwykończeniowej i wykończeniowej EDM, które będą realizowane w ramach eksperymentu planowanego. W tym celu wykorzystano tor pomiarowy rejestrujący w czasie rzeczywistym przebiegi charakterystyk prądowo-napięciowych. Do wstępnych badań rozpoznawczych na elektrodrążarce Form 2-LC ZNC zastosowano następujące zakresy zmienności wejściowych parametrów elektrycznych:

- natężenie prądu wyładowania w zakresie: $I_c = 1,7 - 12 \text{ A}$,
- czas wyładowania elektrycznego w zakresie: $t_{on} = 8 - 600 \text{ } \mu\text{s}$,

- czas przerwy między impulsami w zakresie: $t_{\text{off}} = 6 - 800 \mu\text{s}$.

Na podstawie przeprowadzonych wstępnych badań stwierdzono, iż w przypadku elektrod grafitowych zbyt długi czas wyładowania elektrycznego oraz krótki czas przerwy między impulsami destabilizuje proces erozji. Jest to związane bezpośrednio z wysokim zanieczyszczeniem szczeliny międzyelektrodowej produktami obróbki oraz ziarnami grafitu, które prowadzą do impulsów łukowych i zwarciovych. Serwomechanizm drążarki przeciwdziała powyższemu zjawiskowi zwiększając szczelinę międzyelektrodową i wydłużając czas przerwy między impulsami. W wyniku licznych impulsów zwarciovych może dojść do punktowego przypalenia powierzchni obrabianej. Długi czas przerwy korzystnie oddziałuje na stabilność obróbki, przy czym wydłuża czas jednostkowy drążenia.

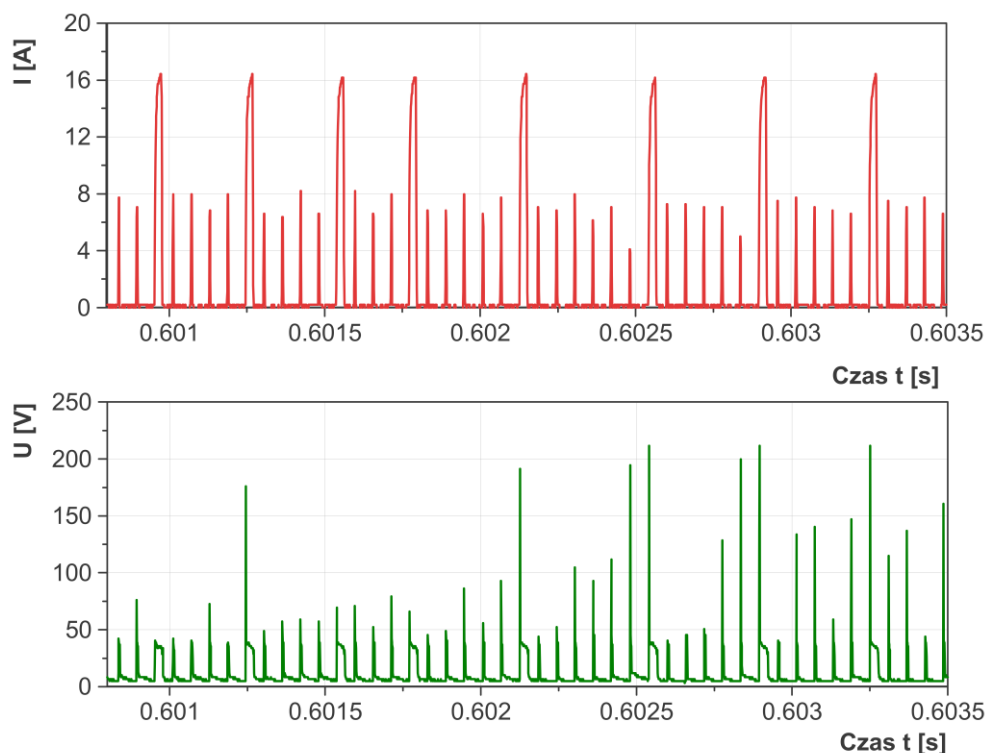
Przy wysokich wartościach natężenia prądu krótki czas wyładowania elektrycznego uniemożliwia osiągnięcie w szczelinie nastawionych wartości prądu. Wynika to z zaburzonej proporcji między wartością prądu wyładowania a czasem jego oddziaływania. Przy wysokim prądzie szczytowym czas jego narastania jest dłuższy, co przy krótkim czasie impulsu i wysokiej oporności dielektryka często uniemożliwia osiągnięcie zadanej wartości natężenia prądu na obrabiarce (rys. 4.9). Przy niskich wartościach natężenia prądu elektrycznego długi czas wyładowania powoduje intensywną dyfuzję węgla z rozkładu dielektryka na powierzchni obrabianej. Wytworzona warstwa węgla charakteryzuje się wysoką temperaturą sublimacji, co utrudnia jej erozję przy niskiej wartości natężenia prądu.

Istotnym czynnikiem wpływającym na proces elektroerozji jest polaryzacja narzędzia. Przy biegunowości ujemnej zaobserwowano wysoką wydajność usuwania materiału oraz wysoki wskaźnik zużycia elektrody grafitowej. Zbyt krótki czas przerwy między impulsami uniemożliwia odprowadzanie produktów obróbki oraz oderwanych ziaren grafitu ze szczeliny, co zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia impulsów zwarciovych.

Wzrost wartości natężenia prądu oraz czasu wyładowania elektrycznego zwiększa ilość energii cieplnej dostarczonej do przedmiotu i wydajność procesu. Uformowane kratery posiadają większe średnice i głębokości, co bezpośrednio przekłada się na wzrost wysokościowych i wzdłużnych parametrów struktury geometrycznej powierzchni.

W trakcie badań rozpoznawczych stwierdzono, iż wielkość ziarna elektrod grafitowych odgrywa znaczącą rolę w trakcie obróbki z niską energią wyładowania elektrycznego. Zaobserwowano bardziej lub mniej znaczące różnice w wydajności usuwania materiału, zużyciu narzędzia oraz jakości wykończenia powierzchni stosując elektrody grafitowe o wielkości ziarna 1 i 10 μm , przy niskich nastawionych wartościach natężenia prądu i czasu

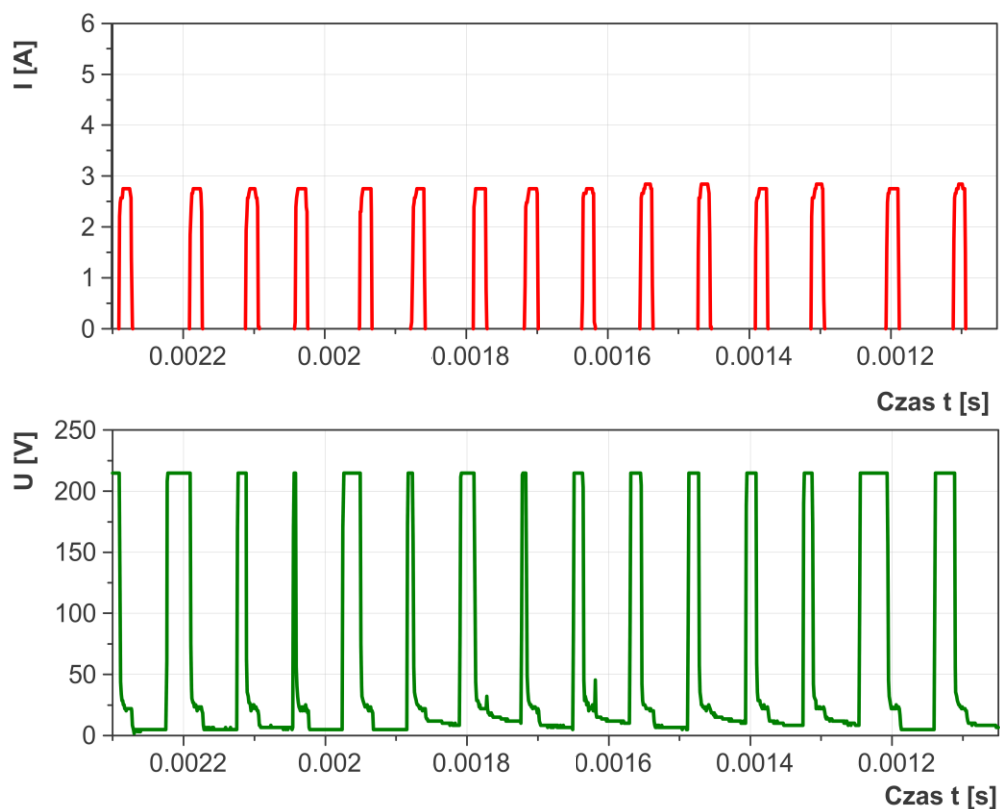
wyładowania elektrycznego. Obróbka z polaryzacją prostą i niską energią wyładowań elektrycznych umożliwia osiągnięcie stabilnych warunków elektrodrążenia. W przypadku polaryzacji odwróconej i długiego czasu wyładowania elektrycznego dochodziło do miejscowych przypaleń powierzchni na skutek impulsów zwarciovych, co wynikało z wysokiego zużycia elektrody roboczej.



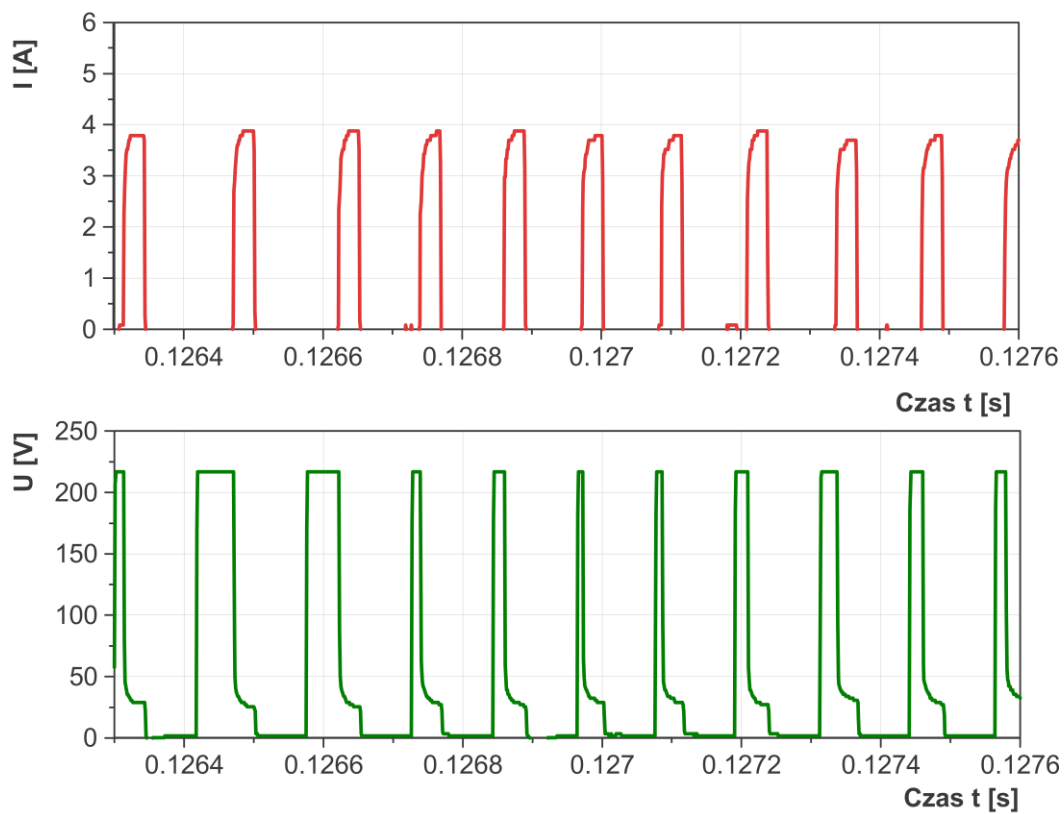
Rys. 4.9. Zarejestrowany niestabilny przebieg napięcia i natężenia prądu w funkcji czasu dla wartości parametrów nastwionych na obrabiarce: $I_c = 20$ A, $t_{on} = 36$ μ s, $t_{off} = 25$ μ s

Dla celów niniejszych badań postanowiono przyjąć zakresy parametrów wejściowych, które odpowiadają warunkom obróbki półwykończeniowej i wykończeniowej EDM. Przyjęte zakresy zmienności parametrów elektrycznych wybrano w taki sposób, aby zapewniły wysoką stabilność i powtarzalność wyładowań elektrycznych oraz osiągnięcie możliwie najniższych parametrów chropowatości powierzchni po obróbce. Wybór stabilnych parametrów obróbki umożliwi budowę wiarygodnych modeli matematycznych opartych na danych empirycznych, które będą podstawą do statystycznej analizy wpływu analizowanych parametrów elektrycznych na wskaźniki technologiczne i stan warstwy wierzchniej przedmiotu po obróbce.

Na rys. 4.10 i 4.11 przedstawiono przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe stabilnych wyładowań elektrycznych.



Rys. 4.10. Przebieg napięcia i natężenia prądu w funkcji czasu dla wartości parametrów: $U_0 = 220$ V, $U_c = 25$ V, $I_c = 2,7$ A, $t_{on} = 17$ μ s, $t_{off} = 51$ μ s



Rys. 4.11. Przebieg napięcia i natężenia prądu w funkcji czasu dla wartości parametrów: $U_0 = 220$ V, $U_c = 25$ V, $I_c = 3,8$ A, $t_{on} = 30$ μ s, $t_{off} = 75$ μ s

4.5. Planowany eksperyment

Bezpośrednie badanie złożoności zjawisk fizycznych w trakcie procesu EDM jest skomplikowane z uwagi na znaczną liczbę zmiennych czynników wejściowych, które wpływają na wynikowe efekty obróbki. Budowane są zatem statystyczne modele matematyczne, oparte na danych empirycznych, które przedstawiają model rzeczywisty w uproszczony sposób. Podstawową metodą wyznaczenia modeli statystycznych jest analiza regresji wielorakiej [229].

Analiza regresji wielorakiej w badaniach technologicznych umożliwia określenie zależności i siły związku pomiędzy jednym czynnikiem wynikowym i kilkoma jednocześnie czynnikami wejściowymi. Metoda ta, w oparciu o zasadę najmniejszej sumy kwadratów, pozwala na krokowe wyznaczenie współczynników równania regresji opisującego badany proces dla przyjętych parametrów wejściowych. W wyniku realizacji badań eksperymentalnych otrzymuje się funkcję regresji wielorakiej, która przyporządkowuje wartości wielu czynników wejściowych średnie wartości wynikowe [229].

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych wyznaczono statystyczne modele matematyczne – równania regresji, które umożliwią prognozę efektów wyjściowych w zależności od zastosowanych parametrów wejściowych. Dobór odpowiedniego modelu jest uwarunkowany od stopnia dopasowania danych empirycznych do równania regresji.

Stopień dopasowania równania regresji do wyników badań eksperymentalnych opisuje się współczynnikiem korelacji wielorakiej R . Współczynnik R określa zależność statystyczną między danymi wejściowymi badanego procesu y i danymi wyjściowymi otrzymanego równania regresji $\bar{y}$ w przestrzeni N -wymiarowej [230]:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\bar{y}_n - y_{sr})^2}{\sum_{n=1}^N (y_n - y_{sr})^2}} \quad (4.7)$$

Wartość współczynnika korelacji R jest wielkością unormowaną i zawiera się w przedziale $R \in < 0, 1 >$. Jeśli wartość współczynnika R jest bliższa jedności, to wg. Guilforda (tabela 4.4) świadczy to o silnym związku i dokładnym dopasowaniu równania regresji do wyników badań doświadczalnych [229, 230, 231].

Tabela 4.4. 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

Istotność współczynnika korelacji wielorakiej R weryfikuje się za pomocą testu Fishera – Snedecora (F). Na jego podstawie można ocenić adekwatność wyznaczonego modelu matematycznego, czyli jego zgodność z danymi empirycznymi na przyjętym poziomie istotności α . Wartość testową funkcji F wyznacza się z zależności:

$$F = \frac{n - k - 1}{k} \cdot \frac{R^2}{1 - R^2} \quad (4.8)$$

gdzie:

n – całkowita liczba doświadczeń,

k – liczba współczynników w równaniu regresji.

Obliczoną wartość funkcji testowej F porównuje się z wartością krytyczną F_{kr} odczytaną z tablic, przy założonym poziomie istotności α i liczbie stopni swobody:

$$\begin{aligned} f_1 &= n - k - 1 \\ f_2 &= k \end{aligned} \quad (4.9)$$

Współczynnik korelacji wielorakiej można uznać za istotny, gdy spełniona jest nierówność:

$$F > F_{kr(\alpha; f_1, f_2)} \quad (4.10)$$

Weryfikację istotności poszczególnych członów równania regresji dokonuje się za pomocą testu t-Studenta. Dla każdego współczynnika równania regresji wyznacza się wartość testową t_k i porównuje z wartością krytyczną t_{kr} , odczytaną z tablic, przy założonym poziomie istotności α i liczbie stopni swobody wyliczonej jako:

$$f = N(r - 1) \quad (4.11)$$

gdzie:

N – całkowita liczba doświadczeń,

r – liczba pomiarów równoległych (powtórzeń).

W wyznaczonych równaniach regresji uwzględnia się tylko te współczynniki, które są istotne i spełniają zależność:

$$t_k > t_{kr(\alpha, f)} \quad (4.12)$$

Badania doświadczalne zrealizowano na podstawie eksperymentu planowanego, rotatabilnego, pięciopoziomowego Hartley'a (tabela 4.5). Planowanie rotatabilne posiada wariancję uzależnioną tylko od odległości od punktu centralnego eksperymentu. Z tego względu plany rotatabilne znalazły szeroką implementację w realizacji badań doświadczalnych w dziedzinie technologii maszyn. Podstawą planu pięciopoziomowego są w większości przypadków plany dwupoziomowe całkowite (typu 2^S) lub ułamkowe (typu 2^{S-K}), które są uzupełnione o doświadczenia w punkcie centralnym planu oraz w ramionach gwiazdnych α . Warunek rotatabilności jest spełniony, gdy wartość ramienia gwiazdowego w planie całkowitym posiada wartość [232]:

$$\alpha = \sqrt[4]{2^S} \quad (4.13)$$

Z kolei plan ułamkowy jest rotatabilny, gdy wartość ramienia gwiazdowego wynosi:

$$\alpha = \sqrt[4]{2^{S-K}} \quad (4.14)$$

gdzie:

S – całkowita liczba zmiennych wejściowych,

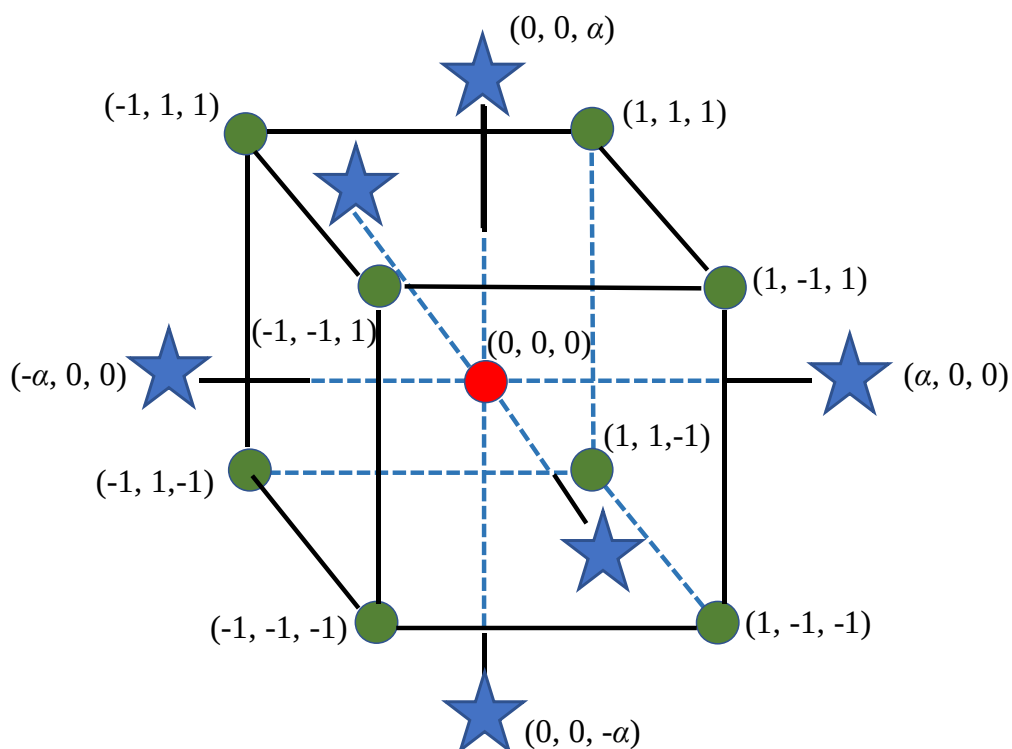
K – liczba parametrów identyfikująca badany model.

W przyjętym planie eksperymentu czynniki wejściowe (badane zmienne niezależne) były kodowane w trzech blokach doświadczeń (rys. 4.12) [229]:

- powtórzenia ułamkowe doświadczenia (tzw. kontrast przyjmujący wartości 1 i -1),
- doświadczenia w punktach gwiazdnych, które są oddalone symetrycznie na każdej osi o wartość $\pm \alpha$ od punktu centralnego planu,
- doświadczenia w punkcie centralnym planu.

Tabela 4.5. Plan Hartley'a rotabilny, pięciopoziomowy, trzyczynnikowy

Nr próby	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	1
3	-1	1	-1
4	-1	1	1
5	1	-1	-1
6	1	-1	1
7	1	1	-1
8	1	1	1
9	-1,68	0	0
10	1,68	0	0
11	0	-1,68	0
12	0	1,68	0
13	0	0	-1,68
14	0	0	1,68
15	0	0	0
16	0	0	0



Rys. 4.12. Graficzna interpretacja planu rotabilnego, pięciopoziomowego, trzyczynnikowego

Mańczak [230] w swojej pracy podał zestawienie wartości ramienia gwiazdnego α , zalecaną liczbę doświadczeń N_0 w punkcie centralnym oraz całkowitą liczbę doświadczeń n , w zależności od liczby zmiennych wejściowych S (tabela 4.6). Liczba zmiennych wejściowych w niniejszych badaniach doświadczalnych wyniosła $S = 3$. Zastosowano zalecaną długość ramienia gwiazdnego o wartości $\alpha = 1,68$. Przyjęto arbitralnie dwa powtórzenia w punkcie centralnym ($N_0 = 2$). Całkowita liczba doświadczeń wyniosła $n = 16$.

Tabela 4.6. Zestawienie optymalnych wartości i parametrów dla planu rotatabilnego [230]

S	2	3	4	5	6
α	1,414	1,682	2,000	2,378	2,828
N_0	2	6	7	10	15
n	13	20	31	52	91

Na podstawie przeprowadzonych badań rozpoznawczych i wyznaczonych charakterystyk prądowo-napięciowych generatora elektrodrażarki przyjęto stabilne przedziały parametrów obróbki, które będą realizowane w ramach planowanego eksperymentu. Wyznaczone zakresy zmienności odpowiadają parametrom stosowanych w operacjach obróbki półwykończeniowej i wykończeniowej EDM. Wartości przyjętych zmiennych niezależnych wraz z odpowiadającymi im wartościami kodowanymi zawarto w tabeli 4.7. Przyjęto następujące przedziały zmienności parametrów wejściowych:

- natężenie prądu wyładowania I_c w przedziale: 1,7 – 5 A,
- czas wyładowania elektrycznego t_{on} w przedziale: 8 – 55 μs ,
- czas przerwy między impulsami t_{off} w przedziale: 6 – 75 μs .

Ustalono stałe wartości parametrów:

- napięcie otwarte $U_o = 220$ V,
- napięcie wyładowania $U_c = 25$ V.

Badano następujące parametry wyjściowe:

- wydajność objętościowa usuwania materiału MRR,
- względne zużycie elektrody roboczej TWR,
- wybrane parametry chropowatości powierzchni: S_a , S_z , S_t , S_{ds} , S_{fd} , S_{dr} ,
- wybrane parametry udziału nośnego powierzchni,
- analiza składu chemicznego warstwy wierzchniej,

- wybrane parametry struktury metalograficznej powierzchni: średnia grubość warstwy przetopionej,
- defekty warstwy wierzchniej: m.in. przypalenia i mikropęknięcia w warstwie wierzchniej,
- inne.

Tabela 4.7. Wartości zmiennych niezależnych zawartych w planowanym eksperymencie

Lp.	Plan eksperymentu					
	I_c		t_{on}		t_{off}	
	[kod]	[A]	[kod]	[μs]	[kod]	[μs]
1	-1	2,7	-1	17	-1	19
2	-1	2,7	-1	17	1	51
3	-1	2,7	1	41	-1	19
4	-1	2,7	1	41	1	51
5	1	4	-1	17	-1	19
6	1	4	-1	17	1	51
7	1	4	1	41	-1	19
8	1	4	1	41	1	51
9	-1,68	1,7	0	30	0	37
10	1,68	5	0	30	0	37
11	0	3,8	-1,68	8	0	37
12	0	3,8	1,68	55	0	37
13	0	3,8	0	30	-1,68	6
14	0	3,8	0	30	1,68	75
15	0	3,8	0	30	0	37
16	0	3,8	0	30	0	37

Na podstawie uzyskanych danych z przeprowadzonych badań doświadczalnych wyznaczono statystyczne modele matematyczne opisujące wpływ badanych wielkości wejściowych na czynniki wyjściowe. Równania regresji zostały wyznaczone w programie STATISTICA 13.3 stosując metodę regresji krokowej wstecznej o zwiększonej precyzji. Dokonano prób aproksymacji uzyskanych wyników badań funkcjami regresji o różnej postaci, m.in. funkcją wielomianową, wykładniczą i logarytmiczną. W większości przypadków stwierdzono, iż najlepsze dopasowanie równania regresji do wyników otrzymanych badań doświadczalnych otrzymano dla funkcji w postaci wielomianu:

$$y_n = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2 + a_6x_3^2 + a_7x_1x_2 + a_8x_1x_3 + a_9x_2x_3 \quad (4.15)$$

gdzie:

y_n – wielkość wyjściowa,

a_0 – wartość stała w równaniu regresji,

$x_1 = I_c$ – natężenie prądu wyładowania [A],

$x_2 = t_{on}$ – czas wyładowania elektrycznego [μs],

$x_3 = t_{off}$ – czas przerwy między impulsami [μs],

$a_1, \dots, a_9$ – współczynniki regresji.

5. BADANIA WPŁYWU WIELKOŚCI ZIARNA ELEKTROD GRAFITOWYCH NA WSKAŹNIKI TECHNOLOGICZNE

Analiza wskaźników technologicznych ma na celu racjonalny dobór odpowiednich parametrów obróbki oraz materiału elektrod uwzględniając aspekty ekonomiczne procesu drążenia elektroerozyjnego. Monitorowanie przebiegu charakterystyk prądowo-napięciowych generatora drążarki z wykorzystaniem toru pomiarowego umożliwia wyznaczenie zależności pomiędzy rzeczywistymi parametrami obróbki a wskaźnikami technologicznymi procesu EDM. W celu prognozowania efektów obróbki buduje się stosowne modele statystyczne w postaci zależności empirycznych, które umożliwią dobór najbardziej korzystnych parametrów obróbki w zależności od oczekiwanej wydajności procesu oraz zużycia narzędzia. Wyznaczone zależności mogą zostać uogólnione i zaadoptowane we współczesnych drążarkach elektroerozyjnych.

Przeprowadzono badania doświadczalne wpływu charakteru impulsów elektrycznych oraz polaryzacji elektrod grafitowych o różnej wielkości ziarna na wydajność objętościową drążenia oraz względne zużycie elektrody roboczej.

Badania doświadczalne zostały zrealizowane na obrabiarce elektroerozyjnej wgłębnej Form 2-LC ZNC firmy Charmilles. Poddano drążeniu elektroerozyjnemu próbki ze stopu Hastelloy C-22. Zastosowano jako elektrody robocze dwa materiały grafitowe o wysokiej izotropowości i wielkości ziarna: 1 μm (AF-5) oraz 10 μm (S-180). Z uwagi na dużą liczbę doświadczeń, realizowanych w ramach eksperymentu planowanego, przyjęto głębokość drążenia dla każdego zestawu parametrów równą $a_p = 0,5 \text{ mm}$. Zastosowano model tzw. drążenia swobodnego, w którym elektroda robocza pracowała wyłącznie powierzchnią czołową, w celu wyeliminowania wpływu zmienności warunków obróbki wgłębnej EDM związanej ze zmianą głębokości drążenia i występowaniem dodatkowych wyładowań elektrycznych na bocznych powierzchniach elektrody.

Badania były realizowane dla parametrów odpowiadającym warunkom obróbki półwykończeniowej i wykończeniowej EDM na podstawie planowanego eksperymentu Hartley'a rotatabilnego, pięciopoziomowego, trzyparametrowego. Badania zostały zrealizowane zgodnie z przyjętymi zmiennymi, opisanymi w planowanym eksperymencie. W tabeli 5.1 przedstawiono warunki obróbki realizowane w ramach eksperymentu planowanego.

Tabela 5.1. Warunki badań doświadczalnych

Parametry wejściowe monitorowane i rejestrowane w trakcie procesu	
Natężenie prądu wyładowania I_c	1,7 – 5 A
Czas wyładowania elektrycznego t_{on}	8 – 50 μ s
Czas przerwy między impulsami t_{off}	6 – 75 μ s
Parametry wejściowe ustalone	
Napięcie wyładowania U_c	25 V
Napięcie otwarte U_o	225 V
Głębokość drążenia a_p	0,5 mm
Dielektryk	EDMfluid 108 MP-SE
Polaryzacja	prosta (+) i odwrócona (-)

Wydajność objętościowa drążenia oraz względne zużycie elektrody roboczej są podstawowymi parametrami determinującymi ekonomiczność obróbki. Ich wartości są ściśle skorelowane z parametrami elektrycznymi, materiałem i polaryzacją elektrod oraz stopniem zanieczyszczenia szczeliny międzyelektrodowej [1, 233].

Wydajność objętościową drążenia MRR (*Material Removal Rate*) określono na podstawie zależności:

$$MRR = \frac{m_{1PO} - m_{2PO}}{\rho_{PO} \cdot \Delta t} \left[\frac{mm^3}{min} \right] \quad (5.1)$$

gdzie:

- m_{1PO} – masa przedmiotu przed obróbką [g],
- m_{2PO} – masa przedmiotu po obróbce [g],
- ρ_{PO} – gęstość przedmiotu obrabianego [g/mm^3],
- Δt – czas drążenia próbki na głębokość 0,5 mm [min].

Względne zużycie elektrody roboczej TWR (*Tool Wear Rate*) wyliczono jako stosunek objętości materiału usuniętego z elektrody roboczej Q_{ER} oraz przedmiotu obrabianego Q_{PO} :

$$TWR = \frac{Q_{ER}}{Q_{PO}} \cdot 100 = \frac{(m_{1ER} - m_{2ER}) \cdot \rho_{PO}}{(m_{1PO} - m_{2PO}) \cdot \rho_{ER}} \cdot 100 [\%] \quad (5.2)$$

gdzie:

- m_{1ER} – masa elektrody roboczej przed obróbką [g],
- m_{2ER} – masa elektrody roboczej po obróbce [g],
- ρ_{ER} – gęstość elektrody roboczej [g/mm³].

Ubytek masowy elektrody roboczej oraz przedmiotu obrabianego był wyznaczony na podstawie pomiaru masy próbek przed i po badaniu eksperymentalnym przy użyciu precyzyjnej laboratoryjnej wagi elektronicznej WPS 50/C/2 firmy RADWAG. Pomiar dla każdej próbki były powtarzane trzykrotnie po czym wyznaczono wartość średnią. Z uwagi na penetrację nafty w pory znajdujące się w graficie, pomiar ubytku masowego elektrody roboczej po obróbce poprzedzało wielogodzinne suszenie w podwyższonej temperaturze (~70 °C). Poszczególne wyniki uzyskanych wskaźników technologicznych dla polaryzacji prostej i odwróconej przedstawiono w tabeli 5.2 i 5.3.

Tabela 5.2. Zestawianie analizowanych parametrów wejściowych: wydajności objętościowej drążenia MRR oraz względnego zużycia elektrody roboczej TWR dla polaryzacji prostej (+)

Polaryzacja prosta (+)							
Lp.	I_c [A]	t_{on} [μs]	t_{off} [μs]	AF-5		S-180	
				MRR [mm ³ /min]	TWR [%]	MRR [mm ³ /min]	TWR [%]
1	2,7	17	19	0,74	26,48	0,84	30,04
2	2,7	17	51	0,57	24,44	0,64	29,16
3	2,7	41	19	1,13	4,43	1,19	5,12
4	2,7	41	51	0,89	5,63	0,92	5,99
5	4	17	19	1,46	18,62	2,82	20,26
6	4	17	51	1,64	17,46	1,84	20,11
7	4	41	19	3,10	2,99	3,40	3,62
8	4	41	51	2,59	4,29	2,82	5,21
9	1,7	30	37	0,26	16,03	0,26	20,03
10	5	30	37	3,81	7,57	4,21	8,82
11	3,8	8	37	0,86	36,44	0,99	39,46
12	3,8	55	37	2,87	-1,87	2,99	1,11
13	3,8	30	6	2,59	4,59	2,81	9,59
14	3,8	30	75	1,64	7,35	1,75	10,09
15	3,8	30	37	1,96	7,81	2,08	13,14
16	3,8	30	37	1,80	7,77	2,22	12,90

Tabela 5.3. Zestawianie analizowanych parametrów wejściowych: wydajności objętościowej drążenia MRR oraz względnego zużycia elektrody roboczej TWR dla polaryzacji odwróconej (-)

Polaryzacja odwrócona (-)							
Lp.	I_c [A]	t_{on} [μs]	t_{off} [μs]	AF-5		S-180	
				MRR [mm ³ /min]	TWR [%]	MRR [mm ³ /min]	TWR [%]
1	2,7	17	19	2,60	116,38	3,02	84,03
2	2,7	17	51	2,04	77,41	1,82	81,47
3	2,7	41	19	2,84	103,60	2,01	120,20
4	2,7	41	51	3,76	81,73	3,30	86,03
5	4	17	19	3,43	59,97	3,17	150,00
6	4	17	51	4,83	50,58	4,34	54,12
7	4	41	19	3,96	69,31	2,33	90,41
8	4	41	51	9,66	49,17	8,40	50,48
9	1,7	30	37	0,95	203,59	0,84	207,59
10	5	30	37	10,21	46,19	7,95	51,99
11	3,8	8	37	2,59	61,82	2,30	66,42
12	3,8	55	37	4,92	68,01	4,91	71,13
13	3,8	30	6	2,75	78,18	3,26	79,05
14	3,8	30	75	5,18	51,96	4,71	55,19
15	3,8	30	37	7,52	54,94	6,03	58,30
16	3,8	30	37	7,97	53,97	6,49	56,18

5.1. Modele statystyczne MRR i TWR

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych opracowano statystyczne modele matematyczne opisujące wpływ analizowanych parametrów obróbki na wydajność objętościową drążenia oraz względne zużycie elektrody roboczej. Wyznaczono równania regresji w postaci wielomianu drugiego stopnia w programie STATISTICA 13.3, opisujące wpływ czynników wejściowych na badane wskaźniki technologiczne. Dla każdego równania określono współczynnik korelacji R , odzwierciedlający zmienność badanej cechy. Istotność wyznaczonego współczynnika korelacji była weryfikowana testem Fishera - Snedecora na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Współczynnik R jest istotny, kiedy zachodzi zależność $F/F_{kr} > 1$. Za pomocą testu t-Studenta dokonano weryfikacji istotności współczynników równania regresji. Jeśli na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ spełniony jest warunek: $t_k > t_{kr}$ to współczynnik konkretnego członu równania regresji jest istotny. Wyniki wyznaczonych zależności

regresyjnych zawarto w tabeli 5.4 i 5.5, a ich graficzną interpretację przedstawiono na rys. 5.1 – 5.3.

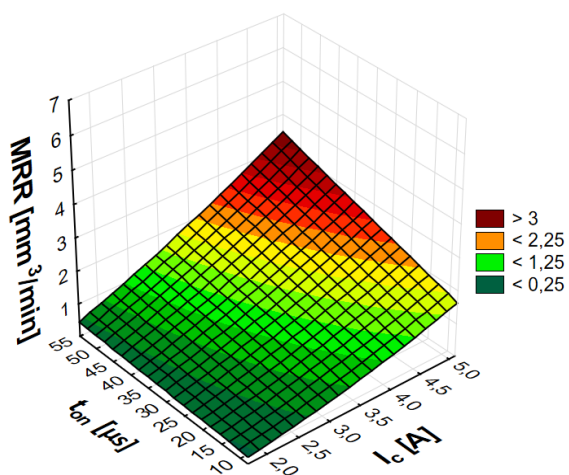
Tabela 5.4. Równania regresji opisujące wskaźniki technologiczne dla polaryzacji prostej

Polaryzacja prosta (+)			
Materiał elektrody	Równanie regresji	R	F/F_{kr}
AF-5	$MRR = 0,03 + 0,05 \cdot I_c^2 + 0,01 \cdot I_c \cdot t_{on} - 0,0003 \cdot t_{on} \cdot t_{off}$	0,98	9,6
	$TWR = 59 - 3,1 \cdot I_c - 1,8 \cdot t_{on} + 0,02 \cdot t_{on}^2$	0,98	9,3
S-180	$MRR = -0,5 + 0,2 \cdot I_c^2 + 0,009 \cdot I_c \cdot t_{on} - 0,005 \cdot I_c \cdot t_{off}$	0,98	12
	$TWR = 63 - 0,4 \cdot I_c - 1,8 \cdot t_{on} + 0,02 \cdot t_{on}^2$	0,98	10,4

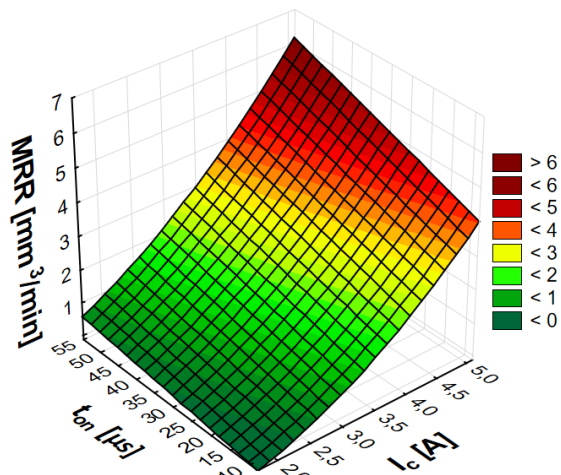
Tabela 5.5. Równania regresji opisujące wskaźniki technologiczne dla polaryzacji odwróconej

Polaryzacja odwrócona (-)			
Materiał elektrody	Równanie regresji	R	F/F_{kr}
AF-5	$MRR = -0,02 - 0,003 \cdot t_{off}^2 + 0,06 \cdot I_c \cdot t_{off} + 0,002 \cdot t_{on} \cdot t_{off}$	0,91	2,17
	$TWR = 429 - 162 \cdot I_c - 0,5 \cdot t_{off} + 18 \cdot I_c^2$	0,96	5,8
S-180	$MRR = 0,5 - 0,005 \cdot t_{on}^2 - 0,001 \cdot t_{off}^2 + 0,06 \cdot I_c \cdot t_{on} + 0,005 \cdot t_{on} \cdot t_{off}$	0,92	2,5
	$TWR = 388 - 143 \cdot I_c + 18 \cdot I_c^2 - 0,2 \cdot I_c \cdot t_{off}$	0,82	1,1

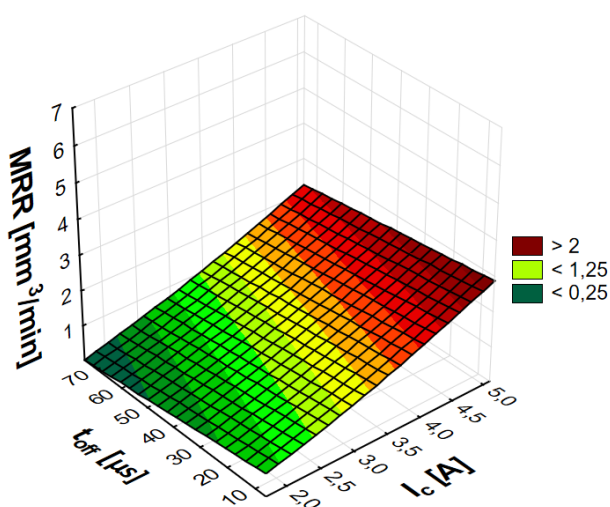
Uzyskane równania regresji dla badanych wskaźników technologicznych charakteryzują się wysokim stopniem korelacji R , a stosunek F/F_{kr} w każdym przypadku jest większy od jedności. Poprawność wyznaczonych modeli matematycznych została również zweryfikowana analizą reszt. Na rys. 5.4 i 5.5 przedstawiono przykładowe wykresy reszt w funkcji wartości obserwowanych. Najlepszą predykcję zmiennej zależnej reprezentuje linia regresji, czyli wartości przewidywane. Każde odchylenie punktu od linii regresji nosi nazwę wartości resztkowej. Badane zjawiska fizyczne nie są przewidywane w sposób idealny i zazwyczaj istnieją pewne odchylenia punktów pomiarowych od linii regresji. Dla wyznaczonych modeli statycznych obserwuje się niewielkie rozrzuty między wartościami obserwowanymi a przewidywanymi. Większość punktów pomiarowych zawiera się w granicach przyjętego przedziału ufności 95% lub znajduje się w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Świadczy to o wysokiej wiarygodności wyznaczonych modeli statystycznych oraz istotnym wpływie przyjętych parametrów wejściowych na badane wielkości wyjściowe.



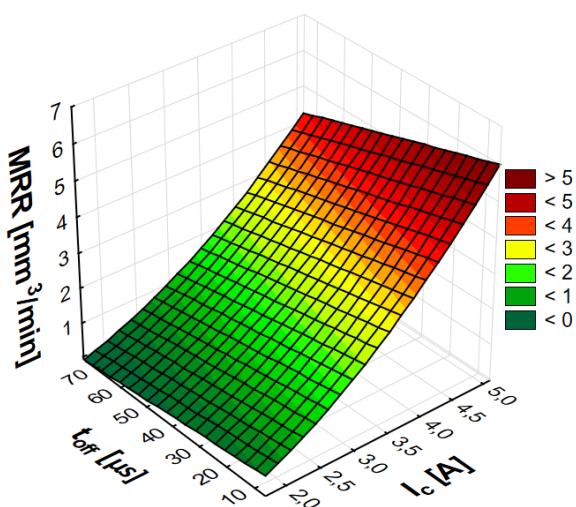
(a)



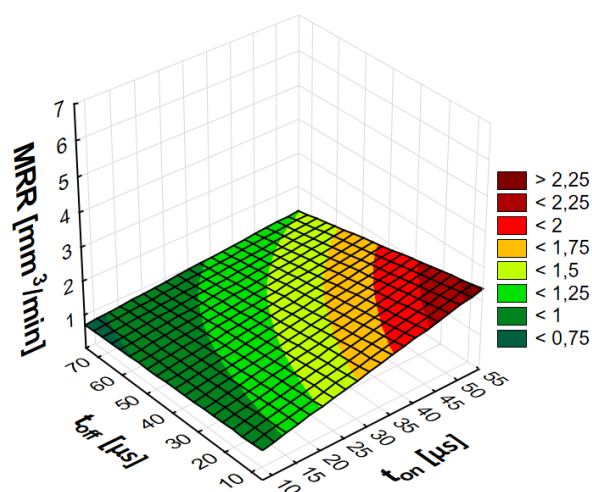
(b)



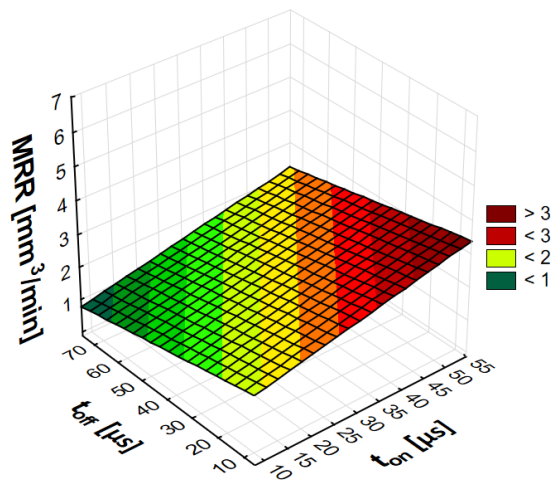
(c)



(d)



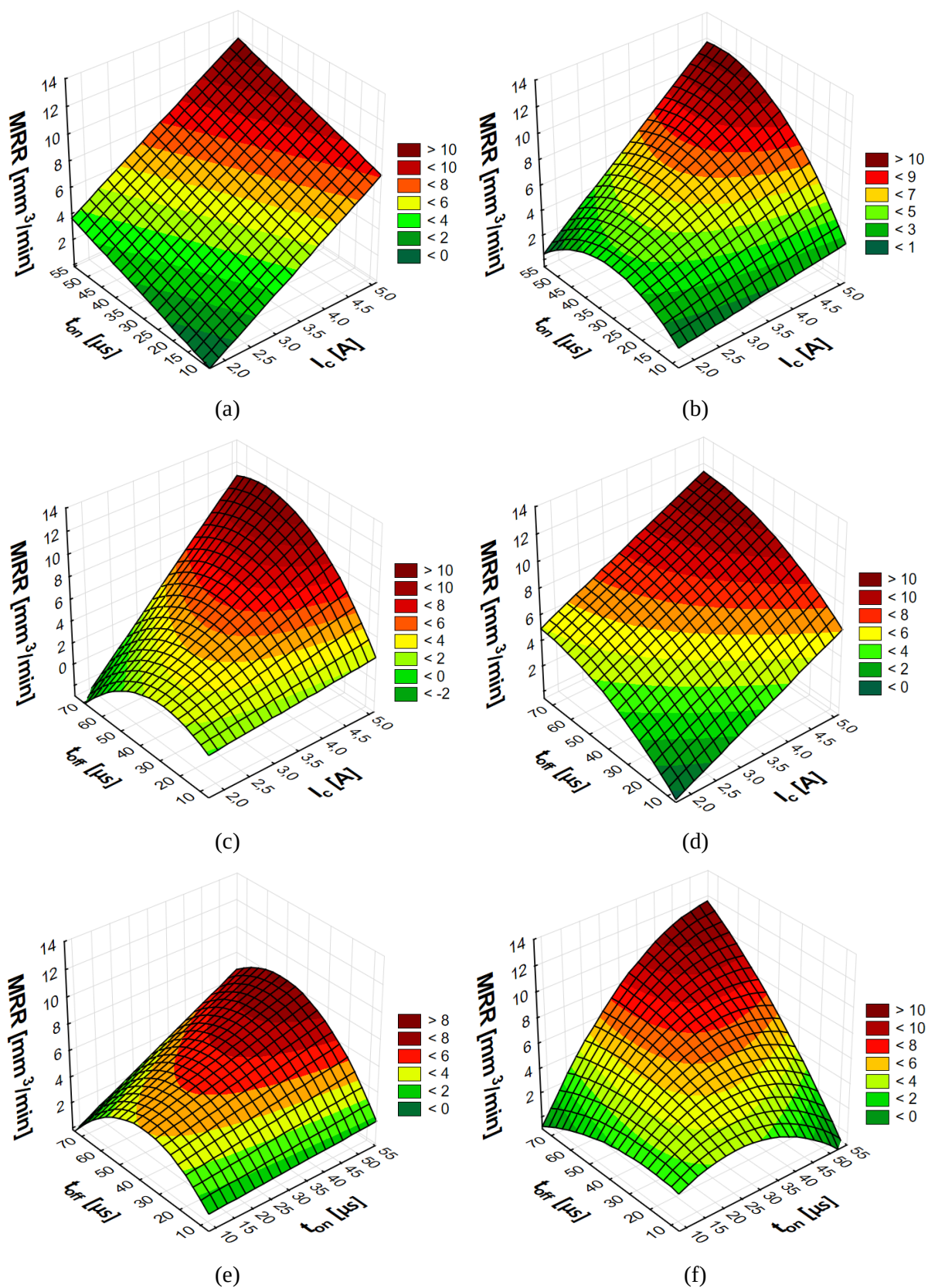
(e)



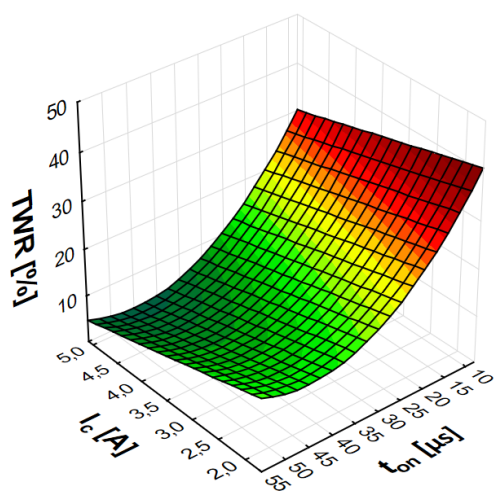
(f)

Rys. 5.1. Zależność wydajności objętościowej drążenia MRR od natężeniu prądu I_c , czasu wyładowania t_{on} i czasu przerwy t_{off} dla polaryzacji prostej, materiał elektrody:

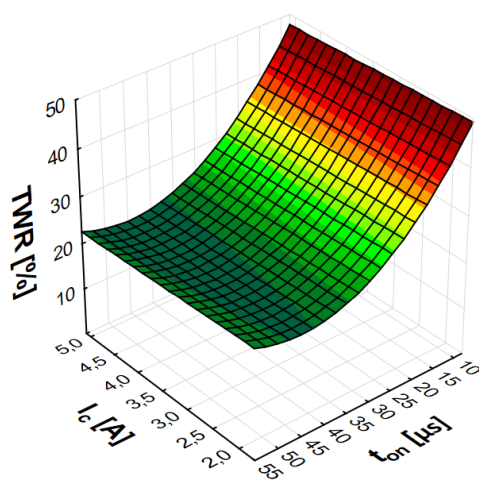
a, c, e) AF-5; b, d, f) S-180



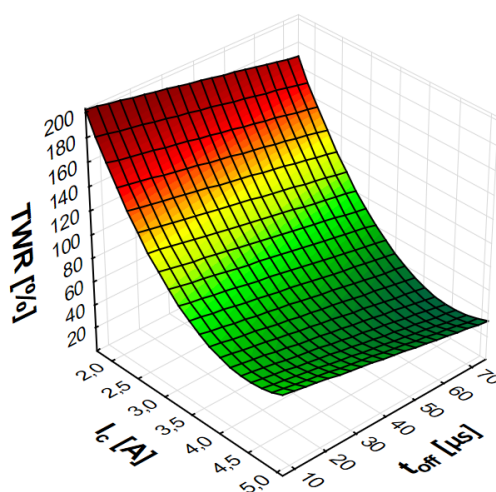
Rys. 5.2. Zależność wydajności objętościowej drążenia MRR od natężeniu prądu I_c , czasu wyładowania t_{on} i czasu przerwy t_{off} dla polaryzacji odwróconej, materiał elektrody:
a, c, e) AF-5; b, d, f) S-180



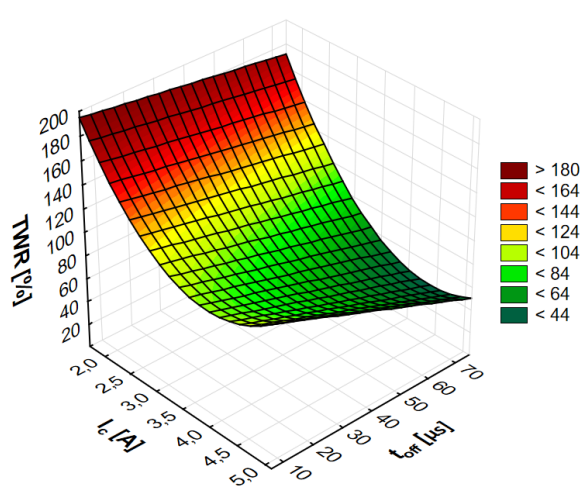
(a)



(b)

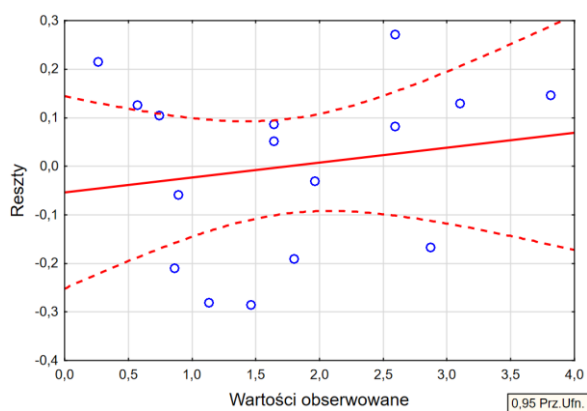


(c)

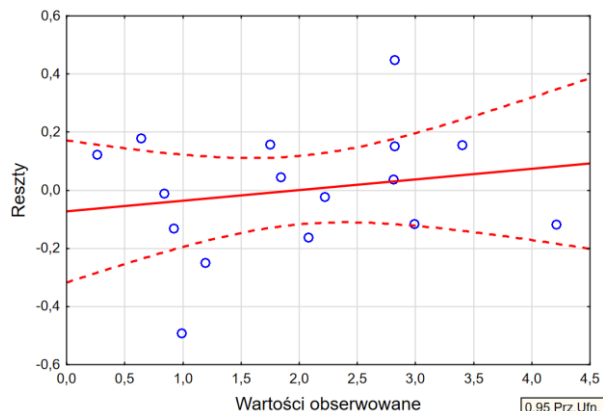


(d)

Rys. 5.3. Zależność względnego zużycia elektrody roboczej TWR od natężeniu prądu I_c , czasu wyładowania t_{on} i czasu przerwy t_{off} dla polaryzacji prostej (a i b) i odwróconej (c i d), materiał elektrody: a, c) AF-5; b, d) S-180

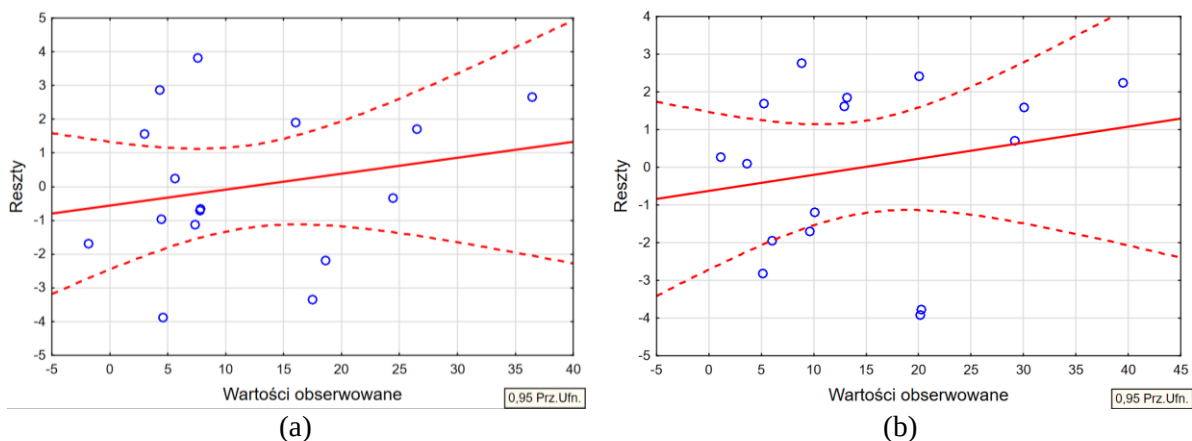


(a)



(b)

Rys. 5.4. Wykres reszt w funkcji wartości obserwowanych dla równania MRR (polaryzacja prosta) i elektrody: a) AF-5, b) S-180



Rys. 5.5. Wykres reszt w funkcji wartości obserwowanych dla równania TWR (polaryzacja prosta) i elektrody: a) AF-5, b) S-180

5.1.1. Analiza uzyskanych wyników badań wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych na wydajność objętościową drążenia

Analiza uzyskanych wyników badań doświadczalnych wykazuje, iż wydajność objętościowa drążenia oraz względne zużycie elektrody roboczej zmieniają się w szerokim zakresie i ściśle zależą od parametrów elektrycznych, biegunowości oraz wielkości ziarna elektrod grafitowych. Przy biegunowości dodatniej wydajność objętościowa usuwania materiału dla elektrody AF-5 zawiera się w przedziale $MRR = 0,26 - 3,81 \text{ mm}^3/\text{min}$, natomiast dla elektrody S-180 wynosi $MRR = 0,26 - 4,21 \text{ mm}^3/\text{min}$. Biegunowość ujemna powoduje znaczący wzrost wydajności procesu. W przypadku elektrody AF-5 zakres wydajności objętościowej wynosi $MRR = 0,95 - 10,21 \text{ mm}^3/\text{min}$, a dla grafitu S-180 zakres ten zawiera się w przedziale $MRR = 0,84 - 7,95 \text{ mm}^3/\text{min}$.

Wydajność objętościowa drążenia w głównej mierze uzależniona jest od natężenia prądu oraz w mniejszym stopniu od czasu wyładowania elektrycznego i czasu przerwy między impulsami. Zasadniczo wartość MRR wzrasta wraz ze wzrostem natężenia prądu, co może zostać wyjaśnione ilością ciepła doprowadzonego do materiału. Wraz ze wzrostem prądu wyładowania rośnie zarówno liczba, jak i prędkość elektronów oraz dodatnio naładowanych jonów w szczelinie. Jony oraz elektrony zderzają się z powierzchnią elektrod prowadząc do wysokiego wzrostu temperatury, co przyspiesza tempo topnienia, parowania i sublimacji materiału obrabianego. Dodatkowo wrasta liczba i ciśnienie pęcherzyków gazu, które w wyniku implozji, po zakończeniu wyładowania elektrycznego, usuwają roztopiony materiał z krateru. Przy niskich wartościach natężenia prądu generowana jest niewielka ilość ciepła, która

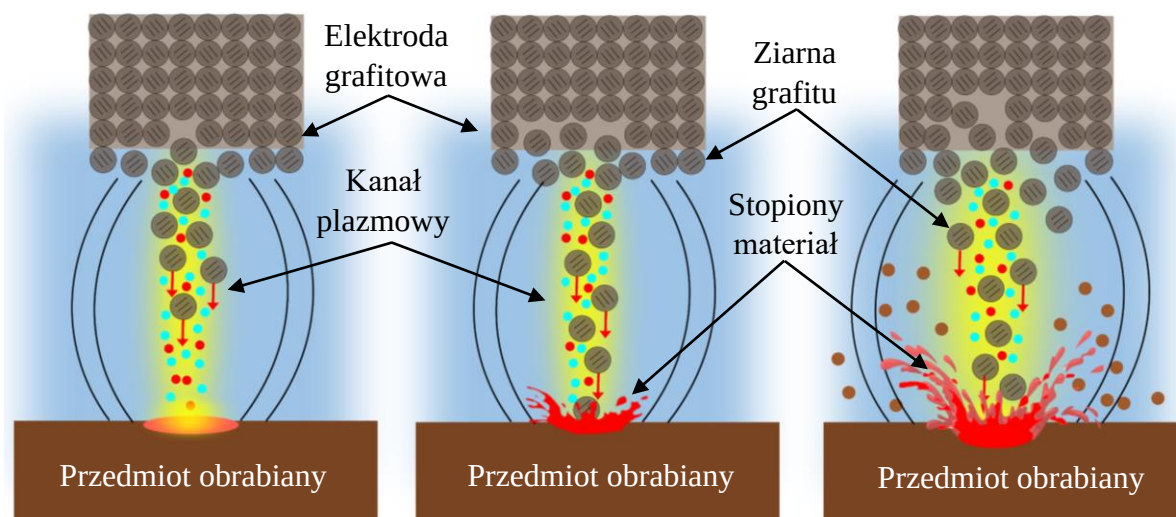
powoduje wyerodowanie niewielkiej objętości materiału. W dodatku część tego ciepła odprowadzana jest do przepływającego przez szczelinę dielektryka, a pozostała do przedmiotu.

Dla polaryzacji dodatniej i ujemnej oddziaływanie natężenia prądu na wydajność objętościową drażenia ma tę samą tendencję, podczas gdy wpływ czasu wyładowania i czasu przerwy między impulsami różni się w zależności od zastosowanej biegunowości. W przypadku polaryzacji prostej wydłużenie czasu wyładowania zwiększa wydajność usuwania materiału obrabianego zarówno dla elektrody AF-5 oraz S-180. Wyjaśnia się to dłuższym oddziaływaniem kanału plazmowego, który indukuje intensywny dopływ ciepła do powierzchni elektrod, co powoduje zwiększenie objętości roztopionego materiału. Wydłużenie czasu przerwy między impulsami spowalnia proces erozji z powodu strat ciepła i chłodzenia rozgrzanej objętości materiału przez ciecz dielektryczną.

W trakcie obróbki z biegunowością prostą elektroda grafitowa o wielkości ziarna $10\ \mu\text{m}$ zapewniła większą wydajność usuwania materiału niż elektroda grafitowa o rozmiarze ziarna $1\ \mu\text{m}$. Przy tych samych ustalonych parametrach obróbki elektroda S-180, w porównaniu z grafitem AF-5, zapewniła średni wzrost wydajności od 2 do nawet 13 %.

Na podstawie obszernego przeglądu literatury stwierdzono, iż przewodność elektryczna elektrody roboczej jest dominującą właściwością materiału wpływającą na wydajność elektrodrażenia. Uwzględniając właściwości elektryczne obu elektrod, grafit S-180 charakteryzuje się mniejszą rezystywnością niż grafit AF-5. Oznacza to, że elektroda gruboziarnista zapewnia dostarczenie większej ilości energii elektrycznej do strefy obróbki niż grafit AF-5, powodując tym samym zwiększenie intensywności wyładowań elektrycznych w szczelinie i wzrost objętości przetopionego materiału.

Ze względu na wysoką temperaturę sublimacji i niską gęstość pozorną grafitu ma on tendencje do utraty cząstek z elektrody w trakcie procesu elektroerozji. Szczególnie jest to zauważalne w przypadku grafitów o dużych ziarnach i porowatościach. Oderwane ziarna grafitu przemieszczają się między katodą i anodą w szczelinie międzyelektrodowej w wyniku oddziaływania pola elektrycznego. Cząsteczki te mogą zderzać się z przetopioną objętością materiału przez kanał plazmowy i usuwać go z powstałego sferycznego krateru (rys. 5.6). Opisane zjawisko zaobserwowali brazylijscy naukowcy z Uniwersytetu w Parana [147]. Częste odrywanie się dużych ziaren grafitu S-180 może zapewnić większą energię uderzenia w jezioro roztopionego materiału na powierzchni obrabianej niż mniejsze ziarna grafitu AF-5.

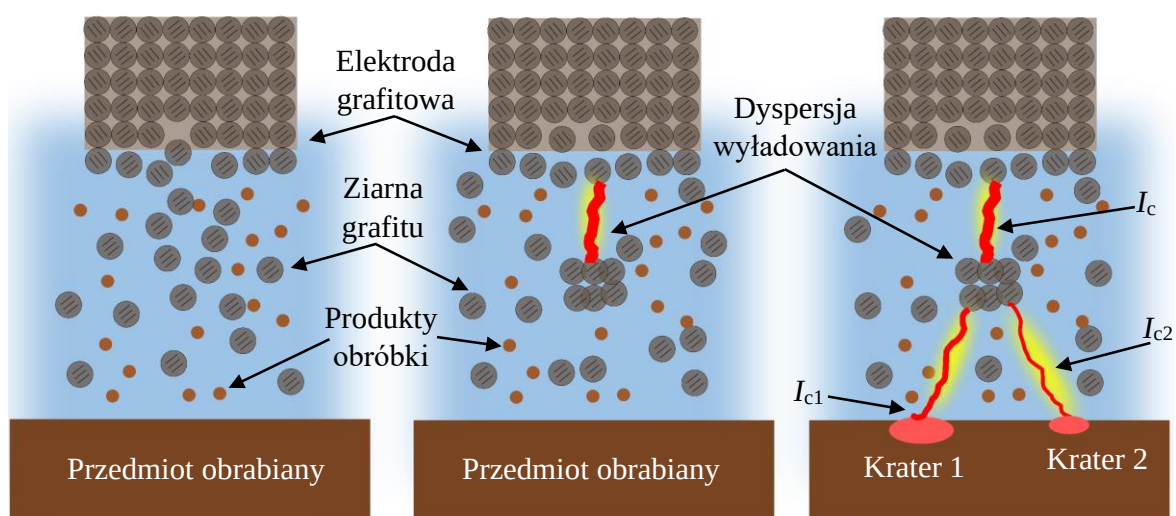


Rys. 5.6. Schemat mechanizmu odrywania ziaren grafitu i usuwania stopionego materiału z krateru

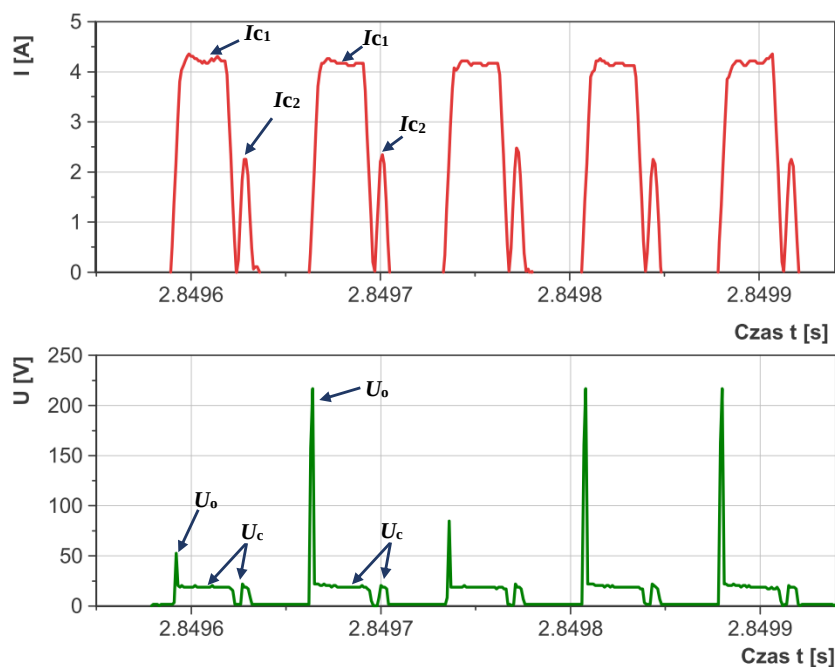
Przedostające się do szczeliny międzyelektrodowej ziarna grafitu, na skutek zużycia elektrody roboczej, mogą także wpływać na zmianę charakteru wyładowania elektrycznego, co zostało zarejestrowane na przykładowym przebiegu napięciowo-prądowym (rys. 5.7 i 5.8). Pod wpływem wyładowań elektrycznych ziarna grafitu przemieszczają się w sposób chaotyczny w szczelinie. Częstki te mogą pojawiać się w różnych miejscach w postaci łańcuchów i tworzyć mostki napięciowe pomiędzy anodą i katodą. Efekt mostkowania elektrod zmniejsza napięcie w szczelinie oraz wytrzymałość dielektryczną ośrodka. W rezultacie może dochodzić do dyspersji wyładowania elektrycznego na ziarnach grafitu i zainicjowania wyładowania o mniejszej energii elektrycznej. Zjawisko to może korzystnie wpłynąć na wzrost wydajności usuwania materiału z przedmiotu obrabianego. Podobne charakterystyki napięciowo-prądowe zaobserwowali naukowcy w trakcie drążenia elektroerozyjnego z dodatkiem proszku w dielektryku [21, 204, 205, 206, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241]. Opisane zjawisko ma charakter losowy i może zajść przy odpowiednim stężeniu ziaren grafitu w szczelinie. W przypadku zwiększonego zużycia elektrody roboczej i wysokiej wydajności obróbki, nadmiar ziaren i produktów erozji między katodą i anodą zwiększa prawdopodobieństwo powstania impulsu zwarcowego. W dostępnych publikacjach naukowych na temat obróbki elektroerozyjnej elektrodami grafitowymi badacze nie dostrzegli powyższych zjawisk. Może to wynikać z faktu, iż autorzy w trakcie przeprowadzanych badań eksperymentalnych nie monitorowali rzeczywistych przebiegów napięciowo-prądowych.

W przypadku polaryzacji odwróconej wydłużenie czasu wyładowania powoduje wzrost wydajności obróbki dla elektrody grafitowej AF-5. Zaobserwowano wyraźny przedział czasu przerwy między impulsami, dla którego wydajność obróbki osiąga najwyższe wartości dla

elektrody AF-5. Z uwagi na intensywną erozję i odrywanie się ziaren grafitu z elektrody przy polaryzacji ujemnej, zbyt krótki czas przerwy przed kolejnym wyładowaniem iskrowym uniemożliwi efektywne oczyszczenie szczeliny międzyelektrodowej z produktów erozji. Wydłużenie czasu przerwy między impulsami do wartości około $t_{off} = 35 - 40 \mu s$ zapewnia najkorzystniejsze warunki obróbki i największą wydajność usuwania materiału, w szczególności przy niskiej energii wyładowania elektrycznego. Dalsze wydłużenie czasu przerwy obniża wydajność obróbki z powodu chłodzenia materiału obrabianego przez naftę.



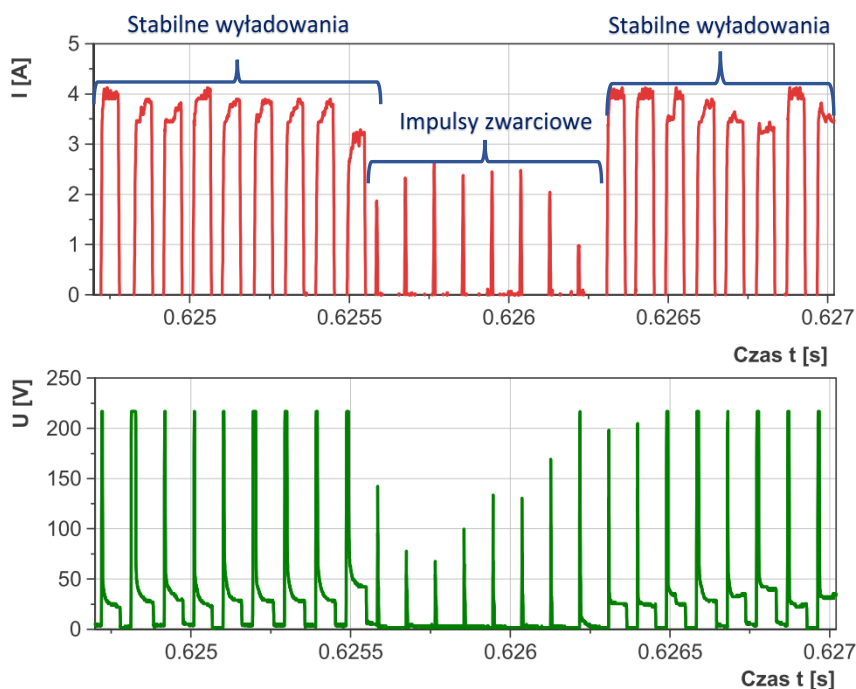
Rys. 5.7. Schemat dyspersji wyładowania elektrycznego w obróbce elektroerozyjnej



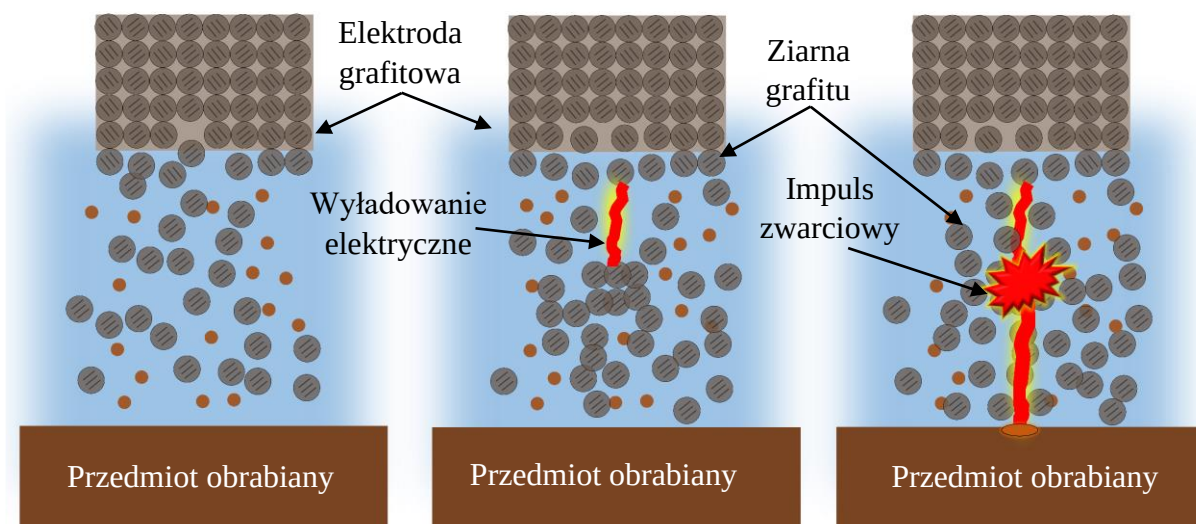
Rys. 5.8. Zarejestrowany przebieg prądowo-napięciowy dyspersji wyładowania elektrycznego dla elektrody AF-5 i wartości parametrów: $U_0 = 220 \text{ V}$, $U_c = 25 \text{ V}$, $I_c = 3,8 \text{ A}$, $t_{on} = 30 \mu s$, $t_{off} = 6 \mu s$, polaryzacja odwrócona (-)

Ze względu na bardzo intensywne zużycie elektrody S-180, przy polaryzacji odwróconej, wydłużenie czasu przerwy między impulsami wpływa na wzrost wydajności procesu. Zbyt krótkie czasy przerw między impulsami powodują destabilizację wyładowań elektrycznych z powodu zanieczyszczenia szczeliny przez ziarna grafitu i produkty erozji. Wydłużenie czasu wyładowania do wartości $t_{on} = 35 - 40 \mu s$ powoduje wzrost wydajności objętościowej drążenia, przy niskich wartościach natężenia prądu elektrycznego, następnie wartość MRR spada. Można to wytłumaczyć zjawiskiem chłodzenia niskoenergetycznego kanału plazmowego przez ciecz dielektryczną.

Uzyskane wyniki badań dla polaryzacji odwróconej wykazały wyższą wydajność procesu dla elektrody AF-5. Przy tych samych parametrach obróbki grafit AF-5 uzyskał średnio od 10 do nawet 40 % wyższą wydajność usuwania materiału niż elektroda S-180. Jest to spowodowane bezpośrednio z intensywnym użyciem elektrody S-180 w trakcie obróbki z polaryzacją ujemną. Nadmierne gromadzenie się dużych ziaren grafitu w szczelinie powoduje niejednorodne wyładowania elektryczne, które spowalniają proces erozji. Zaobserwowano to w trakcie analizy charakterystyk prądowo-napięciowych, na których zostały zarejestrowane impulsy zwarcia oraz łukowe (rys. 5.9 i 5.10). Grafit AF-5 zużywa się w mniejszym stopniu i zbudowany jest z mniejszych ziaren, które są łatwiej usuwane ze szczeliny międzyelektrodowej przez dielektryk i nie destabilizują wyładowań elektrycznych.



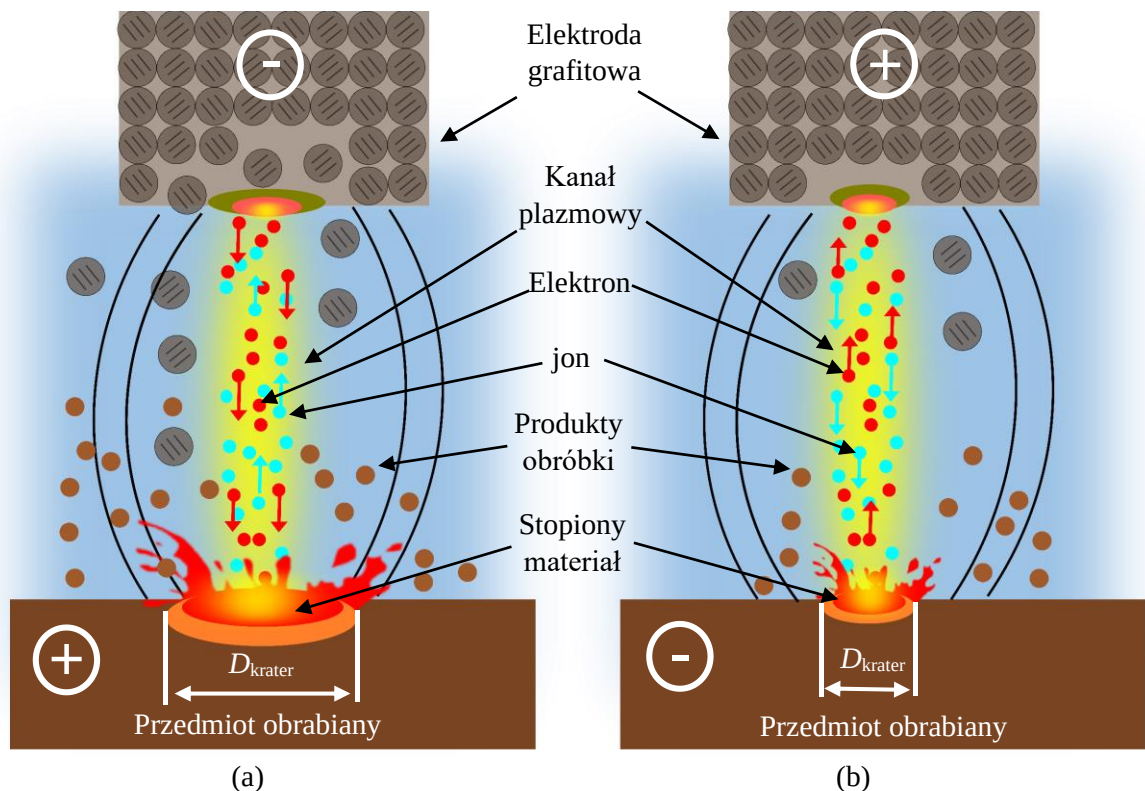
Rys. 5.9. Zarejestrowany przebieg prądowo-napięciowy impulsów zwarcia dla elektrody S-180 i wartości parametrów: $U_0 = 220 \text{ V}$, $U_c = 25 \text{ V}$, $I_c = 4 \text{ A}$, $t_{on} = 55 \mu s$, $t_{off} = 37 \mu s$, polaryzacja odwrócona (-)



Rys. 5.10. Schemat impulsu zwarcowego przy obróbce elektroerozyjnej

Na podstawie analizy wyników badań eksperymentalnych stwierdzono, że przy polaryzacji ujemnej osiągnięto wyższe wartości MRR niż przy polaryzacji dodatniej. Wyjaśnieniem uzyskanych wyników jest rozkład energii cieplnej na powierzchni obrabianej. Przy ujemnej polaryzacji elektrony bombardują powierzchnię przedmiotu obrabianego, podczas gdy jony zderzają się z powierzchnią elektrody roboczej (rys. 5.11). Elektrony są mniejsze i lżejsze od dodatnio naładowanych jonów, dlatego osiągają większe przyspieszenia w szczelinie. W konsekwencji elektrony przy polaryzacji odwróconej przenoszą więcej energii cieplnej do powierzchni przedmiotu, a tym samym przetapiają większą objętość materiału niż dodatnio naładowane jony przy polaryzacji prostej.

Wnioskuje się, iż wielkość ziarna elektrod grafitowych oddziałuje w złożony sposób na przebieg wyładowania elektrycznego oraz mechanizm erozji materiału. Jednym z podstawowych czynników determinujących wydajność obróbki jest stopień zanieczyszczenia szczeliny przez oderwane ziarna grafitu oraz ich wpływ na charakter i stabilność wyładowań elektrycznych. Czynnikiem ten jest również wysoko skorelowany z gęstością pozorną grafitu, która wpływa na wskaźnik zużycia narzędzia. Równie istotnym parametrem, który uzupełnia wielkość ziarna grafitu jest jego przewodność elektryczna. Grafity o większym ziarnie charakteryzują się z reguły mniejszą rezystancją, a więc zapewniają większą intensywność wyładowań elektrycznych w szczelinie. Powiązanie przewodności elektrycznej grafitu z wielkością ziarna oraz stopnia jego zużycia i zalegania w szczelinie oddziałuje na przebieg i czas erozji materiału.



Rys. 5.11. Schemat usuwania materiału w trakcie pojedynczego wyładowania elektrycznego przy polaryzacji: a) odwróconej, b) prostej

5.1.2. Analiza uzyskanych wyników badań wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych na względne zużycie elektrody roboczej

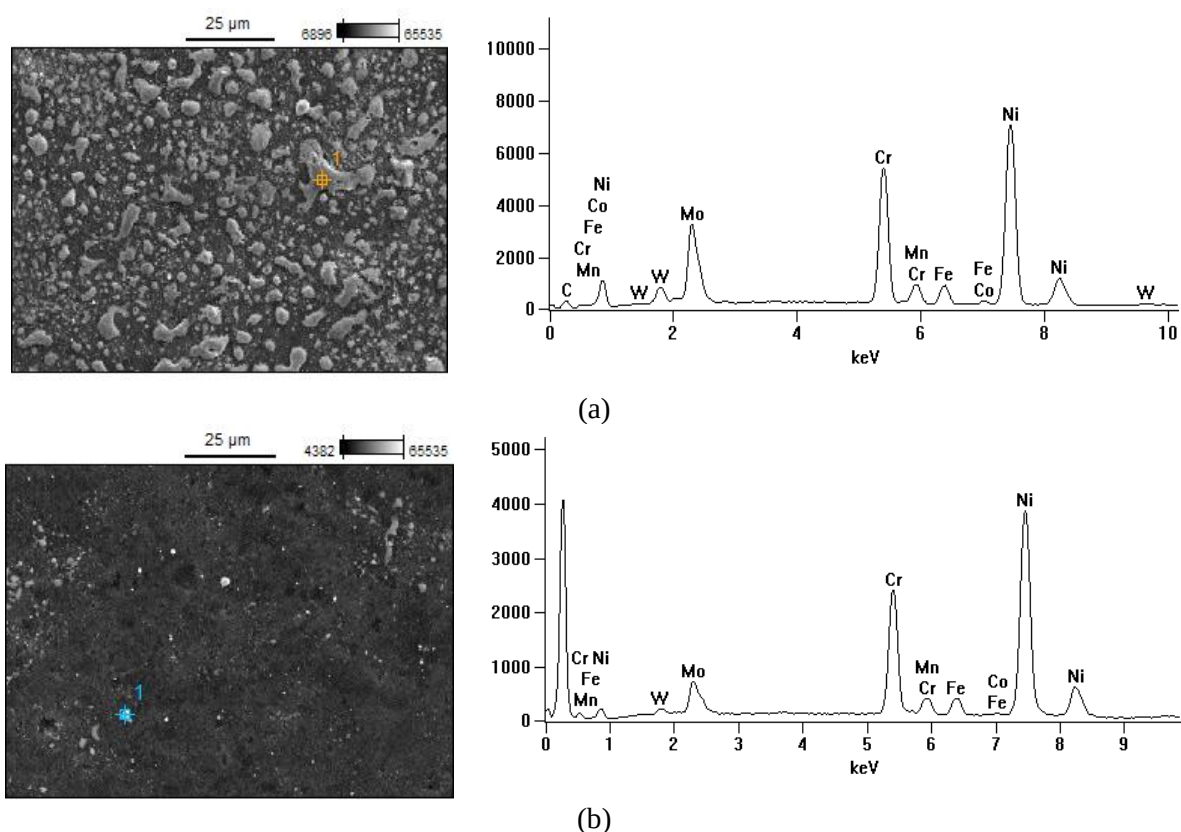
Tempo względnego zużycia elektrody grafitowej dla polaryzacji prostej mieści się w zakresie: $TWR = -1,87 - 36,44 \%$ dla elektrody AF-5 oraz $TWR = 1,11 - 39,46 \%$ dla elektrody S-180. Zaobserwowano znaczący wzrost zużycia ER dla biegunowości odwróconej, którego zakres wyniósł $TWR = 46,19 - 203,59 \%$ dla elektrody AF-5 oraz $TWR = 50,48 - 207,59 \%$ dla elektrody S-180. Zarówno przy polaryzacji ujemnej, jak i dodatniej grafit S-180 charakteryzował się większym stopniem zużycia niż grafit AF-5. Jest to spowodowane głównie mniejszą rezystywnością i gęstością pozorną grafitu S-180, a także większym rozmiarem porów w materiale.

Na zużycie elektrody roboczej przy biegunowości prostej znaczący wpływ mają czas wyładowania elektrycznego oraz natężenie prądu. W trakcie obróbki cząsteczki węgla z płynu dielektrycznego mogą dyfundować z grafitem na powierzchni ER i tworzyć warstwę ochronną zapobiegającą nadmiernemu zużyciu narzędzia. Warunki obróbki, które sprzyjają powstawaniu warstwy węgla na elektrodzie to długi czas wyładowania oraz krótki czas przerwy. Skrócenie

czasu wyładowania sprzyja zwiększonej erozji elektrody roboczej i jest dominującym parametrem wejściowym wpływającym na wartość wskaźnika TWR.

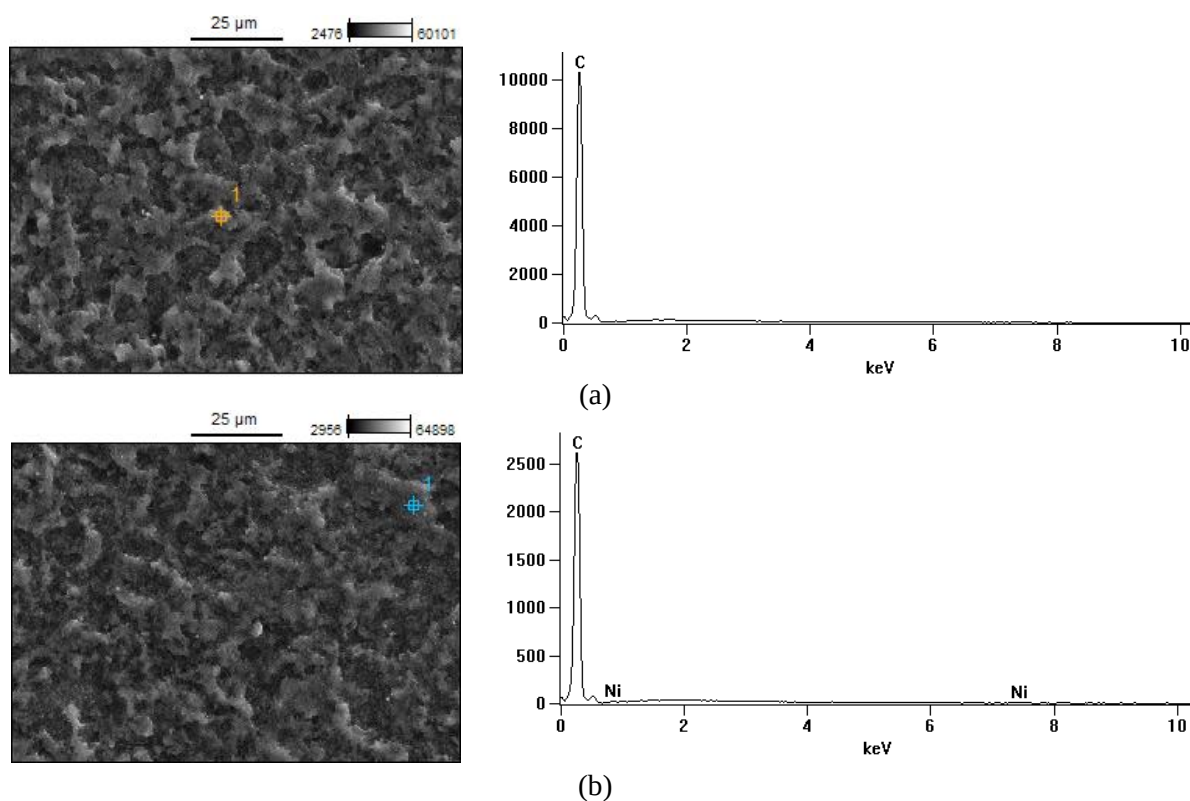
W celu kompleksowego poznania mechanizmu zużycia elektrod grafitowych w procesie EDM przeprowadzono analizę składu chemicznego wybranych powierzchni elektrod z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego Hitachi SU 3500 z modułem do analizy składu chemicznego EDS (*Energy Dispersion Spectroscopy*).

Najmniejszą wartość zużycia dla polaryzacji prostej zaobserwowano dla eksperymentu z najdłuższym czasem wyładowania elektrycznego $t_{on} = 55 \mu s$ (próbna 12). Osiągnięto tu praktycznie zerowe zużycie ER. Na podstawie analizy widma EDS stwierdzono obecność na powierzchni ER pierwiastków przedmiotu obrabianego (białe obszary), głównie niklu, chromu i molibdenu, które dodatkowo ochraniają powierzchnie elektrody przed nadmiernym zużyciem i zwiększają masę próbki po badaniu (rys. 5.12a). Przy krótkim czasie wyładowania $t_{on} = 8 \mu s$ procentowa zawartość wagowa poszczególnych pierwiastków z przedmiotu obrabianego jest znacznie mniejsza (rys. 5.12b). W tym przypadku zużycie ER dla grafitu AF-5 osiągnęło najwyższą wartość $TWR = 36,5 \%$.



Rys. 5.12. Widmo EDS powierzchni elektrody grafitowej AF-5 po obróbce z polaryzacją prostą i nastawionymi parametrami: $I_c = 3,8 A$, $t_{off} = 37 \mu s$, a) $t_{on} = 55 \mu s$, b) $t_{on} = 8 \mu s$

Głównym czynnikiem determinującym wartość zużycia ER przy polaryzacji odwróconej jest natężenie prądu oraz w mniejszym stopniu czas przerwy między impulsami. Zasadniczo wzrost natężenia prądu przy ujemnej biegunowości sprzyja wydajnemu usuwaniu materiału oraz zmniejszeniu zużycia elektrody roboczej. Wskaźniki zużycia narzędzia przy biegunowości ujemnej są kilka razy większe od wartości uzyskanych przy polaryzacji dodatniej. Na podstawie analizy widma spektroskopowego, nie zaobserwowano na powierzchni elektrod pierwiastków pochodzących z materiału obrabianego (rys. 5.13). Częste odrywanie się ziaren grafitu przy polaryzacji ujemnej uniemożliwia adhezyjne osadzenie się pierwiastków przedmiotu obrabianego na katodzie, które mogłyby potencjalnie tworzyć warstwę ochronną zapobiegającą nadmiernemu zużyciu elektrody roboczej.



Rys. 5.13. Widmo EDS powierzchni elektrody grafitowej AF-5 po obróbce z polaryzacją prostą i nastawionymi parametrami: $t_{\text{on}} = 30 \mu\text{s}$, $t_{\text{off}} = 37 \mu\text{s}$, a) $I_c = 1,7 \text{ A}$, b) $I_c = 5 \text{ A}$

6. BADANIE WPLYWU WIELKOŚCI ZIARNA ELEKTROD GRAFITOWYCH I PARAMETRÓW OBRÓBK NA CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI PO EDM

Stan warstwy wierzchniej wytwarzanych przedmiotów uwarunkowany jest od szeregu zjawisk fizycznych zachodzących w trakcie obróbki EDM. Termiczny charakter procesu elektroerozji wprowadza szereg zmian w warstwie wierzchniej materiału oraz w budowie morfologicznej zewnętrznej topografii powierzchni. Kompleksowa analiza struktury geometrycznej powierzchni odgrywa istotną rolę w określeniu właściwości eksploatacyjnych i tribologicznych elementów konstrukcji [242, 243].

Badania parametrów struktury geometrycznej powierzchni przeprowadzono na próbkach po obróbce EDM elektrodami AF-5 (1 μm) i S-180 (10 μm) zgodnie z parametrami przyjętymi w eksperymencie planowanym. Pomiarów chropowatości powierzchni dokonano przy użyciu profilometru skanującego FORM TALYSURF Series 2 firmy Taylor Hobson. Dla każdej z próbek dokonano pomiaru chropowatości powierzchni o wymiarach 2 x 2 mm. Przyjęto krok dyskretyzacji na kierunku osi Y równy 10 μm . Liczba punktów pomiarowych na kierunku osi X wyniosła 5000. Obróbka oraz analiza uzyskanych wyników pomiarów chropowatości została przeprowadzona w programie MountainsLab Premium 8.1.

W celu kompleksowej analizy zewnętrznej topografii powierzchni zdecydowano się na wyznaczenie parametrów przestrzennych chropowatości, które dostarczają więcej informacji na temat złożoności stereometrii powierzchni (norma EUR 1578 EN) [191, 244, 245, 246]:

- średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia S_a , podstawowy parametr wysokościowy opisujący amplitudę chropowatości. Stanowi on średnią arytmetyczną wartość bezwzględnych odchyłek wysokości powierzchni od powierzchni średniej na zdefiniowanym obszarze próbkowania:

$$S_a = \frac{1}{NM} \sum_{x=0}^{N=1} \sum_{y=0}^{M=1} |z_{x,y}|$$

gdzie M stanowi liczbę punktów pomiarowych na profilu chropowatości (kierunek osi x), N liczbę profili (kierunek osi y),

- wysokość nierówności powierzchni według 10-ciu punktów S_z , parametr stanowiący wartość średnią z 5-ciu najwyższych wzniesień i 5-ciu najniższych wgłębień chropowatości powierzchni:

$$S_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |z_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |z_{vi}|}{5}$$

- całkowita wysokość nierówności powierzchni S_t , parametr definiujący sumę najwyższego wzniesienia S_p i najniższego wgłębienia S_v nierówności powierzchni wewnątrz obszaru próbkowania:

$$S_p = \sup\{z(i, j)\}; \quad S_v = \inf\{z(i, j)\}; \quad S_t = S_p + S_v$$

- gęstość wierzchołków nierówności powierzchni S_{ds} , parametr opisujący liczbę wierzchołków jednostkowego obszaru próbkowania:

$$S_{ds} = \frac{\text{Liczba wierzchołków}}{(M-1)(N-1)\Delta x \Delta y}$$

gdzie Δx i Δy to odstęp próbkowania na kierunku osi x i y ,

- wskaźnik względnego rozwinięcia powierzchni S_{dr} , parametr określany jako stosunek powierzchni rozwiniętej do powierzchni próbkowania A . Matematycznie S_{dr} wyraża się wzorem:

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \left[\iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \right]$$

- wymiar fraktalny S_{fd} , parametr definiujący stopień podobieństwa powierzchni wyrażony liczbowo. Wymiar fraktalny obszaru A stanowi miarę skali podobieństwa obrazu (powierzchni) [247]:

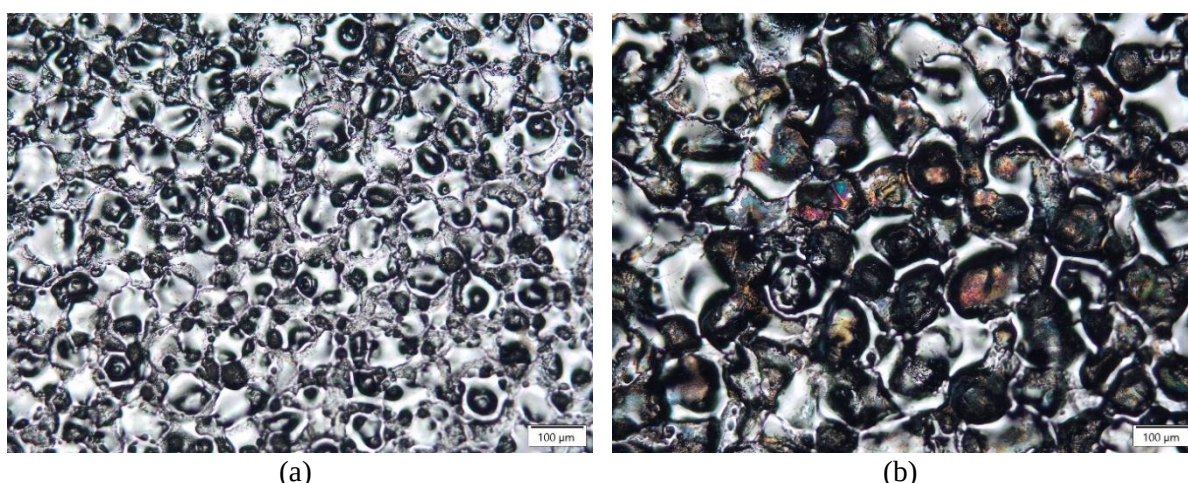
$$d(A) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log F(A, \varepsilon)}{\log \frac{1}{\varepsilon}}$$

gdzie: $F(A, \varepsilon)$ określa minimalną liczbę o promieniu $\varepsilon > 0$ potrzebną do pokrycia zbioru A .

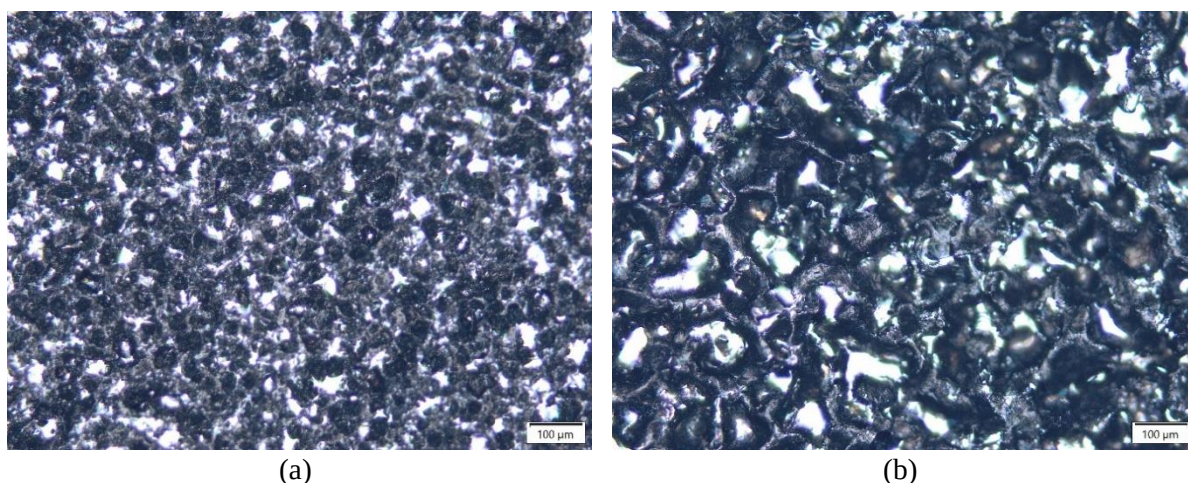
6.1. Charakterystyka struktury geometrycznej powierzchni po obróbce EDM

Powierzchnia po obróbce elektroerozyjnej konstituowana jest w wyniku nakładania się śladów pojedynczych wyładowań elektrycznych i charakteryzuje się wysoką izotropowością, o dużej gęstości powierzchniowej miejscowych wzniesień (rys. 6.1 – 6.5). Rozkład kraterów na powierzchni po obróbce ma charakter stochastyczny. Losowość struktury powierzchni po procesie EDM związana jest z fizyką zjawiska usuwania materiału oraz nierównomierną ilością występowania wyładowań elektrycznych na powierzchni elektrody roboczej. W zależności od

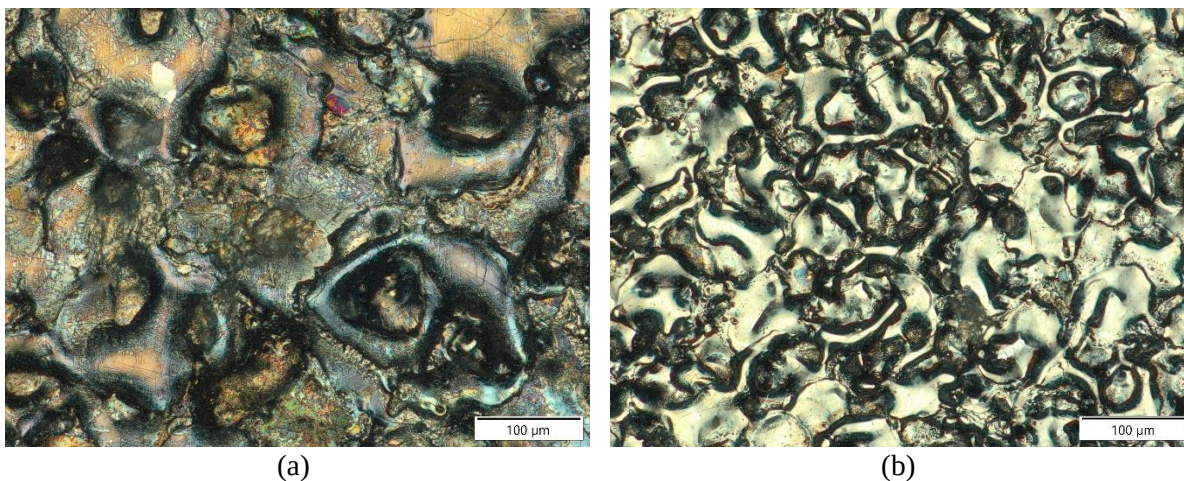
charakteru impulsów prądowo – napięciowych oraz wielkości ziarna elektrod grafitowych zauważalne są znaczące różnice w budowie morfologicznej powierzchni. Pojedyncze wyładowanie elektryczne tworzy nieregularny krater na powierzchni obrabianej o kształcie zbliżonym do czaszy kulistej. Kształt i rozmiar kraterów powstałych w wyniku wyładowań elektrycznych ma znaczący wpływ na chropowatość powierzchni, wydajność procesu oraz zużycie elektrody roboczej. W tabelach 6.1 – 6.4 zestawiono wyniki zmierzonych parametrów przestrzennych chropowatości powierzchni.



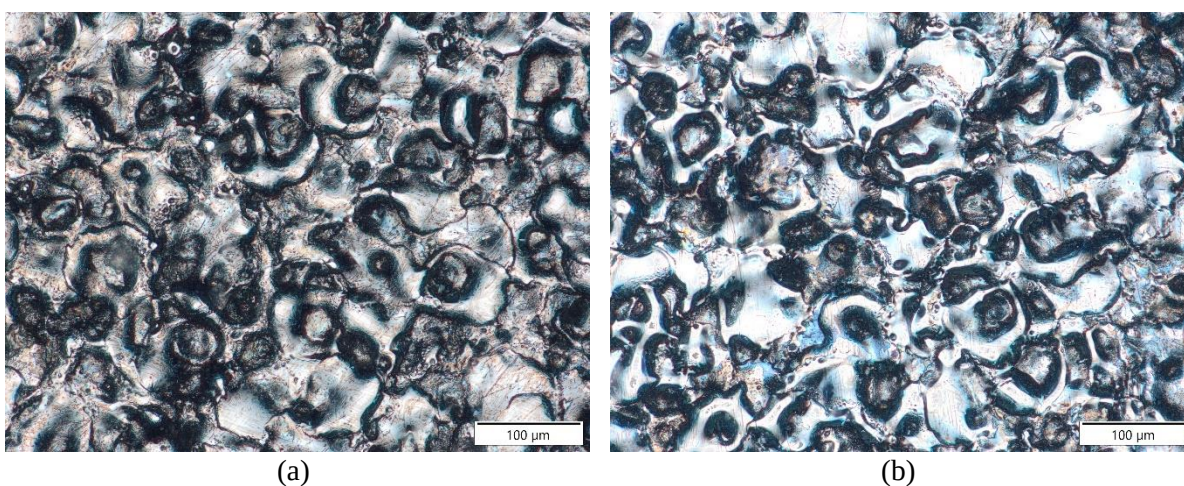
Rys. 6.1. Morfologia powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą AF-5 z polaryzacją prostą i nastawionymi parametrami: $t_{on} = 30 \mu s$, $t_{off} = 37 \mu s$, a) $I_c = 1,7 A$, b) $I_c = 5 A$,



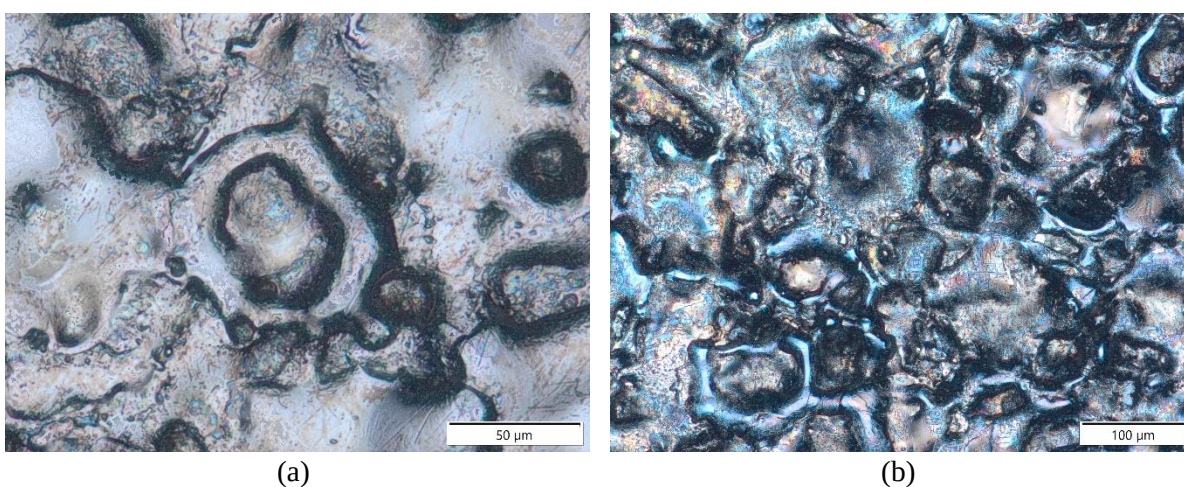
Rys. 6.2. Morfologia powierzchni po obróbce elektroerozyjnej z polaryzacją odwróconą i nastawionymi parametrami: $t_{off} = 37 \mu s$, a) $I_c = 1,7 A$, elektroda S-180, b) $I_c = 5 A$, elektroda AF-5



Rys. 6.3. Morfologia powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą AF-5 z polaryzacją prostą i nastawionymi parametrami: $I_c = 3,8 \text{ A}$, $t_{\text{off}} = 37 \text{ µs}$, a) $t_{\text{on}} = 55 \text{ µs}$, b) $t_{\text{on}} = 8 \text{ µs}$



Rys. 6.4. Morfologia powierzchni po obróbce elektroerozyjnej z polaryzacją prostą dla wartości parametrów: $I_c = 2,7 \text{ A}$, $t_{\text{on}} = 17 \text{ µs}$, $t_{\text{off}} = 19 \text{ µs}$ oraz elektrody: a) AF-5, b) S-180



Rys. 6.5. Morfologia powierzchni po obróbce elektroerozyjnej z polaryzacją prostą dla wartości parametrów: a) $I_c = 2,7 \text{ A}$, $t_{\text{on}} = 17 \text{ µs}$, $t_{\text{off}} = 19 \text{ µs}$, elektroda AF-5, b) $I_c = 4 \text{ A}$, $t_{\text{on}} = 17 \text{ µs}$, $t_{\text{off}} = 51 \text{ µs}$, elektroda S-180

Tabela 6.1. Zestawienie wyników pomiarów chropowatości powierzchni próbek obrobionych przy polaryzacji prostej elektrodą AF-5

Polaryzacja prosta (+)									
Lp.	I_c [A]	t_{on} [μs]	t_{off} [μs]	AF-5					
				Sa [μm]	Sz [μm]	St [μm]	Sds [pks/mm ²]	Sfd	Sdr [%]
1	2,7	17	19	2,19	18,3	24,7	461	2,44	3,03
2	2,7	17	51	2,38	23,2	25,5	543	2,52	3,48
3	2,7	41	19	2,41	27	29,9	468	2,44	2,52
4	2,7	41	51	2,56	25,9	29,3	421	2,45	2,88
5	4	17	19	3,04	28,2	35,2	446	2,44	2,98
6	4	17	51	2,97	27,3	38,7	420	2,5	4,87
7	4	41	19	3,66	29,1	35,1	415	2,4	3,84
8	4	41	51	3,72	34,9	38,2	301	2,43	3,95
9	1,7	30	37	1,48	17,6	20,2	826	2,5	1,88
10	5	30	37	3,56	33,7	42,4	316	2,42	3,69
11	3,8	8	37	2,19	17,8	23,8	304	2,44	3,71
12	3,8	55	37	3,63	29,2	35	274	2,41	3,71
13	3,8	30	6	3,3	30,9	37,4	334	2,44	3,31
14	3,8	30	75	3,3	31,5	42,3	516	2,46	4,63
15	3,8	30	37	3,15	29,6	33	333	2,45	3,55
16	3,8	30	37	3,31	31,3	35,9	381	2,46	3,4

Tabela 6.2. Zestawienie wyników pomiarów chropowatości powierzchni próbek obrobionych przy polaryzacji odwróconej elektrodą AF-5

Polaryzacja odwrócona (-)									
Lp.	I_c [A]	t_{on} [μs]	t_{off} [μs]	AF-5					
				Sa [μm]	Sz [μm]	St [μm]	Sds [pks/mm ²]	Sfd	Sdr [%]
1	2,7	17	19	3,57	32,5	35,4	724	2,4	3,43
2	2,7	17	51	2,55	27,7	32,5	777	2,47	3,31
3	2,7	41	19	3,76	37,3	55	749	2,4	4,43
4	2,7	41	51	3,56	38,3	47,6	754	2,41	4,3
5	4	17	19	3,02	27	33,6	466	2,32	4,52
6	4	17	51	2,98	29,3	37,5	663	2,47	4,49
7	4	41	19	4,54	45,1	59,7	536	2,4	5,66
8	4	41	51	4,61	44,7	52	568	2,41	5,83
9	1,7	30	37	2,92	25,6	51	1240	2,41	2,43
10	5	30	37	4,3	42,1	53,5	479	2,42	5,49
11	3,8	8	37	2,07	22,9	28,2	902	2,51	3,54
12	3,8	55	37	5,08	48,5	54,8	378	2,39	6,35
13	3,8	30	6	4,21	38,3	47,5	597	2,42	4,8
14	3,8	30	75	3,73	37,8	50	587	2,42	5,04
15	3,8	30	37	4,37	41,1	55,8	579	2,42	5,25
16	3,8	30	37	4,37	43,6	55,7	611	2,41	5,3

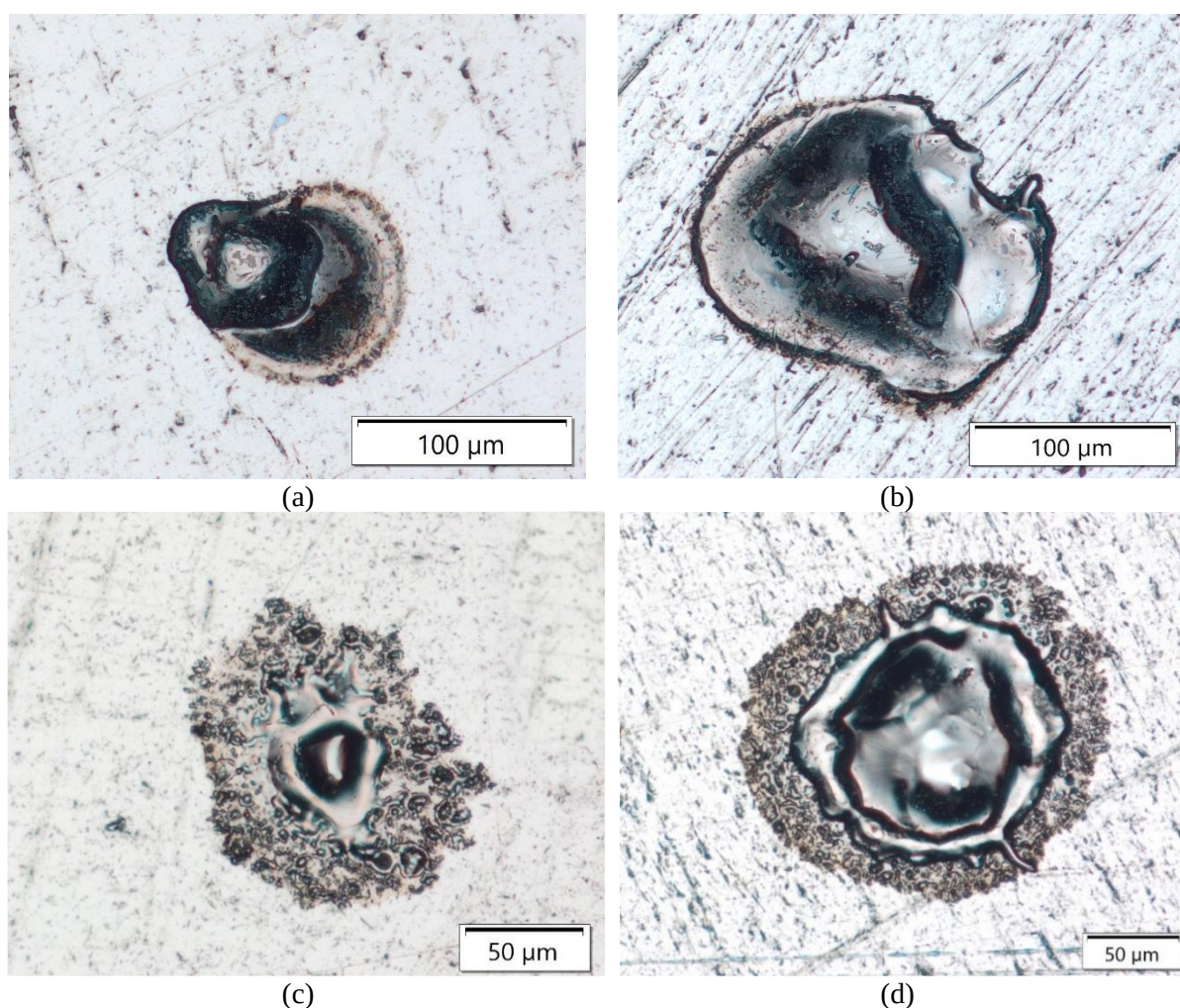
Tabela 6.3. Zestawienie wyników pomiarów chropowatości powierzchni próbek obrobionych przy polaryzacji prostej elektrodą S-180

Polaryzacja prosta (+)									
Lp.	I_c [A]	t_{on} [μs]	t_{off} [μs]	S-180					
				Sa [μm]	Sz [μm]	St [μm]	Sds [pks/mm ²]	Sfd	Sdr [%]
1	2,7	17	19	3,06	28,3	32,9	490	2,44	3,4
2	2,7	17	51	3,03	28,3	39,6	461	2,48	4,18
3	2,7	41	19	3,33	30,4	34,8	374	2,39	2,63
4	2,7	41	51	3,52	33,5	36	403	2,4	2,93
5	4	17	19	3,41	28,9	40,7	372	2,44	3,69
6	4	17	51	3,32	31,4	33,9	392	2,45	4,88
7	4	41	19	4,07	36,3	39,5	269	2,4	3,86
8	4	41	51	4,24	37,3	45,9	278	2,39	4,03
9	1,7	30	37	2,61	25,1	33,8	674	2,41	2,02
10	5	30	37	4,06	36,3	40,6	273	2,41	3,92
11	3,8	8	37	2,76	27,5	29,2	601	2,51	4,83
12	3,8	55	37	4,2	38,9	42,4	241	2,36	3,84
13	3,8	30	6	3,78	34,2	42	281	2,4	3,57
14	3,8	30	75	3,87	35,1	51,2	321	2,44	5,1
15	3,8	30	37	3,74	31,5	35,2	304	2,42	3,61
16	3,8	30	37	3,72	31,9	35,6	318	2,41	3,45

Tabela 6.4. Zestawienie wyników pomiarów chropowatości powierzchni próbek obrobionych przy polaryzacji odwróconej elektrodą S-180

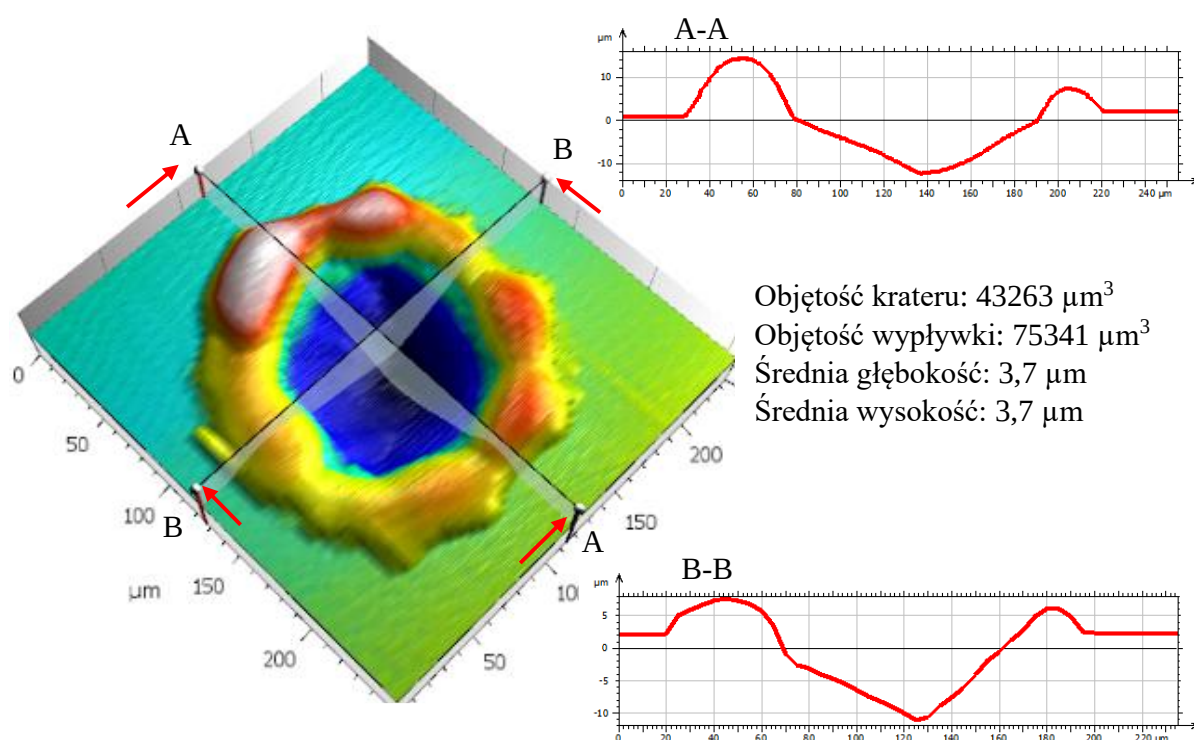
Polaryzacja odwrócona (-)									
Lp.	I_c [A]	t_{on} [μs]	t_{off} [μs]	S-180					
				Sa [μm]	Sz [μm]	St [μm]	Sds [pks/mm ²]	Sfd	Sdr [%]
1	2,7	17	19	3,29	26,1	42,3	867	2,42	2,99
2	2,7	17	51	2,47	22,6	26,8	583	2,36	2,84
3	2,7	41	19	3,57	31,4	38,2	826	2,42	4,02
4	2,7	41	51	3,24	30,1	36,6	778	2,42	3,92
5	4	17	19	2,83	28,4	33,4	569	2,46	3,87
6	4	17	51	3,01	31,6	35,5	654	2,46	4,16
7	4	41	19	4,33	43,2	49,8	567	2,38	4,59
8	4	41	51	4,44	44,7	53,7	563	2,4	5,46
9	1,7	30	37	3,33	21,4	30,1	1098	2,4	2,44
10	5	30	37	5,23	32,4	45,8	482	2,4	5,97
11	3,8	8	37	2,47	25,6	31,4	769	2,45	3,46
12	3,8	55	37	4,71	44,3	51,8	569	2,4	5,42
13	3,8	30	6	4,13	45,2	52,3	598	2,4	5,01
14	3,8	30	75	3,69	40,5	50,9	525	2,41	4,8
15	3,8	30	37	4,4	38,1	52,7	552	2,42	4,97
16	3,8	30	37	3,66	38,1	42,8	556	2,43	4,86

Na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowano, iż głównym parametrem determinującym chropowatość powierzchni po obróbce EDM jest natężenie prądu oraz czas wyładowania elektrycznego. Wzrost natężenia prądu powoduje zwiększenie średnicy kanału plazmowego, a tym samym objętości krateru. Świadczą o tym zaobserwowane ślady pojedynczych wyładowań elektrycznych na powierzchni obrabianej (rys. 6.6). Przy polaryzacji prostej i natężeniu prądu odpowiednio równym $I_c = 5$ A objętość powstałego krateru jest niemal trzykrotnie większa (rys. 6.6b) od objętości krateru uformowanego przy natężeniu prądu równym $I_c = 1,7$ A (rys. 6.6a). Podobne zależności zaobserwowano także przy polaryzacji odwróconej. Wzrost natężenia prądu, a tym samym energii pojedynczego wyładowania elektrycznego, powoduje zwiększenie objętości usuniętego materiału w trakcie pojedynczego impulsu i generowanie wyższych parametrów chropowatości powierzchni.

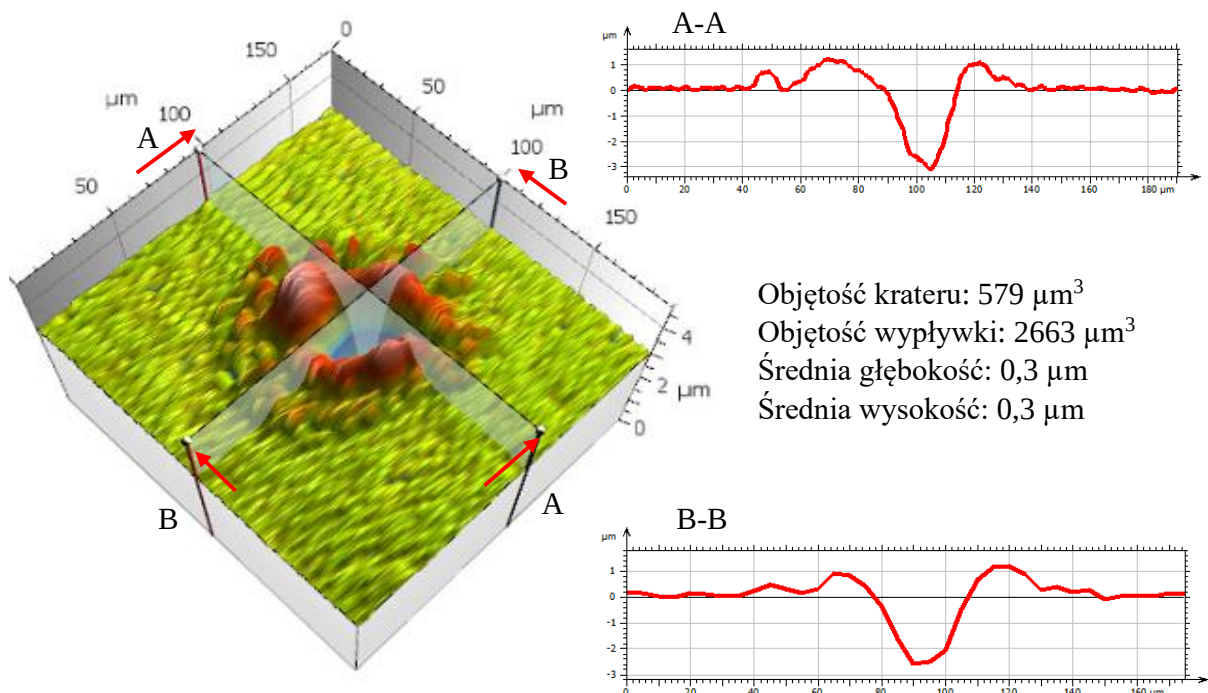


Rys. 6.6. Ślady pojedynczych kraterów na powierzchni obrabianej dla elektrody AF-5 i wartości parametrów $U_0 = 220$ V, $U_c = 25$ V, $t_{on} = 31$ μs, $t_{off} = 37$ μs, a) $I_c = 1,7$ A, polaryzacja odwrócona, b) $I_c = 5$ A, polaryzacja odwrócona, c) $I_c = 1,7$ A, polaryzacja prosta, d) $I_c = 5$ A, polaryzacja prosta

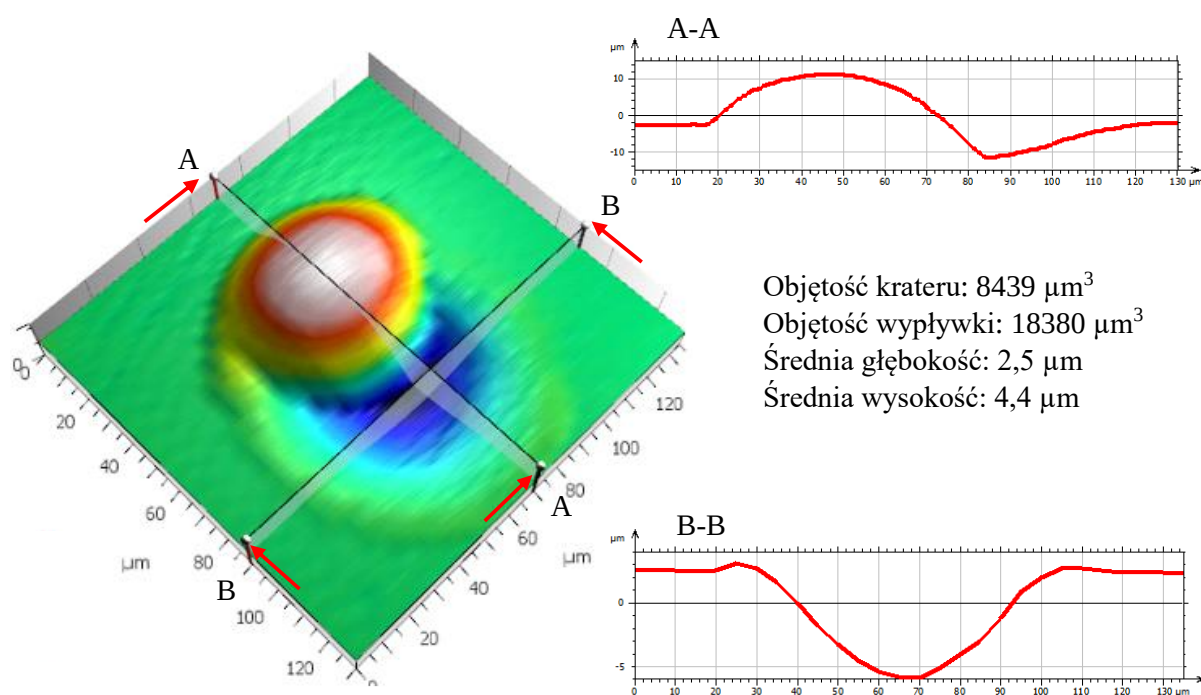
Biegunowość elektrod wpływa w znaczący sposób na formowanie się kształtu sferycznego krateru. W przypadku polaryzacji odwróconej krater charakteryzuje się większą objętością oraz nieregularnym kształtem, natomiast krater uformowany przy polaryzacji prostej posiada mniejszą głębokość oraz bardziej regularny i symetryczny kształt z wyraźnymi wypływami na krawędziach (rys. 6.7 – 6.10). Wypływki na krawędziach krateru są bardziej nieregularne przy biegunowości odwróconej. Zaobserwowano, iż wypływki przy polaryzacji ujemnej są nieciągłe i zazwyczaj skupiają się w pewnym obszarze w bezpośrednim sąsiedztwie krateru. W przypadku biegunowości dodatniej wypływki otaczają krater po całym jego obwodzie i charakteryzują się równomierną objętością. Kształty wytworzonych kraterów oraz wypływek na powierzchni obrabianej powodują generowanie większej chropowatości powierzchni po drążeniu z biegunowością ujemną. Fakt ten można wytłumaczyć wpływem energii elektronów emitowanych z powierzchni katody przy polaryzacji odwróconej, które przenoszą więcej energii cieplnej do powierzchni obrabianej niż dodatnio naładowane jony przy polaryzacji prostej. Podobne zależności wykazał także Torres [147]. Wokół głównych kraterów uformowanych przy biegunowości prostej zaobserwowano otaczające je pierścienie kraterów o znacznie mniejszych średnicach. Może to świadczyć o słuszności przyjmowanych hipotez, które zakładają, iż wyładowanie elektryczne może być wielokanałowe.



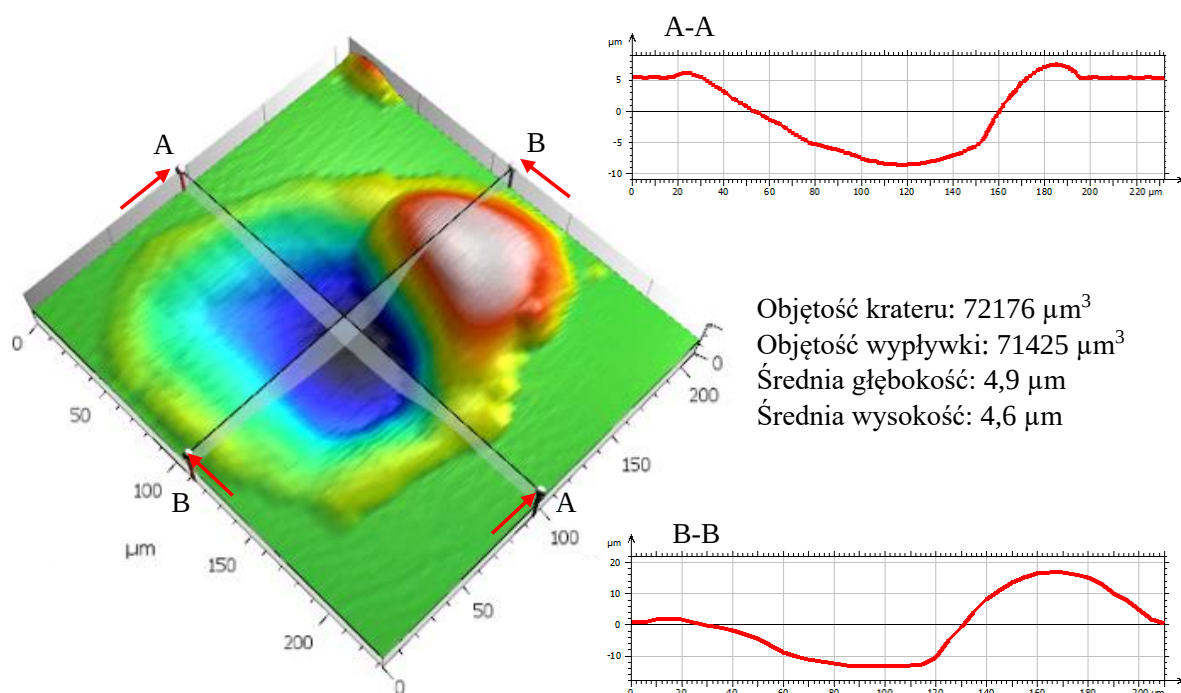
Rys. 6.7. Analiza geometrii i objętości pojedynczego krateru na powierzchni obrabianej dla elektrody AF-5 i parametrów obróbki: $I_c = 5$ A, $t_{on} = 31$ μs, $t_{off} = 37$ μs, polaryzacja prosta



Rys. 6.8. Analiza geometrii i objętości pojedynczego krateru na powierzchni obrabianej dla elektrody AF-5 i parametrów obróbki: $I_c = 1,7 \text{ A}$, $t_{\text{on}} = 31 \mu\text{s}$, $t_{\text{off}} = 37 \mu\text{s}$, polaryzacja prosta



Rys. 6.9. Analiza geometrii i objętości pojedynczego krateru na powierzchni obrabianej dla elektrody AF-5 i parametrów obróbki: $I_c = 1,7 \text{ A}$, $t_{\text{on}} = 31 \mu\text{s}$, $t_{\text{off}} = 37 \mu\text{s}$, polaryzacja odwrócona



Rys. 6.10. Analiza geometrii i objętości pojedynczego krateru na powierzchni obrabianej dla elektrody AF-5 i parametrów obróbki: $I_c = 5 \text{ A}$, $t_{on} = 31 \mu\text{s}$, $t_{off} = 37 \mu\text{s}$, polaryzacja odwrócona

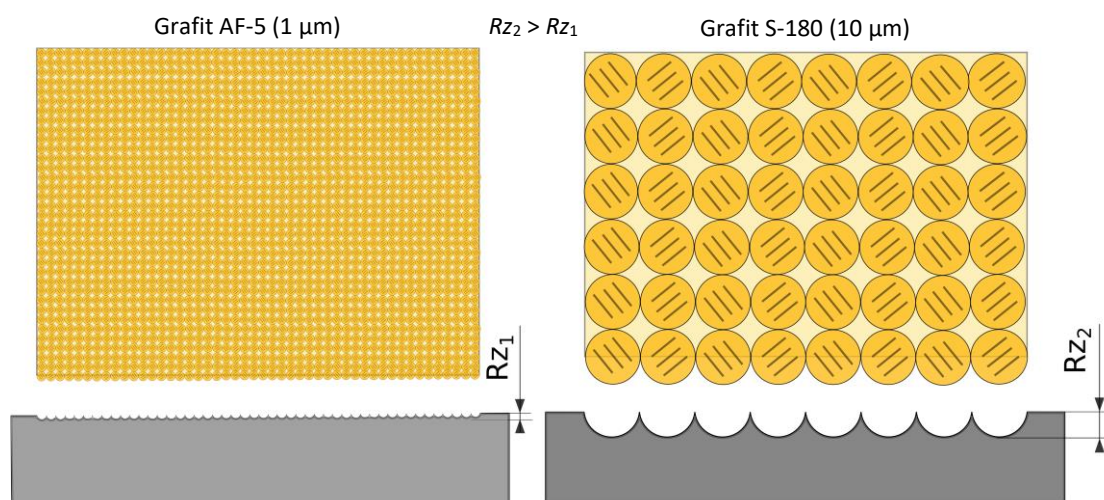
Średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych badanych powierzchni Sa zawiera się w przedziale od $1,48$ do $4,24 \mu\text{m}$ dla polaryzacji prostej oraz od $2,07$ do $5,08 \mu\text{m}$ dla polaryzacji odwróconej. Wartości te są charakterystyczne dla chropowatości powierzchni uzyskiwanych w warunkach obróbki półwykończeniowej i wykończeniowej EDM.

Wielkość cząstek grafitu ma istotny wpływ na minimalną wartość chropowatości powierzchni dla polaryzacji prostej. Najmniejszą wartość parametru $Sa = 1,48 \mu\text{m}$ uzyskano elektrodą drobnoziarnistą dla natężania prądu równym $I_c = 1,7 \text{ A}$. Eksperyment planowany był realizowany dla parametrów odpowiadającym warunkom obróbki półwykończeniowej i wykończeniowej EDM. W warunkach obróbki wykończeniowej, przy małej mocy wyładowania elektrycznego, elektroda dąży do odwzorowania mikrostruktury ziaren grafitu na powierzchni obrabianej (rys. 6.11). Grafitowa elektroda robocza o mniejszym ziarnie i udziale procentowym porów zapewnia lepsze wykończenie i niższą chropowatość powierzchni, niż grafit o większym ziarnie i dużym udziale porów o większej średnicy.

Na stan struktury geometrycznej powierzchni istotny wpływ ma przewodność elektryczna materiału elektrody. Według Sundaram [122] średnica krateru jest odwrotnie proporcjonalna do rezystancji materiału elektrody. Elektroda S-180 charakteryzuje się mniejszą rezystancją i generuje intensywniejsze wyładowania elektryczne w szczelnie niż grafit AF-5.

Zjawisko to zwiększa objętość materiału usuniętego z krateru w trakcie pojedynczego wyładowania elektrycznego i powoduje wzrost chropowatości powierzchni po drażeniu.

Po obróbce z biegunowością odwróconą chropowatość powierzchni próbek jest większa niż przy biegunowości prostej z uwagi na duże zużycie elektrody. Wartości parametru Sa są podobne zarówno dla elektrody drobnoziarnistej, jak i gruboziarnistej. Dowodzi to, iż głównym czynnikiem determinującym wartość chropowatości Sa przy polaryzacji ujemnej są parametry elektryczne (natężenie prądu, czas wyładowania i czas przerwy między impulsami), a w mniejszym stopniu wielkość ziarna elektrody grafitowej. Elektrony emitowane z powierzchni katody przy biegunowości ujemnej przenoszą więcej energii cieplnej do przedmiotu, która usuwa większą objętość materiału anody i generuje wyższą chropowatość powierzchni. Wielkość ziarna ma niewielki wpływ na stan warstwy wierzchniej z uwagi na znaczącą rolę rozkładu energii cieplnej na powierzchni obrabianej przy polaryzacji odwróconej.



Rys. 6.11. Wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych na teksturę powierzchni po obróbce EDM

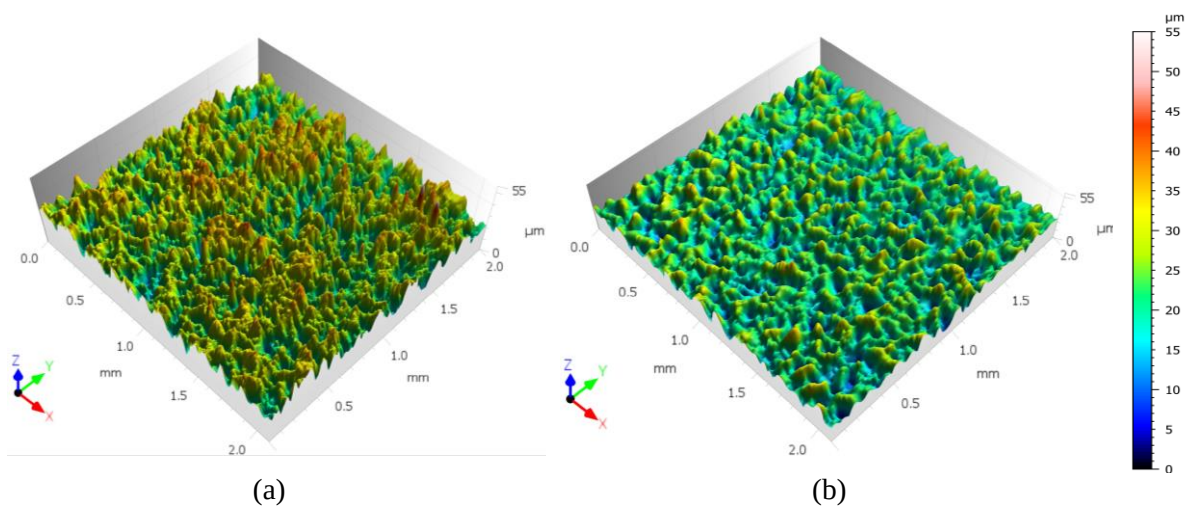
Analiza porównawcza parametrów Sz i St może dostarczyć informacji na temat stabilności wyładowań elektrycznych. W większości przypadków parametry te mają zbliżone do siebie wartości. Dla najmniejszych wartości natężenia prądu i polaryzacji prostej różnice te zawierają się w przedziale od 2 do 11 μm dla elektrod AF-5 i S-180. W przypadku polaryzacji odwróconej różnice obu parametrów osiągają większe wartości od 3 do 18 μm . Najmniejsze wartości parametrów St i Sz , oraz różnic między nimi, zaobserwowano dla elektrody AF-5 i polaryzacji dodatniej. Udział przypadkowych wierzchołków i wgłębień jest pomijalnie mały przy polaryzacji prostej, co świadczy o wyższej stabilności wyładowań elektrycznych niż w przypadku obróbki z polaryzacją odwróconą. Największe różnice przy biegunowości dodatniej występują przy wyższych wartościach natężenia prądu i czasu wyładowania

elektrycznego oraz w przypadku, gdy czas przerwy między impulsami jest znacznie dłuższy od czasu wyładowania. Wynika to z faktu, iż ziarna grafitu, które odrywają się w momencie wyładowania elektrycznego, są usuwane ze szczeliny w trakcie przerwy między impulsami. Wydłużenie czasu przerwy, któremu towarzyszy efektywniejsze usuwanie produktów obróbki oraz ziaren grafitu, powoduje intensywniejsze wyładowania elektryczne w szczelinie, które generują głębsze przetopy i wyższe wierzchołki nierówności powierzchni.

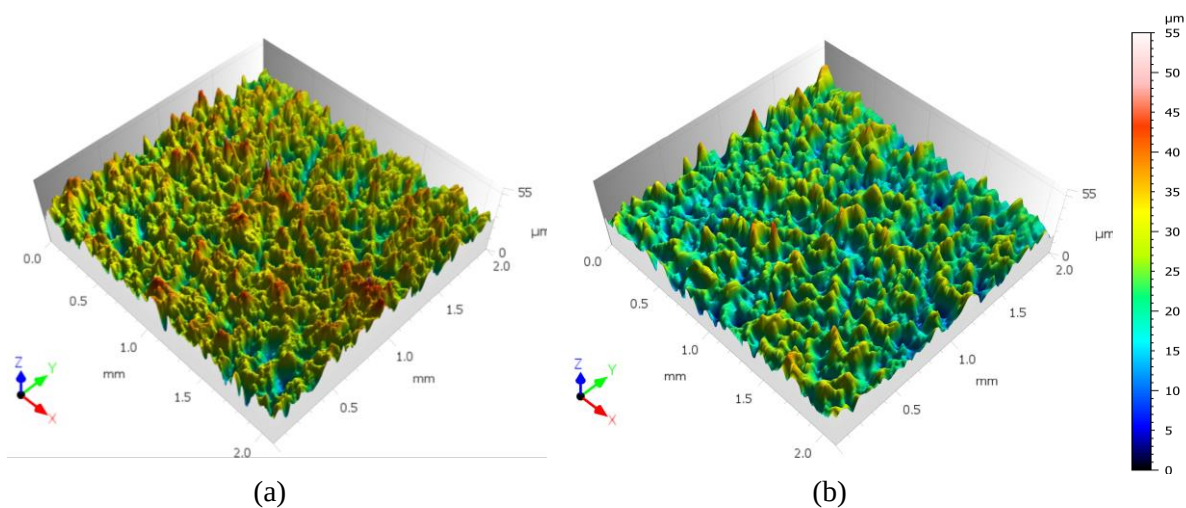
Kształt wierzchołków chropowatości powierzchni oraz stopień jej złożoności może zostać opisany gęstością nierówności powierzchni S_{ds} , względnym rozwinięciem pola powierzchni S_{dr} oraz wymiarem fraktalnym S_{fd} , który jest miarą podobieństwa powierzchni. Hybrydowy parametr chropowatości powierzchni S_{ds} definiuje liczbę wierzchołków w jednostkowym obszarze próbkowania i określa pośrednio odległości między kolejnymi wierzchołkami nierówności. Wyższe wartości S_{ds} oznaczają, że ten sam obszar ma więcej szczytów. Zmienna liczba wierzchołków nierówności, przy podobnych wartościach wysokościowych chropowatości, może wskazywać, iż powstałe kraterzy mają podobne głębokości, ale inne średnice. Parametr S_{dr} dostarcza informacji o rzeczywistej powierzchni styku i jest bardzo istotny z punktu widzenia możliwości łączenia powierzchni. Szczegółowa analiza hybrydowych parametrów S_{ds} i S_{dr} dostarcza niezbędnych informacji o ścieralności powierzchni, możliwości nakładania powłok oraz współczynnika odbicia.

Parametry S_{ds} oraz S_{dr} wykazują dużą zależność od wartości natężenia prądu i czasu wyładowania elektrycznego zarówno dla biegunowości prostej i odwróconej. Przy niższych wartościach energii wyładowania elektrycznego powierzchnia charakteryzuje się większą gęstością wierzchołków nierówności oraz mniejszym rozwinięciem powierzchni, co zostało zaprezentowane na rys. 6.12 – 6.15. Wraz ze wzrostem natężenia prądu i czasu wyładowania elektrycznego nierówności powierzchni mają bardziej łagodny charakter. Najmniejsze wartości parametru S_{dr} osiągnięto dla polaryzacji prostej i elektrody AF-5. Powierzchnia po obróbce elektrodą grafitową AF-5 posiada większą gęstość nierówności powierzchni S_{ds} niż po obróbce elektrodą S-180. Ma to bezpośrednio związek z niskim rozmiar ziarna grafitu oraz porów, które odwzorowują swoją mikrogeometrię na powierzchni obrabianej.

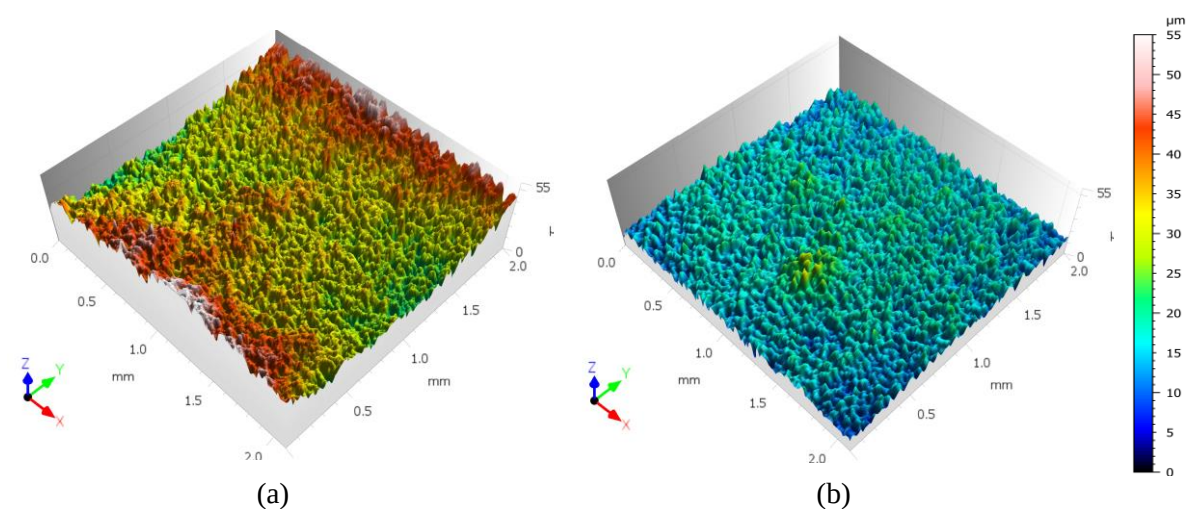
Liczba fraktalna S_{fd} zmienia się w bardzo wąskim przedziale przy zmieniających się parametrach obróbki elektroerozyjnej. Można wnioskować, iż stopień złożoności tekstury powierzchni nie zależy w istotny sposób od parametrów procesu i jest raczej charakterystyczny dla całej obróbki EDM. Stanowi to potwierdzenie uzyskanych wyników badań Żaka i Rzęsa [247], którzy stwierdzili, iż wymiar fraktalny może być stosowany jako jeden z parametrów określających podobieństwo powierzchni uzyskanych w różnych operacjach obróbkowych.



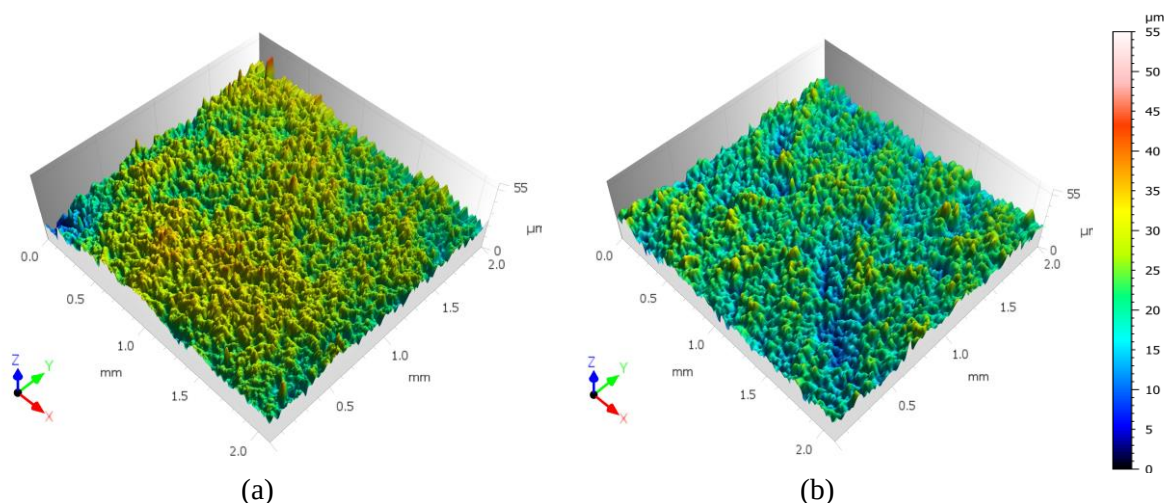
Rys. 6.12. Obrazy stereometryczne powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą AF-5 z parametrami: $I_c = 4 \text{ A}$, $t_{on} = 41 \text{ μs}$, $t_{off} = 51 \text{ μs}$ dla polaryzacji: a) odwróconej, b) prostej



Rys. 6.13. Obrazy stereometryczne powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą S-180 z parametrami: $I_c = 4 \text{ A}$, $t_{on} = 41 \text{ μs}$, $t_{off} = 51 \text{ μs}$ dla polaryzacji: a) odwróconej, b) prostej



Rys. 6.14. Obrazy stereometryczne powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą AF-5 z parametrami: $I_c = 2,7 \text{ A}$, $t_{on} = 17 \text{ μs}$, $t_{off} = 19 \text{ μs}$ dla polaryzacji: a) odwróconej, b) prostej



Rys. 6.15. Obrazy stereometryczne powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą S-180 z parametrami: $I_c = 2,7$ A, $t_{on} = 17$ μ s, $t_{off} = 19$ μ s dla polaryzacji: a) odwróconej, b) prostej

6.2. Modele statystyczne kształtowania SGP

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów chropowatości powierzchni opracowano statystyczne modele matematyczne opisujące wpływ analizowanych parametrów obróbki na wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni.

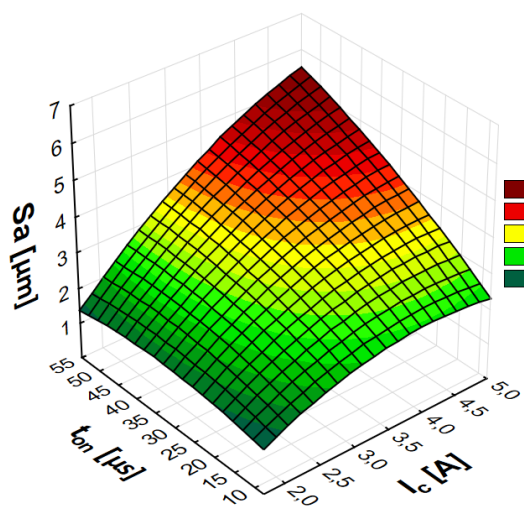
Wyznaczono równania regresji w postaci wielomianu drugiego stopnia w programie STATISTICA 13.3, stosując metodę regresji krokowej wstecznej. Stopień dopasowania równania regresji do wyników badań eksperymentalnych opisano współczynnikiem korelacji R . Współczynnik R odzwierciedla zmienność badanej cechy i zawiera się w przedziale $R \in <0, 1>$. Jeśli wartość współczynnika korelacji R jest bliższa jedności świadczy to o dokładniejszym dopasowaniu równania regresji do wyników badań eksperymentalnych. Istotność wyznaczonego współczynnika korelacji była weryfikowana testem Fishera – Snedecora. Test pozwolił ocenić adekwatność wyznaczonego równania regresji, czyli zgodność modelu z wynikami uzyskanymi podczas badań doświadczalnych. Wyliczoną wartość testu F porównano z wartością krytyczną F_{kr} (odczytaną z tablic dla określonej liczby stopni swobody i przy ustalonym poziomie istotności $\alpha = 0,05$). Współczynnik korelacji jest istotny, gdy zachodzi zależność $F/F_{kr} > 1$. Za pomocą testu t-Studenta dokonano weryfikacji istotności współczynników równania regresji. W równaniach zawarto współczynniki, które na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ są statystycznie istotne według warunku: $t > t_{kr}$. Wyniki wyznaczonych zależności regresyjnych zawarto w tabeli 6.5 i 6.6, a ich graficzną interpretację przedstawiono na rys. 6.16 – 6.24.

Tabela 6.5. Równania regresji opisujące parametry SGP dla polaryzacji prostej

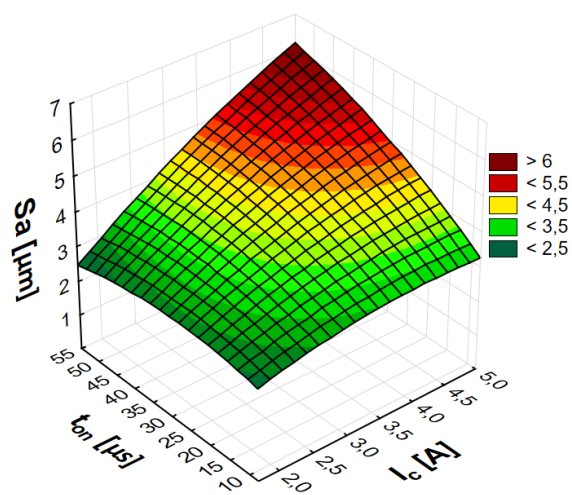
Polaryzacja prosta (+)			
Material elektrody	Równanie regresji	R	F/F _{kr}
AF-5	$Sa = -0,96 + 1,5 \cdot I_c - 0,2 \cdot I_c^2 - 0,0005 \cdot t_{on}^2 + 0,02 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,99	15,8
	$Sz = 1,8 + 4,9 \cdot I_c + 0,3 \cdot t_{on}$	0,92	1,8
	$St = -4,3 + 6,8 \cdot I_c + 0,8 \cdot t_{on} - 0,01 \cdot t_{on}^2$	0,91	2,3
	$Sds = 1490 - 503 \cdot I_c + 57 \cdot I_c^2 - 0,04 \cdot t_{on}^2$	0,87	1,5
	$Sfd = 2,4 + 0,004 \cdot t_{off} - 0,00006 \cdot I_c \cdot t_{off} - 0,00004 \cdot t_{on} \cdot t_{off}$	0,87	1,5
	$Sdr = -0,1 + 0,02 \cdot I_c \cdot t_{off} + 1,5 \cdot I_c - 0,3 \cdot I_c^2 - 0,001 \cdot t_{on} \cdot t_{off} + 0,01 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,95	3,7
S-180	$Sa = 1,5 + 0,7 \cdot I_c - 0,1 \cdot I_c^2 - 0,0006 \cdot t_{on}^2 + 0,02 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,99	25
	$Sz = 22 + I_c + 0,06 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,95	3
	$St = 38 - 0,7 \cdot t_{on} + 0,008 \cdot t_{off}^2 + 0,24 \cdot I_c \cdot t_{on} - 0,14 \cdot I_c \cdot t_{off}$	0,91	2,4
	$Sds = 1126 - 301 \cdot I_c + 37 \cdot I_c^2 - 1,6 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,92	2,7
	$Sfd = 2,5 - 0,004 \cdot t_{on} + 0,002 \cdot t_{off} + 0,00004 \cdot t_{on}^2 - 0,00007 \cdot I_c \cdot t_{off} - 0,00004 \cdot t_{on} \cdot t_{off}$	0,97	7,6
	$Sdr = 4,7 - 0,2 \cdot t_{on} + 0,002 \cdot t_{on}^2 + 0,0007 \cdot t_{off}^2 + 0,02 \cdot I_c \cdot t_{on} - 0,001 \cdot t_{on} \cdot t_{off}$	0,98	12,7

Tabela 6.6. Równania regresji opisujące parametry SGP dla polaryzacji odwróconej

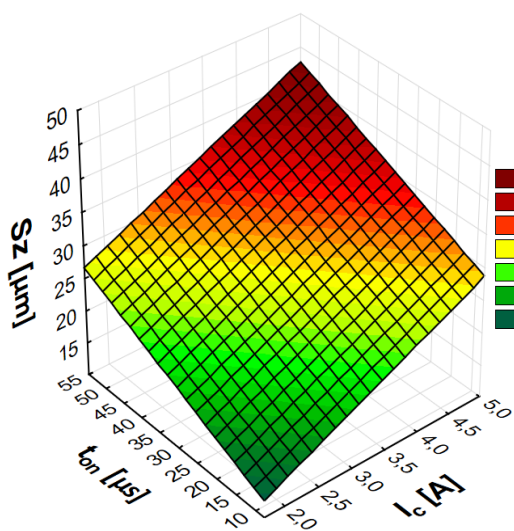
Polaryzacja odwrócona (-)			
Material elektrody	Równanie regresji	R	F/F _{kr}
AF-5	$Sa = 2,5 - 0,1 \cdot I_c^2 - 0,001 \cdot t_{on}^2 + 0,04 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,91	4,5
	$Sz = 24 + 0,13 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,93	4,5
	$St = 9 + 2 \cdot t_{on} - 0,02 \cdot t_{on}^2$	0,92	2
	$Sds = 2189 - 635 \cdot I_c + 74 \cdot I_c^2 - 1,6 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,90	2,1
	$Sfd = 2 + 0,09 \cdot I_c + 0,009 \cdot t_{on} - 0,003 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,8	1,1
	$Sdr = -1,6 + 2,3 \cdot I_c - 0,3 \cdot I_c^2 + 0,01 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,99	23
S-180	$Sa = 4,66 - 1,6 \cdot I_c + 0,3 \cdot I_c^2 + 0,01 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,93	2,7
	$Sz = 23 + 0,12 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,84	1,8
	$St = 30 + 0,13 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,82	1,4
	$Sds = 1674 - 455 \cdot I_c + 62 \cdot I_c^2 + 0,2 \cdot t_{on}^2 - 4,3 \cdot I_c \cdot t_{on}$	0,92	2,6
	$Sfd = 2,3 + 0,06 \cdot I_c + 0,007 \cdot t_{on} - 0,005 \cdot t_{off} - 0,003 \cdot I_c \cdot t_{on} + 0,0009 \cdot I_c \cdot t_{off} + 0,00006 \cdot t_{on} \cdot t_{off}$	0,90	1,5
	$Sdr = -0,5 + I_c + 0,04 \cdot t_{on}$	0,96	4



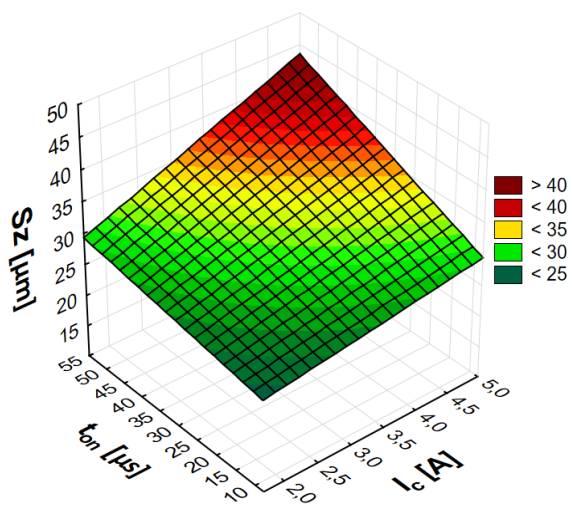
(a)



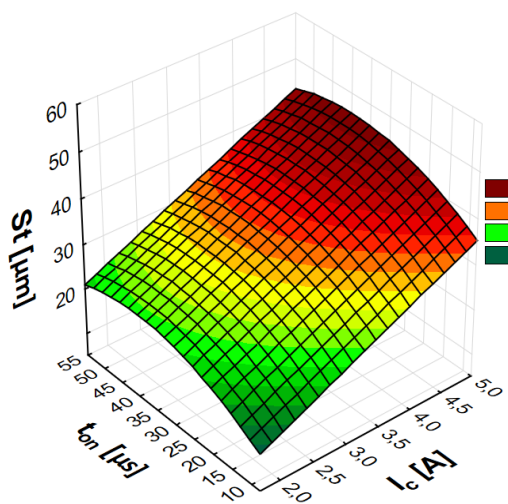
(b)



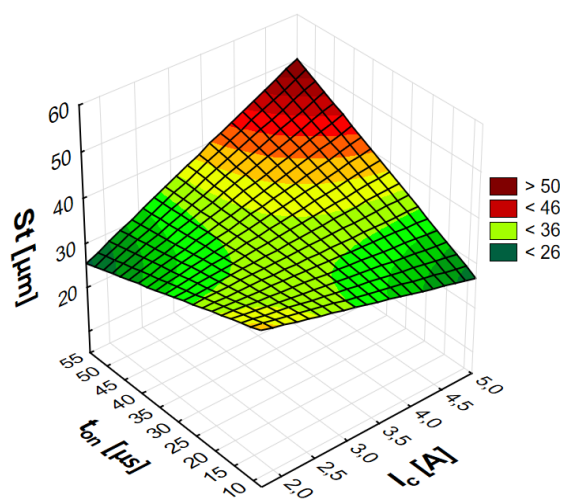
(c)



(d)

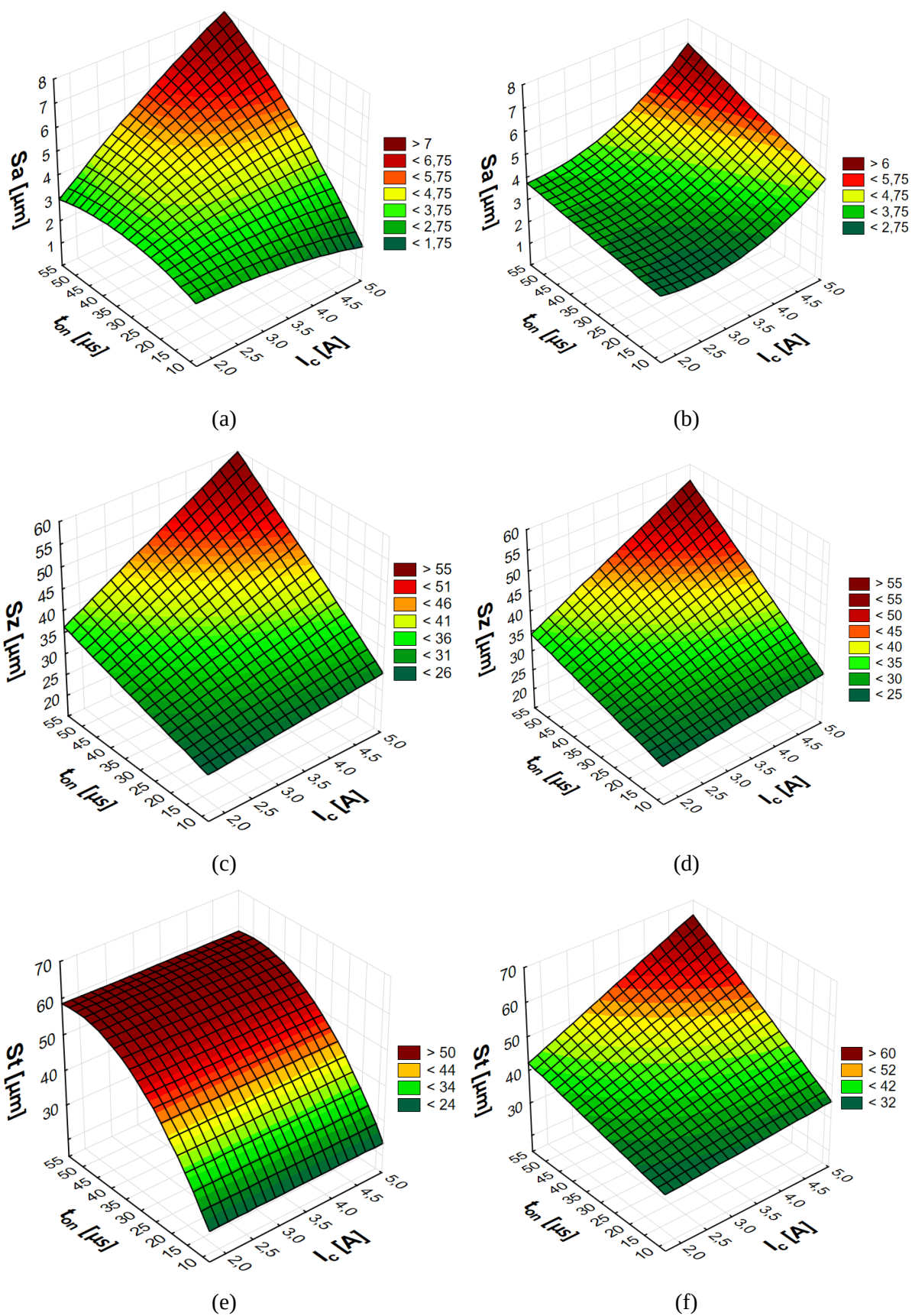


(e)

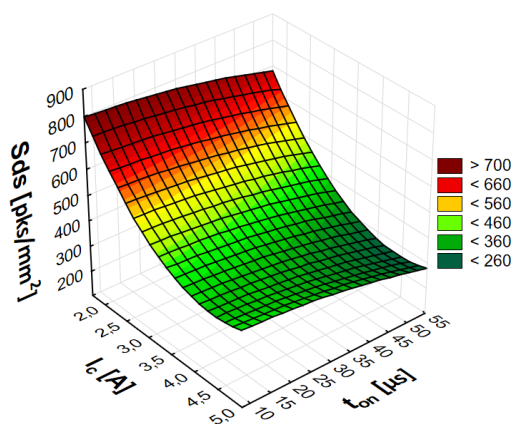


(f)

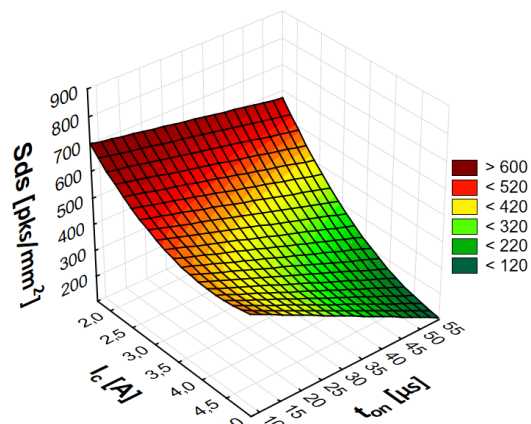
Rys. 6.16. Zależność wysokościowych parametrów chropowatości S_a , S_z i S_t od natężenia prądu I_c , czasu wyładowania t_{on} dla polaryzacji prostej, materiał elektrody: a, c, e) AF-5; b, d, f) S-180



Rys. 6.17. Zależność wysokościowych parametrów chropowatości Sa , Sz i St od natężenia prądu I_c , czasu wyładowania t_{on} dla polaryzacji odwróconej, materiał elektrody: a, c, e) AF-5; b, d, f) S-180

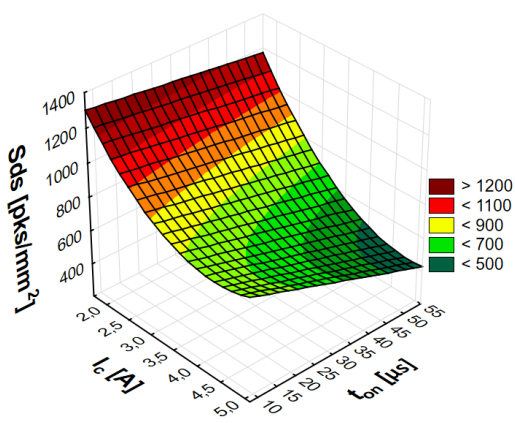


(a)

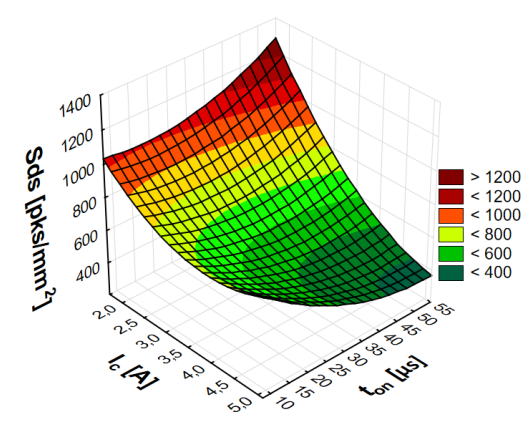


(b)

Rys. 6.18. Zależność gęstość wierzchołków nierówności powierzchni S_{ds} od natężenia prądu I_c i czasu wyładowania t_{on} dla polaryzacji prostej, materiał elektrody: a) AF-5, b) S-180

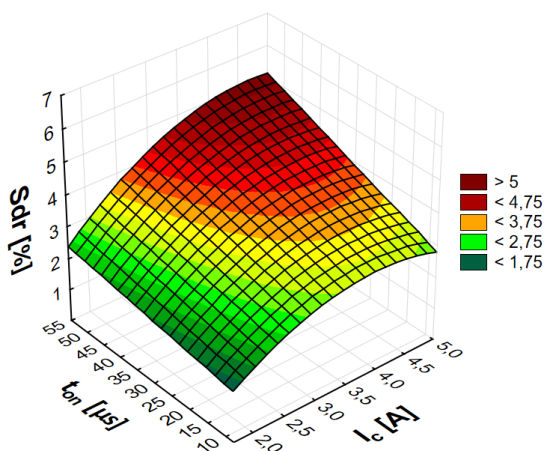


(a)

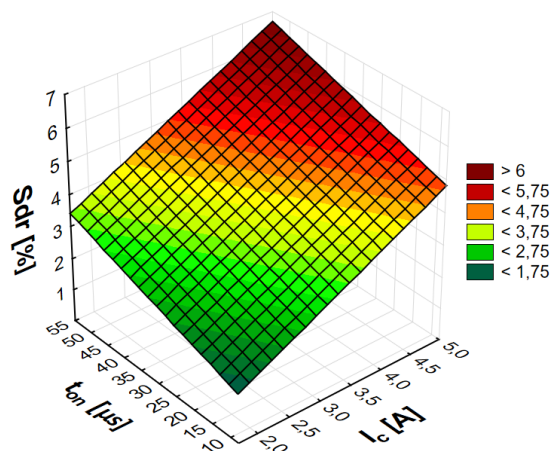


(b)

Rys. 6.19. Zależność gęstość wierzchołków nierówności powierzchni S_{ds} od natężenia prądu I_c i czasu wyładowania t_{on} dla polaryzacji odwróconej, materiał elektrody: a) AF-5, b) S-180

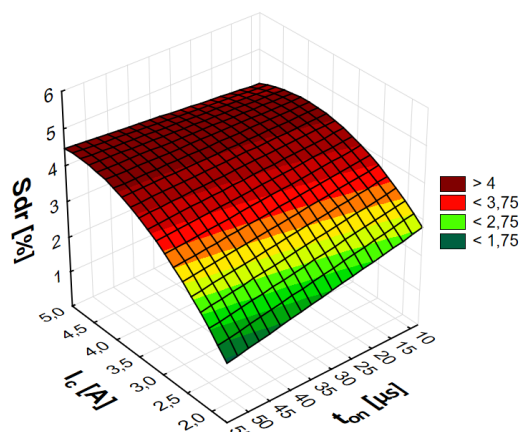


(a)

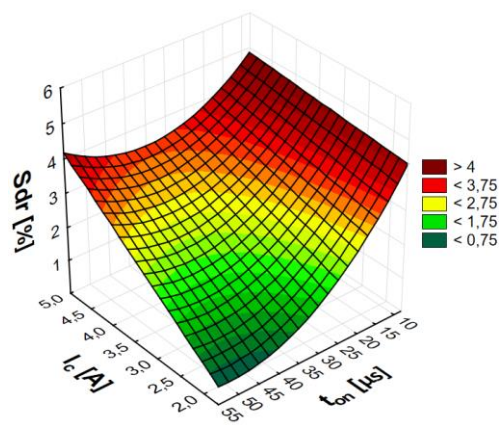


(b)

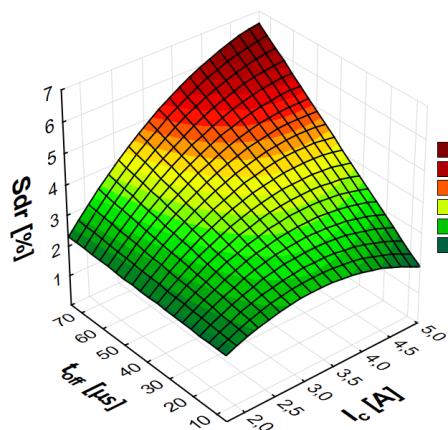
Rys. 6.20. Zależność względnego rozwinięcia powierzchni S_{dr} od natężenia prądu I_c i czasu wyładowania t_{on} dla polaryzacji odwróconej, materiał elektrody: a) AF-5, b) S-180



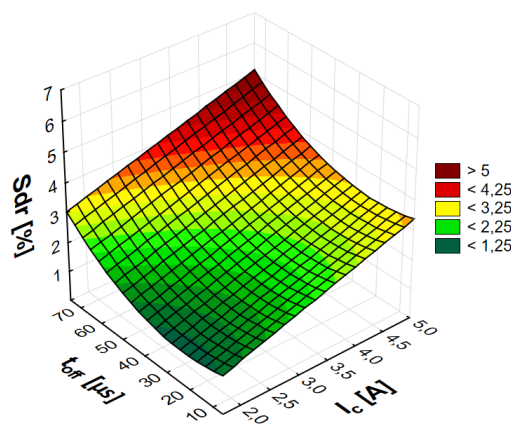
(a)



(b)

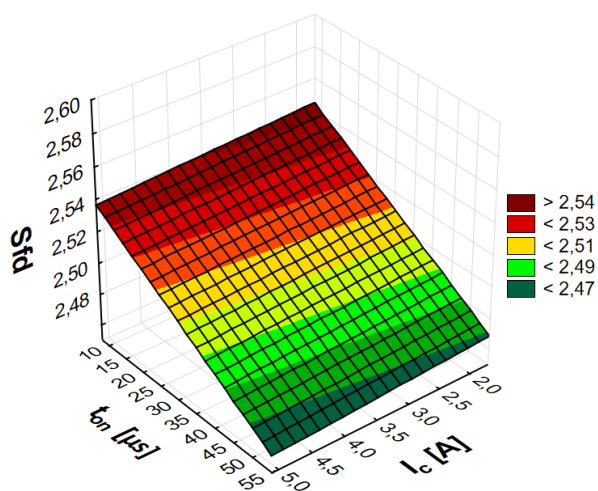


(c)

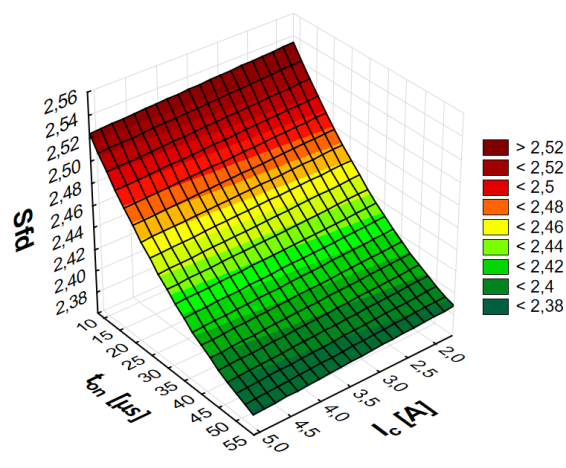


(d)

Rys. 6.21. Zależność względnego rozwinięcia powierzchni S_{dr} od natężenia prądu I_c , czasu wyładowania t_{on} i czasu przerwy t_{off} dla polaryzacji prostej, materiał elektrody: a, c,) AF-5; b, d) S-180

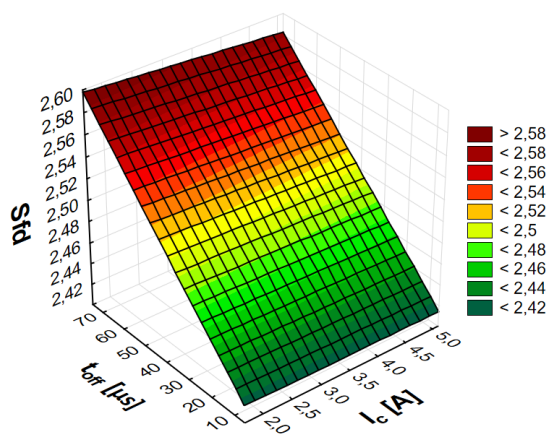


(a)

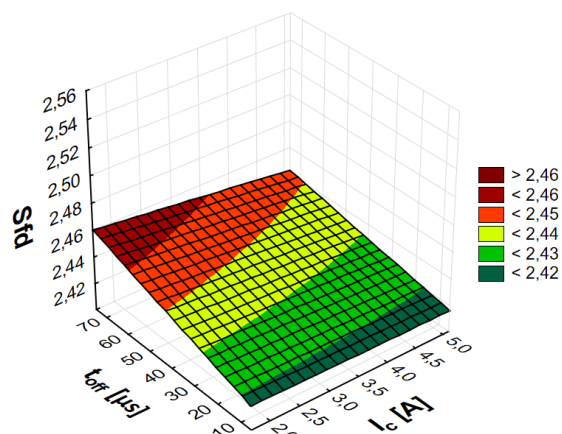


(b)

Rys. 6.22. Zależność wymiaru fraktalnego S_{fd} od natężenia prądu I_c i czasu wyładowania t_{on} dla polaryzacji prostej, materiał elektrody: a) AF-5, b) S-180

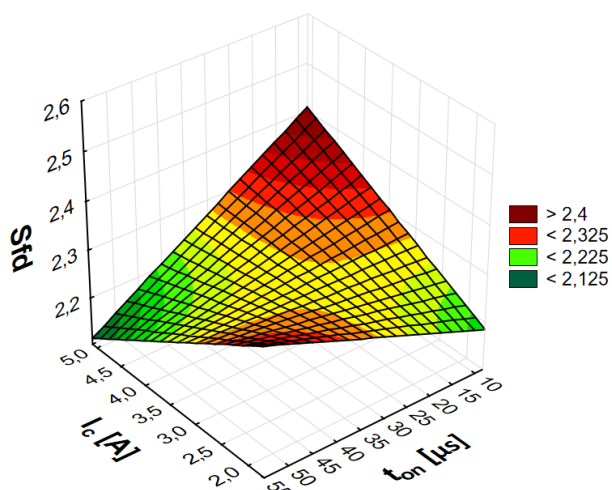


(a)

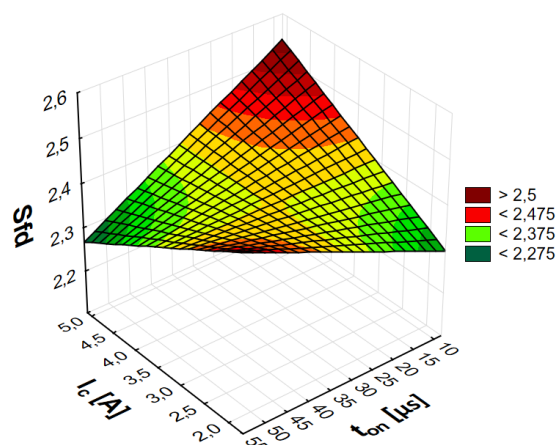


(b)

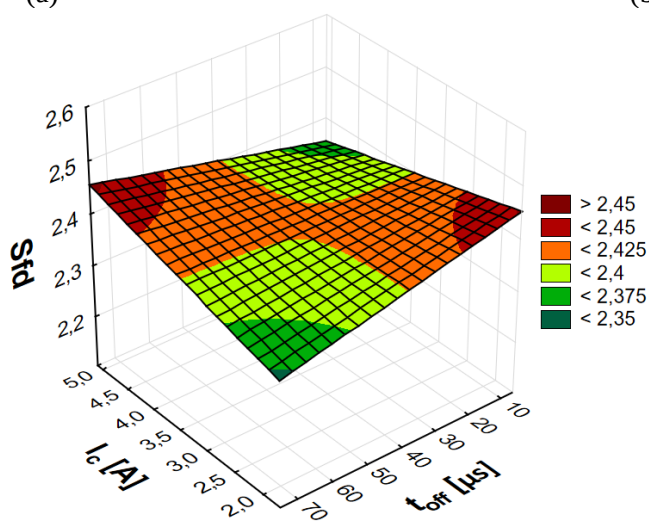
Rys. 6.23. Zależność wymiaru fraktalnego Sfd od natężenia prądu I_c i czasu przerwy t_{off} dla polaryzacji prostej, materiał elektrody: a) AF-5, b) S-180



(a)



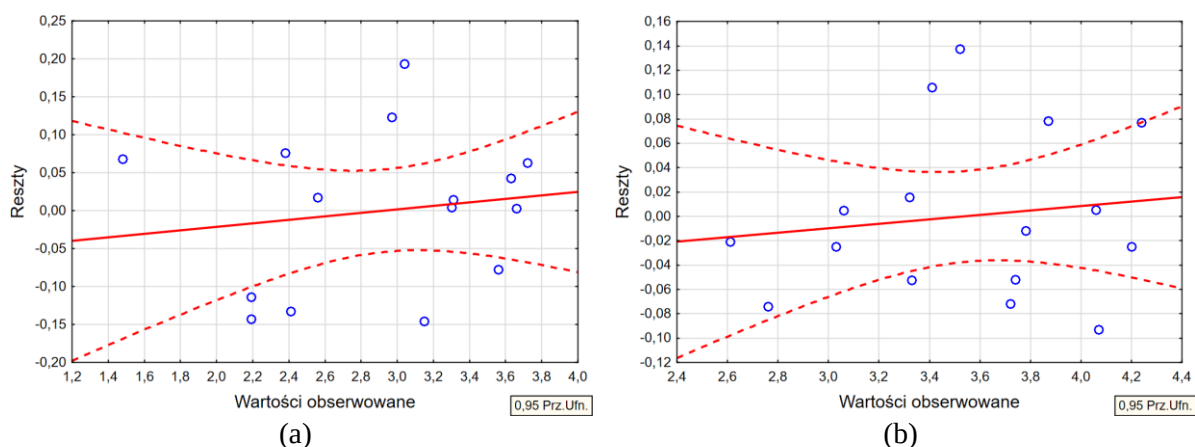
(b)



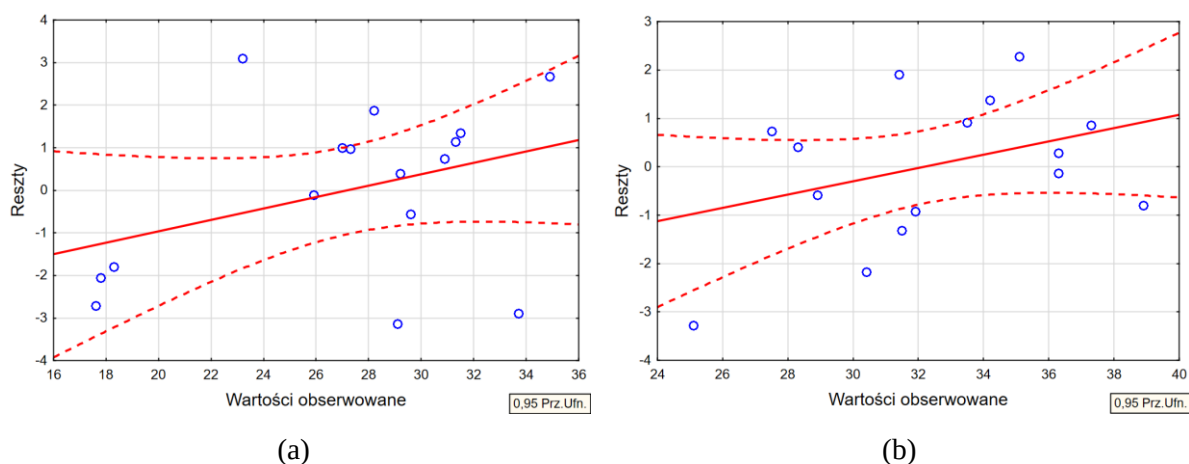
(c)

Rys. 6.24. Zależność wymiaru fraktalnego Sfd od natężenia prądu I_c , czasu wyładowania t_{on} i czasu przerwy t_{off} dla polaryzacji odwróconej, materiał elektrody: a) AF-5; b, c) S-180

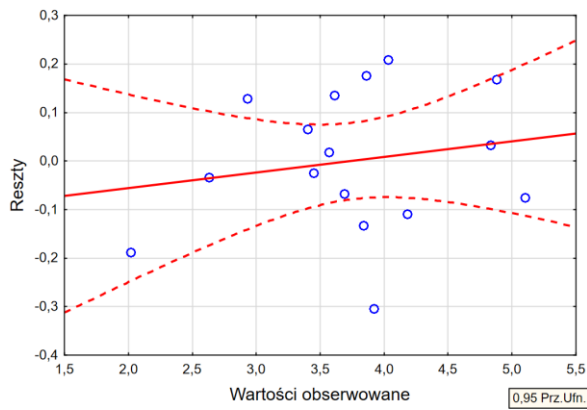
Wyznaczone równania regresji dla badanych parametrów struktury geometrycznej powierzchni charakteryzują się wysokim stopniem korelacji R , a stosunek F/F_{kr} w każdym przypadku jest znacznie większy od jedności. Na rys. 6.25 – 6.28 zaprezentowano przykładowe wykresy reszt w funkcji wartości obserwowanych dla wybranych równań regresji. Na podstawie analizy reszt stwierdzono, iż otrzymane modele statystyczne charakteryzują się niewielkim rozrzutem między wartościami obserwowanymi a przewidywanymi. Dowodzi to o wysokiej wiarygodności otrzymanych równań regresji oraz istotnym wpływie wybranych parametrów obróbki na badane parametry SGP.



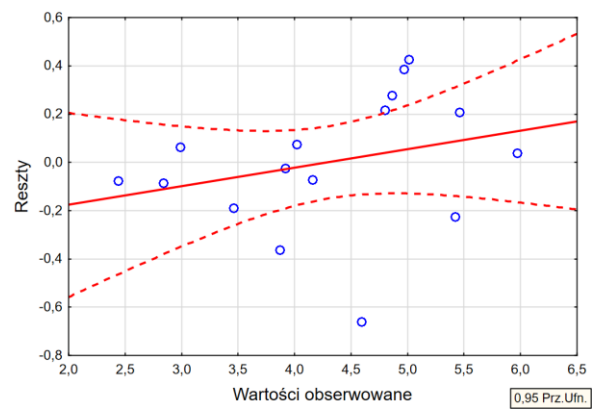
Rys. 6.25. Wykres reszt w funkcji wartości obserwowanych dla równania Sa i polaryzacji prostej, materiał elektrody: a) AF-5, b) S-180



Rys. 6.26. Wykres reszt w funkcji wartości obserwowanych dla równania Sz i polaryzacji prostej, materiał elektrody: a) AF-5, b) S-180

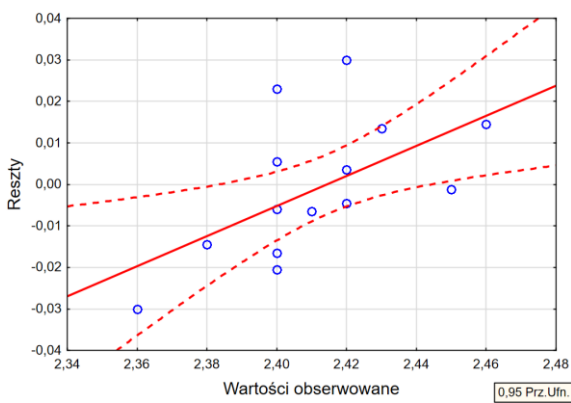


(a)

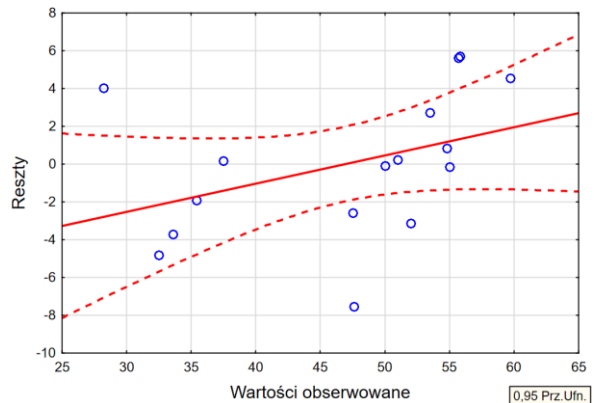


(b)

Rys. 6.27. Wykres reszt w funkcji wartości obserwowanych dla równania S_{dr} , elektroda S-180, polaryzacja: a) prosta, b) odwrócona



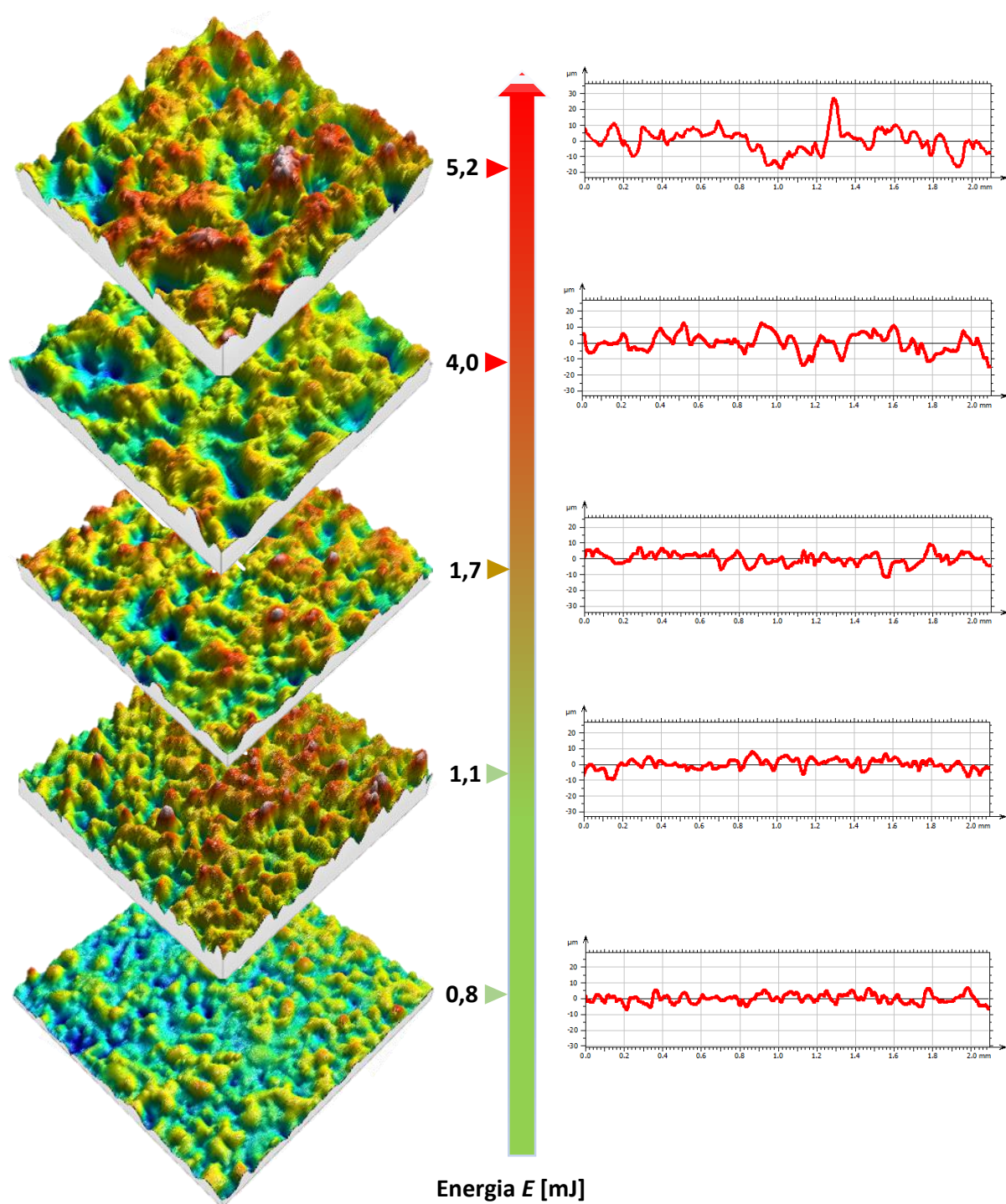
(a)



(b)

Rys. 6.28. Wykres reszt w funkcji wartości obserwowanych dla równania: a) S_{fd} , polaryzacja odwrócona, elektroda S-180, b) S_t , polaryzacja prosta, elektroda AF-5

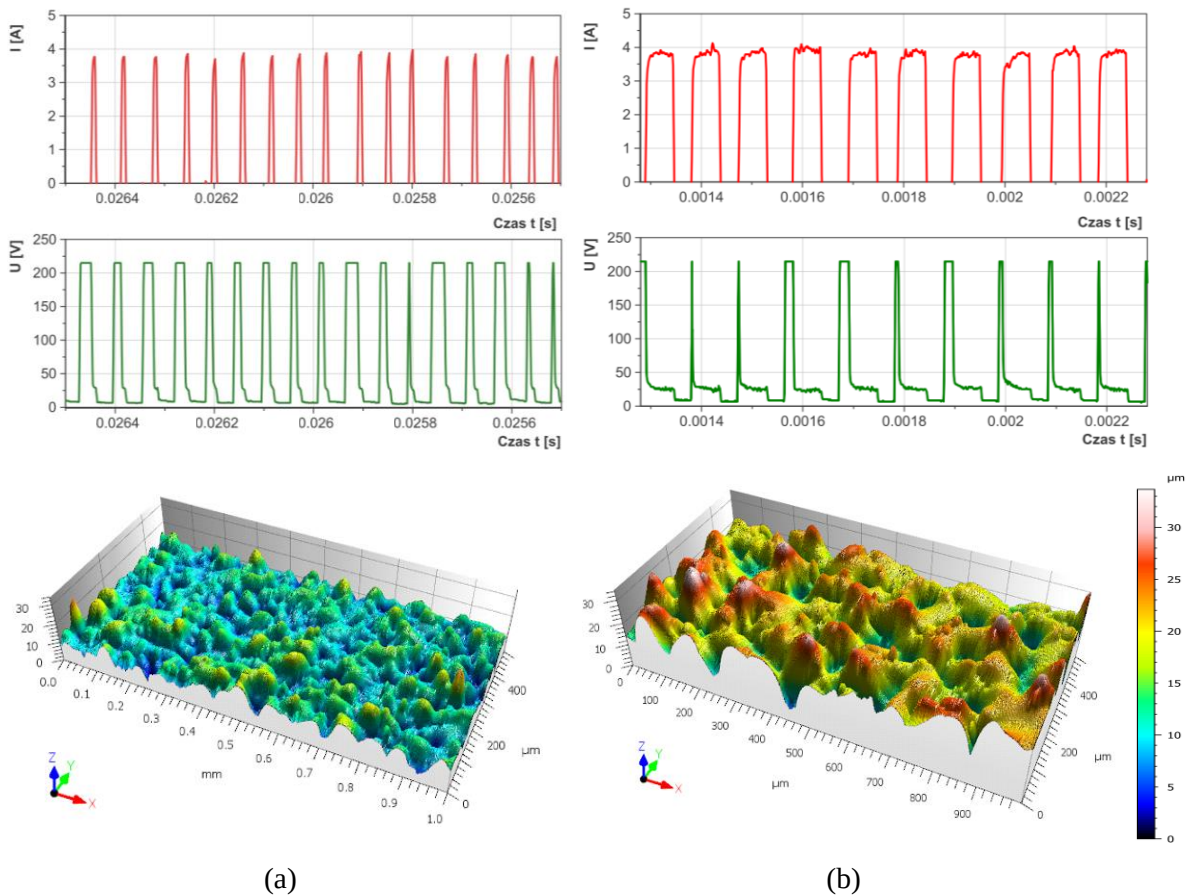
Wartości parametrów wysokościowych chropowości (S_a , S_z , S_t) są w głównej mierze uzależnione od energii pojedynczego wyładowania elektrycznego (rys. 6.29). Wzrost natężenia prądu I_c i czasu wyładowania elektrycznego t_{on} powoduje indukcję większej ilości ciepła w głąb przedmiotu obrabianego i przetopienie większej objętości materiału. Powstałe kratery charakteryzują się większymi głębokościami i nieregularnymi kształtami, co wpływa na generowanie wyższych wysokościowych i wzdłużnych parametrów chropowości powierzchni po obróbce elektroerozyjnej.



Rys. 6.29. Wpływ energii wyładowania elektrycznego na topografię powierzchni

Przy niskich wartościach natężenia prądu nie zaobserwowano znaczących zmian w chropowatości powierzchni wraz ze wzrostem czasu wyładowania. Można to wytłumaczyć zjawiskiem chłodzenia niskoenergetycznego kanału plazmowego przez ciecz dielektryczną. Wydłużenie czasu wyładowania t_{on} przy wysokiej wartości natężenia prądu powoduje zwiększenie średnicy kanału plazmowego i zmniejszenie gęstości energii cieplnej. Kratery

powstałe w takich warunkach obróbki charakteryzują się większymi wymiarami i głębokościami pogarszającymi chropowatość powierzchni (rys. 6.30).

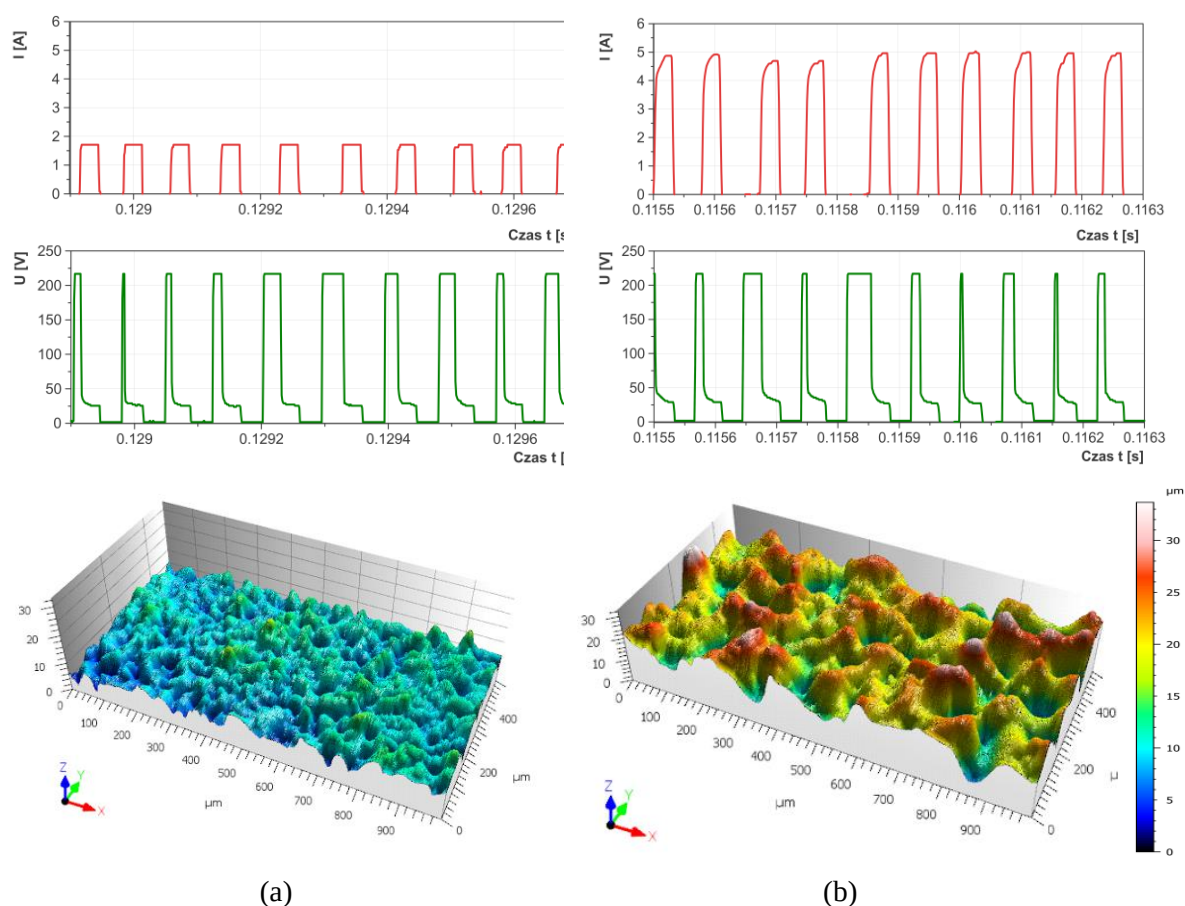


Rys. 6.30. Tekstura powierzchni po obróbce elektroerozyjnej z polaryzacją prostą i elektrodą grafitową AF-5 wraz z przebiegiem napięciowo-prądowym: $I_c = 3,8 \text{ A}$, $t_{off} = 37 \mu\text{s}$, a) $t_{on} = 8 \mu\text{s}$, b) $t_{on} = 55 \mu\text{s}$

Kształt złożoności tekstury powierzchni można opisać gęstością wierzchołków nierówności Sds , względnym rozwinięciem powierzchni Sdr oraz wymiarem fraktalnym Sfd . Wartości parametrów chropowatości Sds i Sdr zależą zarówno od natężenia prądu I_c , jak i czasu wyładowania elektrycznego t_{on} . Natomiast wymiar fraktalny Sfd jest uzależniony w głównej mierze od czasu wyładowania elektrycznego, przy czym jego zmienność jest nieznaczna.

Dla najwyższych wartości natężenia prądu i czasu wyładowania uzyskano najniższą gęstość wierzchołków chropowatości Sds oraz wysokie rozwinięcie powierzchni Sdr . Zwiększenie natężenia prądu I_c oraz czasu wyładowania t_{on} powoduje wzrost średnicy i mocy kanału plazmowego. Z opisanego zjawiska wynika, iż uformowany w powyższych warunkach sferyczny krater ma zwiększoną średnicę oraz głębokość. Nakładające się na siebie ślady pojedynczych wyładowań elektrycznych budują izotropową teksturę powierzchni. Wzrost

energii wyładowania elektrycznego prowadzi do generowania wysokiego profilu chropowatości z większymi odległościami między poszczególnymi wgłębieniami i zaokrąglonymi wierzchołkami nierówności (rys. 6.31). Dla krótkich czasów wyładowań elektrycznych i najmniejszych wartości natężenia prądu powierzchnia po obróbce składała się z większej liczby sferycznych kraterów o znacznie mniejszych głębokościach i średnicach. Oznacza to, iż tekstura powierzchni wytworzona przy niskiej energii wyładowań elektrycznych charakteryzuje się dużą gęstością wierzchołków o zaokrąglonych krawędziach oraz niskim względnym rozwinięciem powierzchni S_{dr} .



Rys. 6.31. Tekstura powierzchni po obróbce elektroerozyjnej z polaryzacją prostą i elektrodą grafitową AF-5 wraz z przebiegiem napięciowo-prądowym: $t_{on} = 30 \mu s$, $t_{off} = 37 \mu s$, a) $I_c = 1,7 A$,
b) $I_c = 5 A$

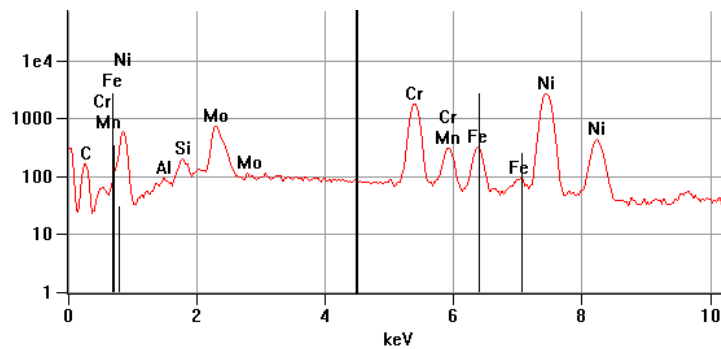
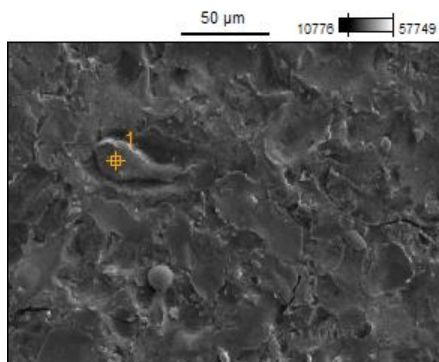
7. BADANIE SKŁADU CHEMICZNEGO POWIERZCHNI WYBRANYCH PRÓBEK PO OBRÓBCE EDM

Charakter zjawisk fizycznych w procesie EDM powoduje utratę ziaren elektrody grafitowej w trakcie wyładowania elektrycznego. Strata materiału jest bardziej krytyczna w przypadku grafitów o dużych ziarnach i polaryzacji odwróconej. Zjawisko to objawia się zwiększeniem zużycia elektrody roboczej oraz może przyczyniać się do powstania impulsów łukowych i zwarciovych bądź dyspersji wyładowania elektrycznego [248].

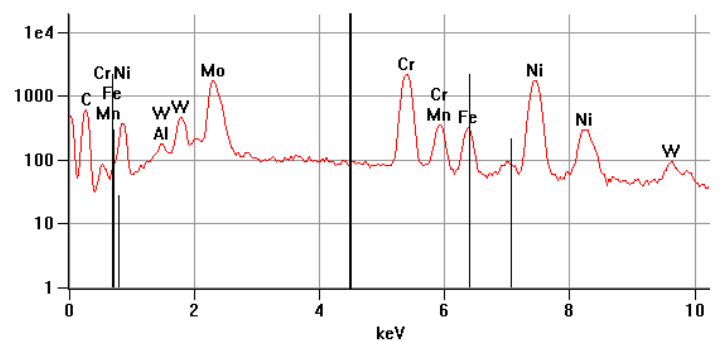
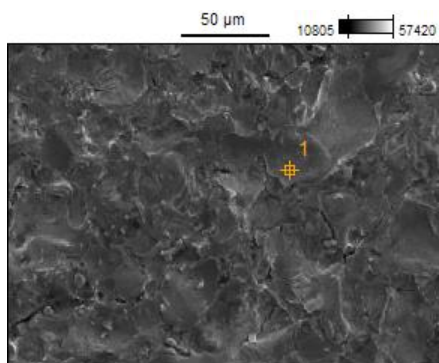
Celem badań składu chemicznego próbek po drażeniu elektroerozyjnym była ocena zawartości wagowej pierwiastków na powierzchni obrabianej, w szczególności transportu pierwiastku węgla z elektrody na przedmiot przy polaryzacji dodatniej i ujemnej.

Badania składu chemicznego wybranych próbek zostały zrealizowane z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego Hitachi SU 3500 z zastosowaniem EDS. Mikroanaliza promieniowania rentgenowskiego daje możliwość analizy jakościowej i ilościowej pierwiastków na podstawie zdefiniowanego mikroobszaru powierzchni zewnętrznej (tzw. analiza punktowa).

Na podstawie obserwacji widma EDS stwierdzono na powierzchni obrabianej obecność węgla z elektrody grafitowej oraz w pewnej części z pirolizy dielektryka. Węgiel dyfunduje w przetopioną objętość materiału w trakcie procesu rekrytalizacji. Nikiel, chrom, molibden, żelazo i mangan pochodzą z rodzimego materiału próbki. Dla polaryzacji odwróconej i eksperymentu nr. 9, w którym zaobserwowano największą wartość zużycia TWR, po obróbce elektrodą drobnoziarnistą AF-5 procentowa zawartość wagowa węgla na powierzchni próbki wyniosła 7,6 % (rys. 7.1a). W przypadku grafitu gruboziarnistego S-180 wartość ta była dwukrotnie większa i wyniosła 15,23 % (rys. 7.1b). Dla polaryzacji dodatniej zawartość procentowa węgla na powierzchni obrabianej jest dużo mniejsza i jest uzależniona w głównej mierze od czasu wyładowania. Dla eksperymentu nr. 11 ($t_{on} = 8 \mu s$) procentowa zawartość węgla wyniosła 2,67 % dla grafitu S-180 (rys. 7.2a). Wydłużając czas impulsu do $t_{on} = 55 \mu s$ (przy ustalonych pozostałych parametrach obróbki) zawartość węgla zmalała do 1,72 % (rys. 7.2b). Wyniki te są zgodne z wynikami zużycia elektrody roboczej. W trakcie obróbki elektroerozyjnej dochodzi do transportu masy między katodą i anodą. Wzrost względnego zużycia elektrody grafitowej objawia się zwiększoną zawartością wagową pierwiastków węgla na powierzchni przedmiotu obrabianego.

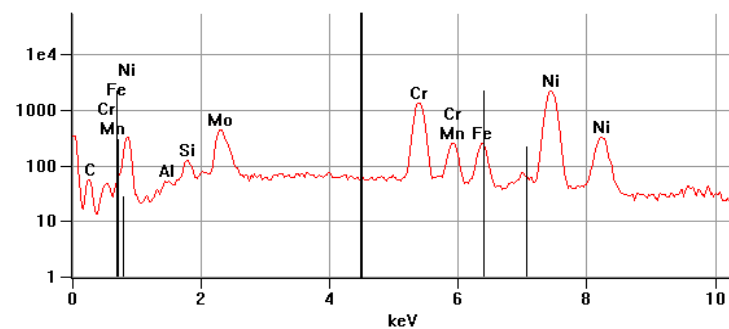
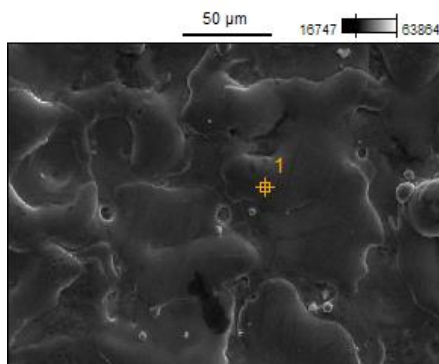


(a)

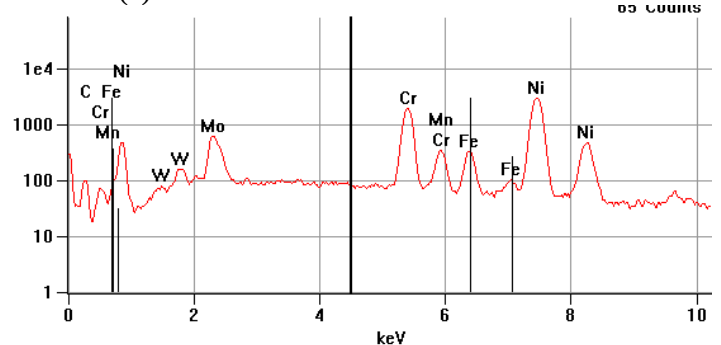
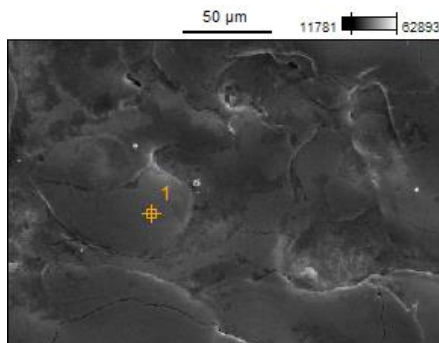


(b)

Rys. 7.1. Widmo EDS powierzchni próbki dla polaryzacji odwróconej, parametrów obróbki: $I_c = 1,7$ A, $t_{on} = 31$ μ s, $t_{off} = 37$ μ s i elektrod grafitowych: a) AF-5, b) S-180



(a)



(b)

Rys. 7.2. Widmo EDS powierzchni próbki dla polaryzacji prostej, elektrody S-180 i parametrów obróbki: $I_c = 3,8$ A, $t_{off} = 37$ μ s, a) $t_{on} = 8$ μ s, b) $t_{on} = 55$ μ s

Na podstawie obserwacji makroskopowych stwierdzono, że powierzchnie uzyskane w trakcie drążenia z biegunowością prostą charakteryzują się wysoką izotropowością bez widocznych defektów tekstury i produktów erozji (rys. 7.3). W przypadku polaryzacji odwróconej częstym zjawiskiem jest występowanie narostów i przepaleń na powierzchni próbek (rys. 7.4). Defekty te występują w sytuacji, w której czas wyładowania elektrycznego jest dłuższy od czasu przerwy między impulsami (rys. 7.5).

Na podstawie obserwacji widma EDS pojedynczego narostu stwierdzono występowanie w głównej mierze pierwiastków węgla (rys. 7.4). Ze względu na intensywne zużycie elektrody roboczej przy polaryzacji odwróconej oderwane ziarna grafitu koncentrują się w miejscu o największym natężeniu pola elektrycznego między katodą i anodą. Ich nadmiar w szczelinie powoduje niejednorodne wyładowania elektryczne oraz impulsy zwarciove, które skutkują punktowym przypaleniem powierzchni obrabianej. Wydłużenie czasu przerwy między impulsami zmniejsza prawdopodobieństwo wystąpienia przypaleń ze względu na efektywniejsze oczyszczenie szczeliny roboczej z ziaren grafitu oraz produktów erozji.



$I_c = 2,7 \text{ A}$, $t_{on} = 17 \text{ }\mu\text{s}$, $t_{off} = 51 \text{ }\mu\text{s}$



$I_c = 3,8 \text{ A}$, $t_{on} = 30 \text{ }\mu\text{s}$, $t_{off} = 37 \text{ }\mu\text{s}$



$I_c = 2,7 \text{ A}$, $t_{on} = 41 \text{ }\mu\text{s}$, $t_{off} = 19 \text{ }\mu\text{s}$



$I_c = 4 \text{ A}$, $t_{on} = 17 \text{ }\mu\text{s}$, $t_{off} = 51 \text{ }\mu\text{s}$

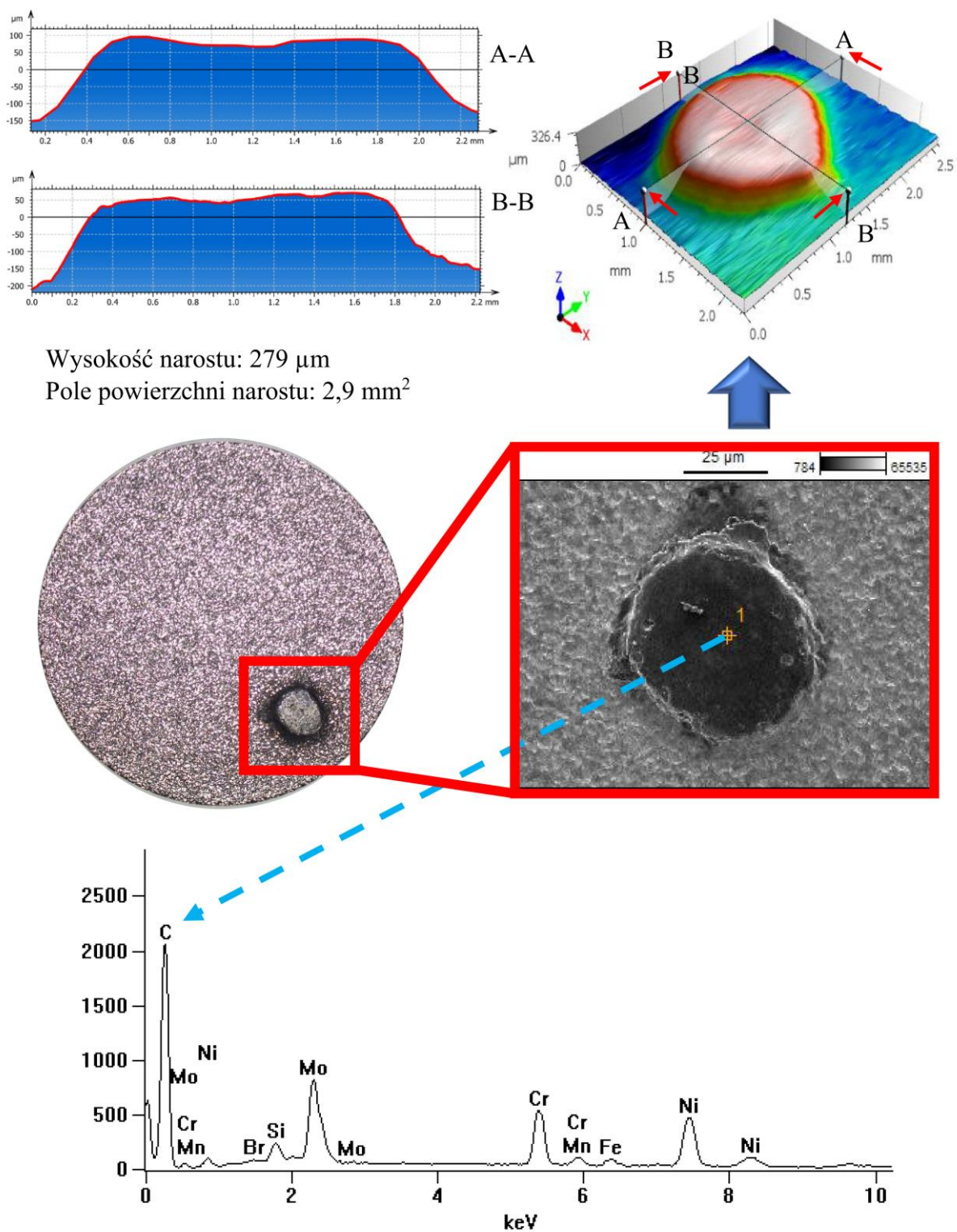


$I_c = 2,7 \text{ A}$, $t_{on} = 17 \text{ }\mu\text{s}$, $t_{off} = 19 \text{ }\mu\text{s}$

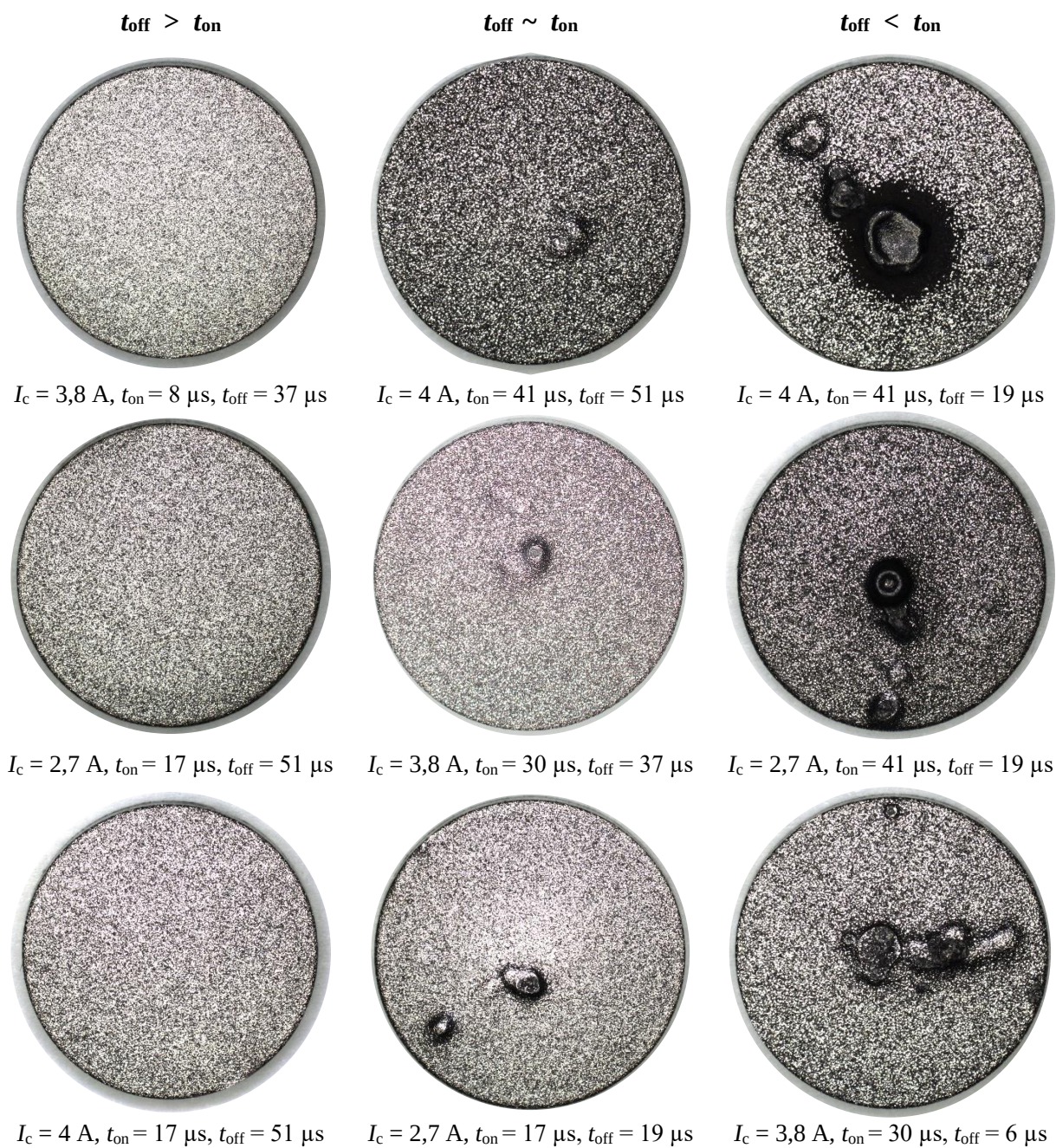


$I_c = 3,8 \text{ A}$, $t_{on} = 30 \text{ }\mu\text{s}$, $t_{off} = 6 \text{ }\mu\text{s}$

Rys. 7.3. Fotografie zewnętrznej tekstury powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą S-180 z polaryzacją prostą



Rys. 7.4. Analiza składu chemicznego oraz defektu powierzchni próbki po obróbce elektrodą AF-5 z parametrami: $I_c = 5 \text{ A}$, $t_{on} = 30 \mu\text{s}$, $t_{off} = 37 \mu\text{s}$, polaryzacja odwrócona



Rys.7.5. Fotografie zewnętrznej tekstury powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą S-180 z polaryzacją odwróconą dla przypadków: $t_{off} > t_{on}$, $t_{off} \sim t_{on}$, $t_{off} < t_{on}$

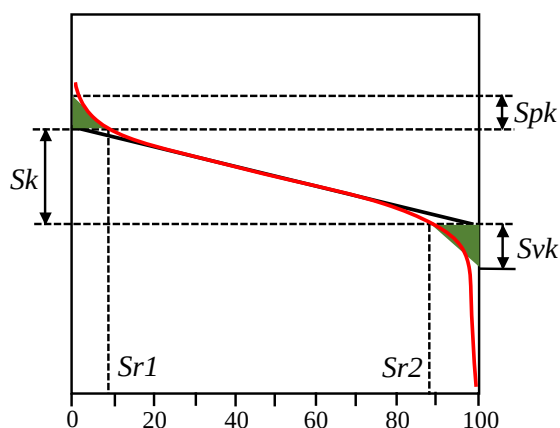
8. UDZIAŁ NOŚNY POWIERZCHNI PO OBRÓBCE EDM

Warstwa wierzchnia ukonstytuowana w wyniku złożonego procesu obróbki elektroerozyjnej determinuje przebieg i intensywność procesu zużycia współpracujących elementów maszyn. Wynika to głównie z oddziaływania procesów tarcia, które powodują wzajemne zużycie i uszkodzenie powierzchni współpracujących. Celem analizy krzywych udziału nośnego powierzchni i jej parametrów była ocena właściwości tribologicznych warstwy wierzchniej. Obok parametrów wysokościowych i hybrydowych chropowatości analiza udziału nośnego SGP stanowi istotne uzupełnienie oceny cech warstwy wierzchniej wytworzonych przedmiotów z punktu widzenia ich przydatności [249, 250, 251].

Wykresy udziału nośnego powierzchni po obróbce EDM wraz z jej parametrami były wyznaczone w programie MountainsLab Premium 8.1 na podstawie pomiaru fragmentu powierzchni 2 x 2 mm na profilometrze skanującym FORM TALYSURF Series 2 firmy Taylor Hobson.

Krzywa udziału nośnego (nazywana również wykresem Abbotta–Firestone’a) dostarcza istotnych informacji na temat profilu powierzchni i właściwości tribologicznych warstwy wierzchniej (rys. 8.1). Na jej podstawie można definiować podstawowe funkcje użytkowe wytworzonych elementów. Parametry, które charakteryzują wykres udziału nośnego to:

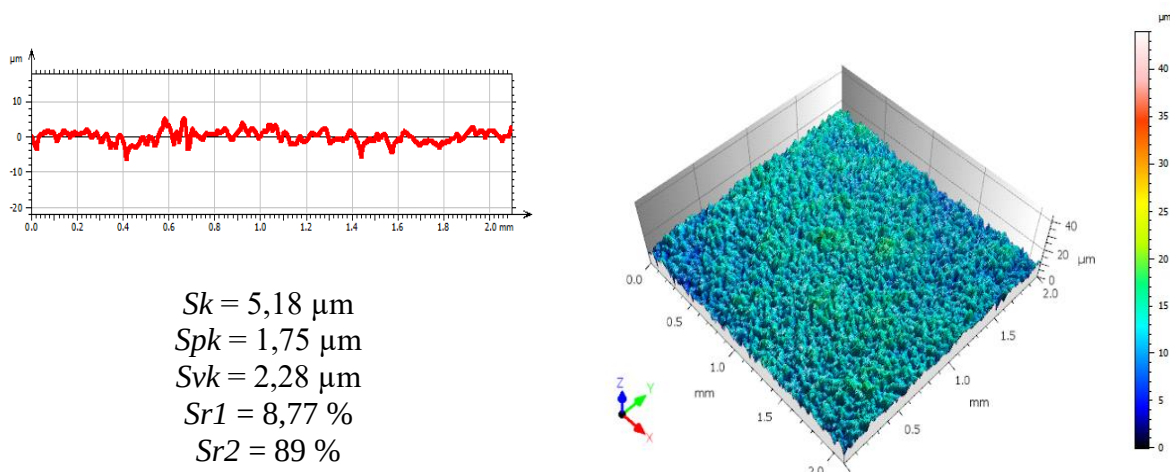
- Svk – zredukowana wysokość wgłębień [μm],
- Sk – zredukowana wysokość chropowatości rdzenia [μm],
- Spk – zredukowana wysokość wzniesień [μm],
- $Sr1$ – udział nośny wierzchołków [%],
- $Sr2$ – udział nośny wgłębień [%].



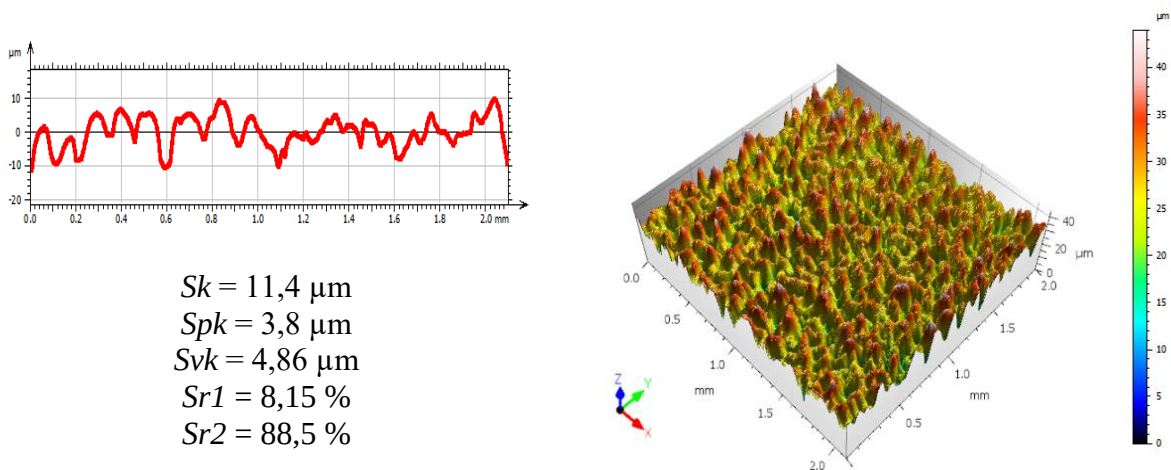
Rys. 8.1. Wykres udziału nośnego powierzchni

Zredukowana wysokość wzniesień Spk definiuje średnią wysokość wzniesień wystających wierzchołków nierówności ponad profil rdzenia chropowatości. Parametr Spk może dostarczyć informacji na temat odporności powierzchni na ścieranie. Im mniejsza wartość parametru Spk tym odporność powierzchni na ścieranie jest większa. Zredukowana wysokość wgłębień Svk determinuje wartość średnią wgłębień występujących poniżej profilu rdzenia chropowatości. Na podstawie wartości parametru Svk można ocenić właściwości smarne powierzchni oraz zdolność utrzymania warstewki oleju smarującego przez powierzchnie ślizgowe, przy czym im wyższa wartość parametru Svk tym powierzchnia charakteryzuje się lepszymi właściwościami smarnymi. Zredukowana wysokość chropowatości rdzenia Sk określa głębokość chropowatości z wyłączeniem wyróżniających się wzniesień i głębokości profilu nierówności.

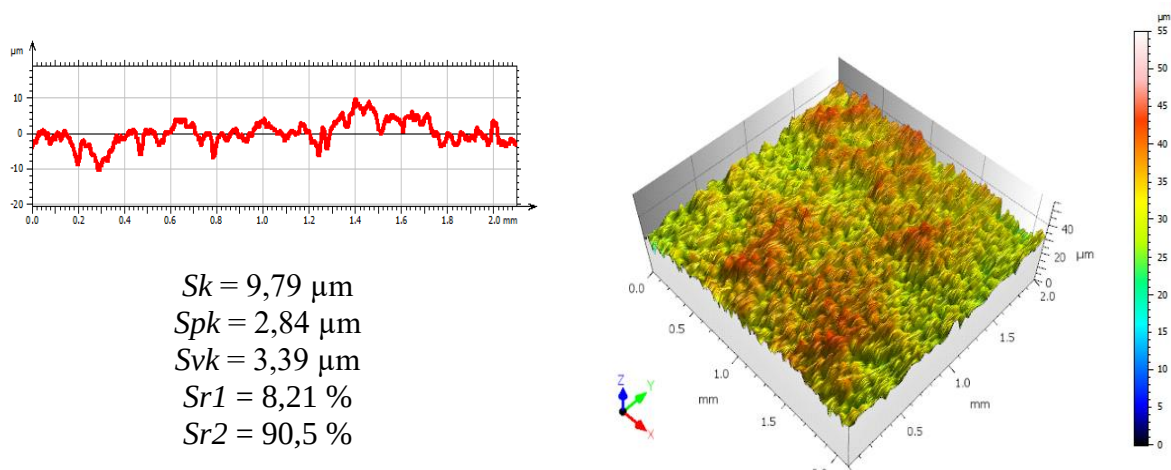
Powierzchnia po obróbce elektroerozyjnej charakteryzuje się wysoką izotropowością z dużą ilością występujących losowo wzniesień i wgłębień profilu chropowatości. Ogólnie występuje duża zależność pomiędzy parametrami struktury geometrycznej powierzchni a właściwościami tribologicznymi warstwy wierzchniej. Dokonano przykładowej analizy udziału nośnego powierzchni wybranych próbek, których stan warstwy wierzchniej odpowiada warunkom obróbki półwykończeniowej i wykończeniowej przy polaryzacji prostej i odwróconej elektrodami AF-5 i S-180 (rys. 8.2 – 8.9).



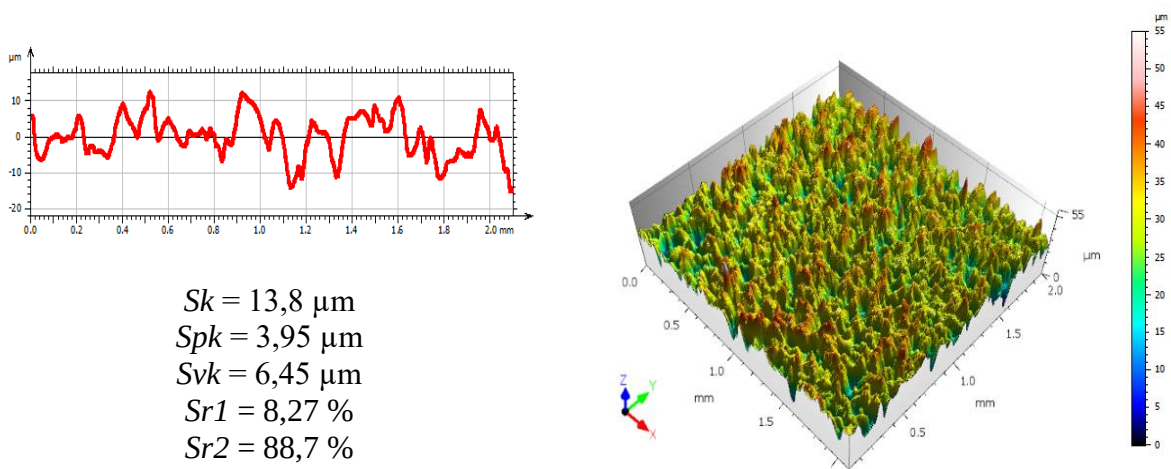
Rys. 8.2. Parametry udziału nośnego, profilograf, obraz stereometryczny powierzchni po obróbce elektrodą grafitową AF-5 z parametrami: $I_c = 1,7 \text{ A}$, $t_{on} = 30 \mu\text{s}$, $t_{off} = 37 \mu\text{s}$, polaryzacja prosta



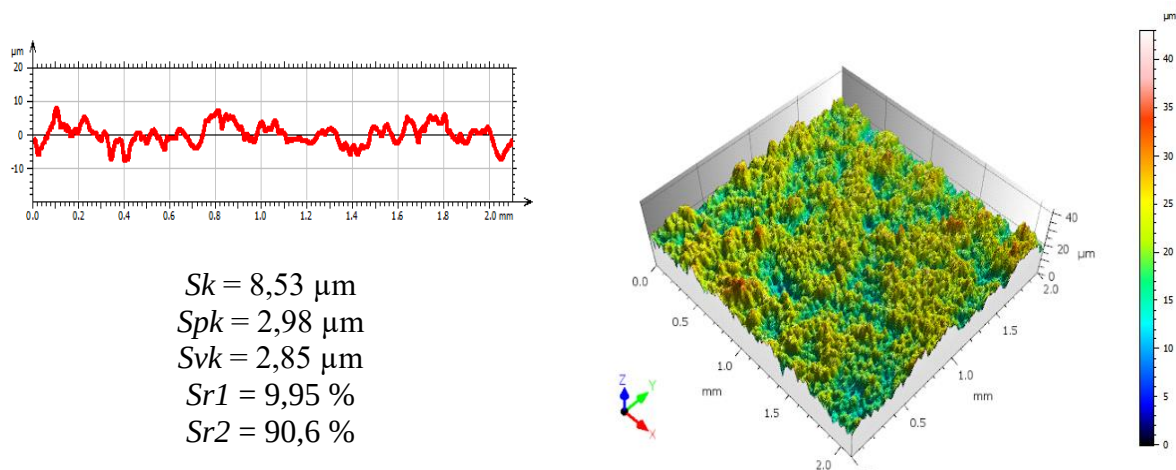
Rys. 8.3. Parametry udziału nośnego, profilograf, obraz stereometryczny powierzchni po obróbce elektrodą grafitową AF-5 z parametrami: $I_c = 5 \text{ A}$, $t_{on} = 30 \mu\text{s}$, $t_{off} = 37 \mu\text{s}$, polaryzacja prosta



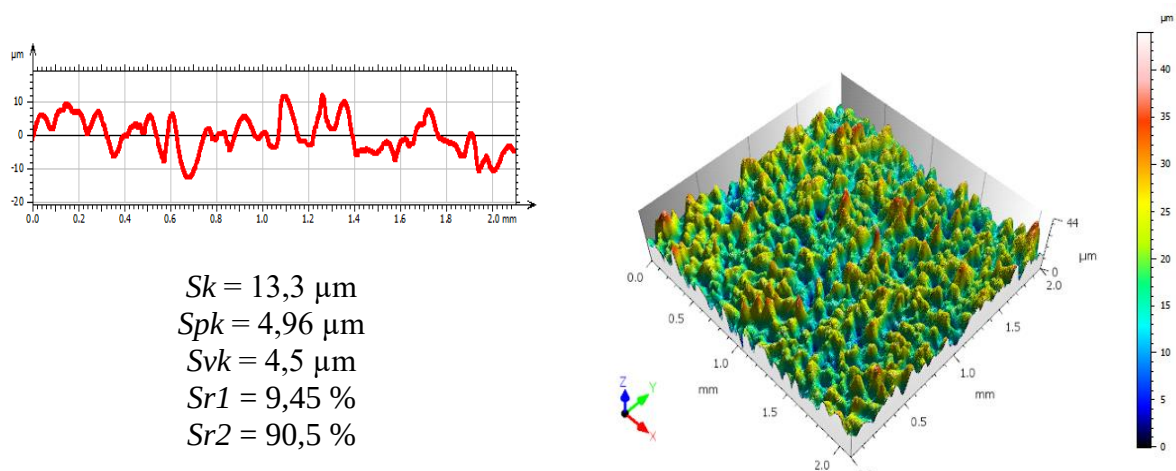
Rys. 8.4. Parametry udziału nośnego, profilograf, obraz stereometryczny powierzchni po obróbce elektrodą grafitową AF-5 z parametrami: $I_c = 1,7 \text{ A}$, $t_{on} = 30 \mu\text{s}$, $t_{off} = 37 \mu\text{s}$, polaryzacja ujemna



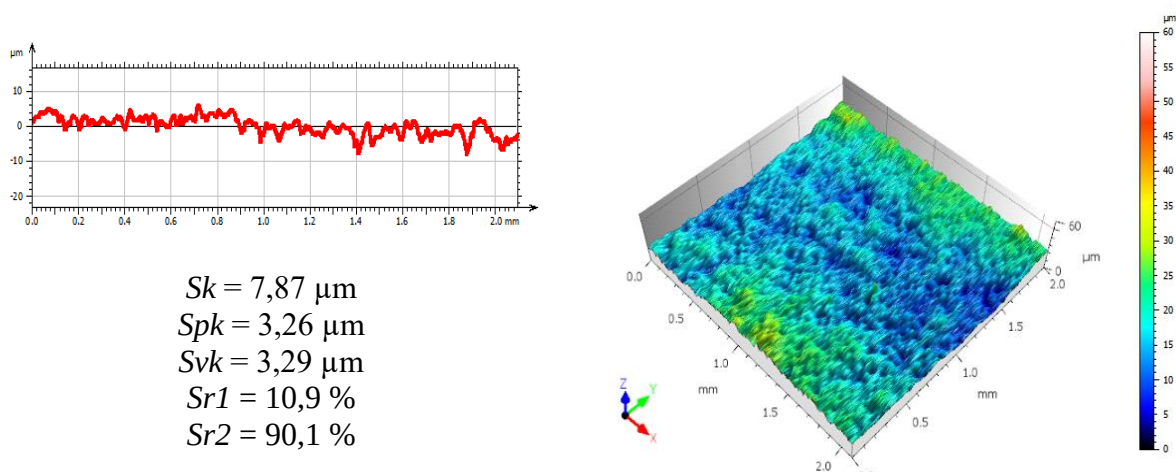
Rys. 8.5. Parametry udziału nośnego, profilograf, obraz stereometryczny powierzchni po obróbce elektrodą grafitową AF-5 z parametrami: $I_c = 5 \text{ A}$, $t_{on} = 30 \mu\text{s}$, $t_{off} = 37 \mu\text{s}$, polaryzacja ujemna



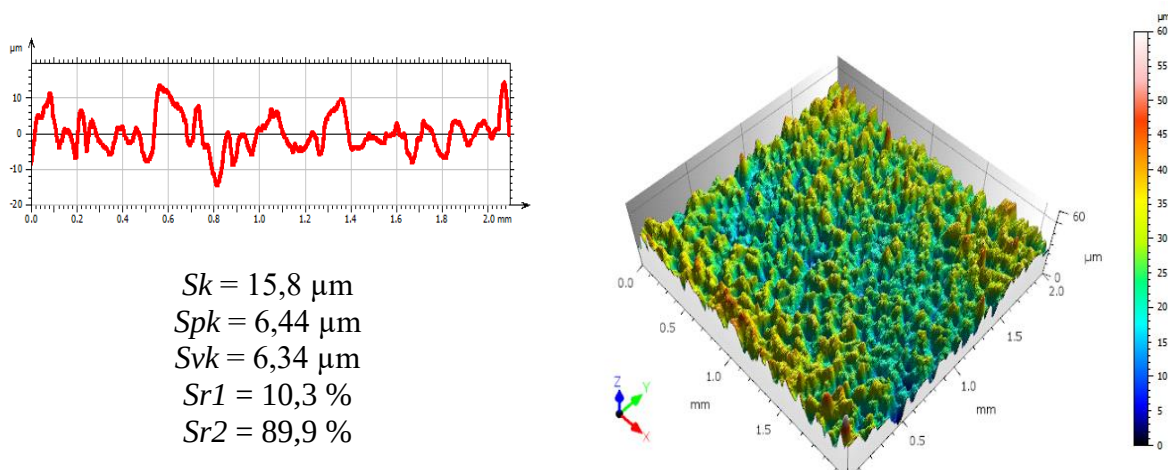
Rys. 8.6. Parametry udziału nośnego, profilograf, obraz stereometryczny powierzchni po obróbce elektrodą grafitową S-180 z parametrami: $I_c = 1,7 \text{ A}$, $t_{on} = 30 \mu\text{s}$, $t_{off} = 37 \mu\text{s}$, polaryzacja prosta



Rys. 8.7. Parametry udziału nośnego, profilograf, obraz stereometryczny powierzchni po obróbce elektrodą grafitową S-180 z parametrami: $I_c = 5 \text{ A}$, $t_{on} = 30 \mu\text{s}$, $t_{off} = 37 \mu\text{s}$, polaryzacja prosta



Rys. 8.8. Parametry udziału nośnego, profilograf, obraz stereometryczny powierzchni po obróbce elektrodą grafitową S-180 z parametrami: $I_c = 1,7 \text{ A}$, $t_{on} = 30 \mu\text{s}$, $t_{off} = 37 \mu\text{s}$, polaryzacja ujemna



Rys. 8.9. Parametry udziału nośnego, profilograf, obraz stereometryczny powierzchni po obróbce elektrodą grafitową S-180 z parametrami: $I_c = 5 \text{ A}$, $t_{on} = 30 \mu\text{s}$, $t_{off} = 37 \mu\text{s}$, polaryzacja ujemna

Zredukowana wysokość wzniesień Spk dla powierzchni po obróbce w warunkach wykończeniowych EDM posiada niższą wartość niż dla powierzchni uzyskanej po obróbce półwykończeniowej. Wysokość chropowatości rdzenia osiąga również niższe wartości zarówno dla elektrody AF-5, jak i S-180. Udział nośny wierzchołków stanowi około 8 - 11 % powierzchni. Wzrost energii pojedynczego wyładowania (natężenia prądu i czasu wyładowania) powoduje erozję większej objętości materiału, prowadząc tym samym do zmiany parametrów krzywej nośności. W warunkach obróbki półwykończeniowej zaobserwowano w niektórych przypadkach nawet dwukrotny wzrost parametru Spk , jak i Sk oraz Svk . Udział nośny wierzchołków pozostał na podobnym, niezmiennym poziomie, jak w przypadku obróbki wykończeniowej ($Sr1 = 8 - 11\%$).

Wzrost wielkości ziarna elektrod grafitowych powoduje zwiększenie parametrów chropowatości, a tym samym parametrów Spk i Sk , przy czym wysokości wgłębień profilu Svk przyjmuje podobne wartości, jak w przypadku obróbki EDM elektrodą drobnoziarnistą. Powierzchnia otrzymana w trakcie obróbki EDM z polaryzacją odwróconą charakteryzuje się wyższymi wartościami parametru Spk i Sk niż w przypadku obróbki z biegunowością prostą dla elektrod AF-5 oraz S-180. Powierzchnia posiada również lepsze właściwości smarne z uwagi na wyższą wartość wgłębień profilu nierówności Svk .

Elektroda grafitowa AF-5 zapewniła uzyskanie powierzchni o najlepszej odporności na ścieranie po obróbce elektroerozyjnej z polaryzacją prostą, ze względu na najniższe wartości parametrów Spk i Sk zarówno dla niskiej, jak i wysokiej energii wyładowania elektrycznego. Może mieć to bezpośredni związek z niskim udziałem porów o mniejszych rozmiarach w graficie AF-5.

9. BADANIA WPLYWU WIELKOŚCI ZIARNA ELEKTROD GRAFITOWYCH I PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH NA STRUKTURĘ METALOGRAFICZNĄ POWIERZCHNI PO EDM Z POLARYZACJĄ PROSTĄ

Obróbka elektroerozyjna znalazła szeroką implementację w kształtowaniu materiałów trudnoobrabialnych o złożonej geometrii. Ze względu na usuwanie materiału w wyniku wyładowań elektrycznych możliwa jest obróbka elementów cienkościennych bez ich deformacji, z uwagi na brak bezpośredniego kontaktu mechanicznego elektrody z przedmiotem. W wyniku oddziaływania wyładowań elektrycznych i cieczy dielektrycznej w szczelinie dochodzi do intensywnego nagrzewania i chłodzenia pewnej objętości materiału. Wskutek oddziaływania procesów cieplnych i przemian fazowych w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego konstituowane są charakterystyczne warstwy, których właściwości strukturalne i fizykochemiczne różnią się od materiału rodzimego. Najbardziej zewnętrzną warstwą jest warstwa przetopiona (zwana potocznie warstwą białą), następnie strefa wpływów cieplnych (HAZ – *Heat Affected Zone*) i odpuszczona (przejściowa).

Warstwa przetopiona powstaje w wyniku roztopienia oraz gwałtownego chłodzenia i rekrytalizacji pewnej objętości materiału. Warstwa ta jest bogata w węgiel, który przedostał się w wyniku dyfuzji atomów węgla z materiału rodzimego i cieczy dielektrycznej. Głównymi fazami metalurgicznymi występującymi w warstwie przetopionej jest martenzyt i austenit szczątkowy. Warstwa przetopiona charakteryzuje się mniejszą twardością w stosunku do materiału rdzenia.

Strefa wpływów cieplnych znajduje się bezpośrednio pod warstwą przetopioną. Materiał ze strefy HAZ nie został nagrzany do poziomu temperatury topnienia, jak w przypadku warstwy przetopionej. Szybkość chłodzenia strefy HAZ jest gwałtowna, lecz wolniejsza od szybkości odprowadzania ciepła ze strefy przetopionej. Z tego względu warstwa strefy wpływów cieplnych posiada strukturę martenzytyczną i charakteryzuje się większą twardością od materiału rdzenia.

Warstwa odpuszczona powstaje w wyniku nagrzania do wysokiej temperatury a następnie chłodzenia przez odprowadzanie ciepła do materiału rdzenia. Szybkość chłodzenia jest zbyt niska, żeby materiał uległ zahartowaniu, dlatego warstwa materiału ulega odpuszczeniu. Warstwa odpuszczona posiada mniejszą twardość od materiału rodzimego.

Badania mikrostruktury warstwy wierzchniej przeprowadzono na próbkach po obróbce EDM z polaryzacją prostą dla elektrody AF-5 i S-180, zgodnie z parametrami przyjętymi

w eksperymencie planowanym. Próbki zostały przecięte na wycinarce elektroerozyjnej prostopadle do powierzchni obrabianej i zainkludowane na gorąco w żywicy. Następnie próbki poddano zgrubnemu i wykończeniowemu szlifowaniu i polerowaniu. W celu uwidocznienia mikrostruktury materiału dokonano trawienia chemicznego odczynnikiem Adlera. Badania struktury metalograficznej przygotowanych próbek realizowano z wykorzystaniem mikroskopu optycznego Olympus BX51M. Dla każdego eksperymentu dokonano 15 pomiarów grubości warstwy przetopionej i wyznaczono wartość średnią.

9.1. Badanie grubości warstwy przetopionej

W tabeli 9.1 zestawiono średnie grubości warstwy przetopionej dla próbek po obróbce elektroerozyjnej elektrodą grafitową AF-5 i S-180.

Tabela 9.1. Średnie wartości grubości warstwy białej

Polaryzacja prosta (+)					
Lp.	I [A]	t_{on} [μs]	t_{off} [μs]	WLT [μm]	
				AF-5	S-180
1	2,7	17	19	4,0	5,0
2	2,7	17	51	4,4	5,3
3	2,7	41	19	6,6	7,2
4	2,7	41	51	6,5	7,4
5	4	17	19	6,7	7,1
6	4	17	51	6,7	7,2
7	4	41	19	9,9	11,0
8	4	41	51	9,0	11,2
9	1,7	30	37	5,2	5,7
10	5	30	37	10,4	10,5
11	3,8	8	37	3,6	4,6
12	3,8	55	37	11,6	12,8
13	3,8	30	6	5,8	6,5
14	3,8	30	75	5,9	6,7
15	3,8	30	37	5,8	6,7
16	3,8	30	37	6,0	6,7

Procesy cieplne, mechaniczne i chemiczne występujące w warstwie wierzchniej w trakcie wyładowań elektrycznych wprowadzają istotne zmiany w strukturze

metalograficznej. W oparciu o analizę fotografii zglądów metalograficznych badanych próbek stwierdzono występowanie wyłącznie warstwy przetopionej (rys. 9.1). Brak warstwy wpływów cieplnych można tłumaczyć właściwościami stopu Hastelloy C-22, który nie utwardza się wydzieleniowo.



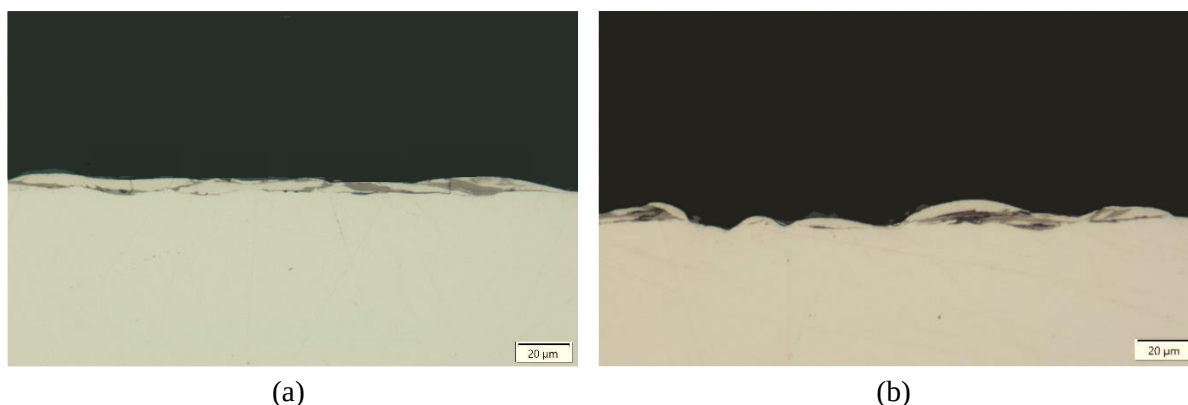
Rys. 9.1. Mikrostruktura warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej

Warstwa przetopiona charakteryzuje się niejednorodnością i nieciągłością oraz posiada zróżnicowaną grubość. Nieciągłość warstwy przetopionej wynika z losowości występowania wyładowań elektrycznych na powierzchni obrabianej i nakładania się na siebie pojedynczych kraterów. Grubość warstwy przetopionej jest ściśle uzależniona od parametrów elektrycznych oraz przewodności elektrycznej elektrod grafitowych. Dla elektrody AF-5 średnia grubość warstwy przetopionej zawiera się w przedziale $WLT = 3,6 - 11,6 \mu m$, natomiast dla elektrody S-180 zakres ten wynosi $WLT = 4,6 - 12,8 \mu m$.

Dla niskiej energii wyładowania elektrycznego średnia grubość warstwy przetopionej posiada niższą wartość niż w przypadku wyładowań wysokoenergetycznych. Wzrost natężenia prądu i czasu wyładowania powoduje zwiększenie ilości erodowanego materiału i głębokości uformowanych kraterów. Powstała warstwa charakteryzuje się dużą zmiennością grubości oraz nieciągłością.

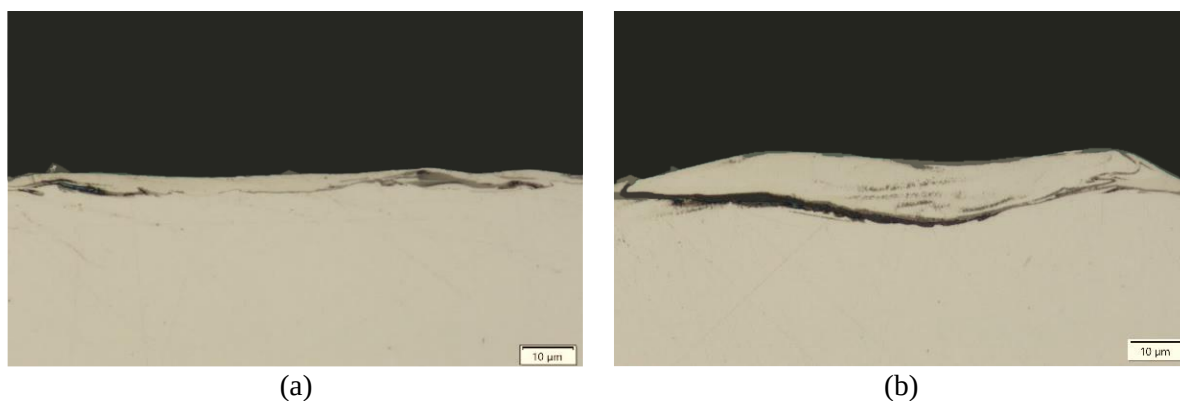
Grubość warstwy przetopionej po obróbce elektrodą S-180, w porównaniu z elektrodą AF-5 przy ustalonych parametrach obróbki, jest w każdym przypadku większa średnio o 2 – 25 %. Elektroda S-180 posiada mniejszą rezystancję i generuje intensywniejsze wyładowania elektryczne w szczelnie niż grafit AF-5. W konsekwencji grafit o wyższej przewodności elektrycznej dostarcza więcej energii cieplnej do materiału obrabianego powodując wzrost grubości warstwy przetopionej.

W wyniku odrywania się ziaren grafitu w trakcie wyładowań elektrycznych mogą one zderzać się z przetopioną objętością materiału i intensyfikować proces erozji. Większe ziarna grafitu odrywają się częściej i w wyniku zderzenia efektywniej usuwają roztopiony materiał ze sferycznego krateru. Opisane zjawiska powodują, iż warstwa przetopiona po obróbce elektrodą S-180 charakteryzuje się większą różnicą grubości oraz nieciągłością (rys. 9.2).

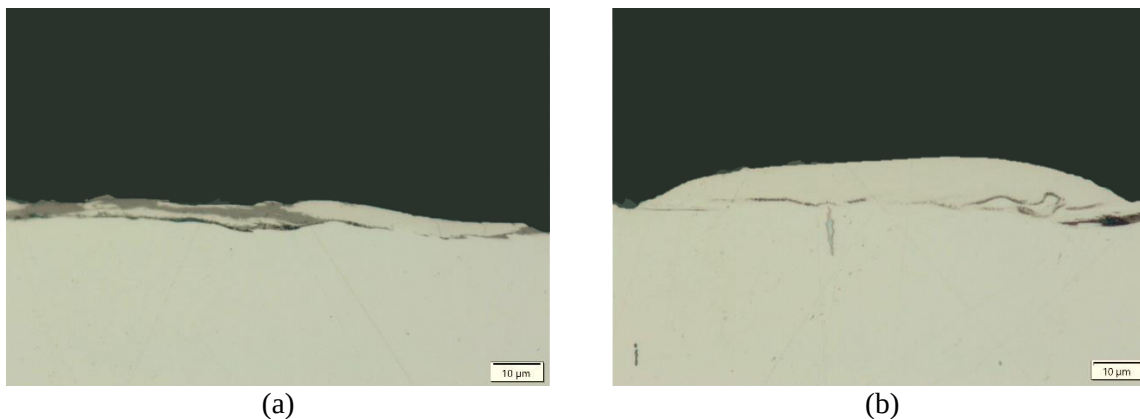


Rys. 9.2. Zgłady metalograficzne warstwy wierzchniej po obróbce z parametrami $I_c = 1,7$ A, $t_{on} = 30$ μ s, $t_{off} = 37$ μ s, elektrodą: a) AF-5, b) S-180

Wzrost natężenia prądu od $I_c = 1,7$ do 5 A, przy stałych wartościach czasu wyładowania i przerwy między impulsami ($t_{on} = 30$ μ s, $t_{off} = 37$ μ s), powoduje znaczący wzrost grubości warstwy przetopionej (rys. 9.3 i 9.4). Wynika to bezpośrednio ze wzrostu energii pojedynczego wyładowania elektrycznego i objętości materiału usuniętego. Przy wysokich wartościach natężenia prądu warstwa przetopiona charakteryzuje się większymi nierównościami i nieciągłością.



Rys. 9.3. Zgłady metalograficzne warstwy wierzchniej po obróbce elektrodą S-180 z polaryzacją prostą wraz z odpowiadającymi im parametrami: $t_{on} = 30$ μ s, $t_{off} = 37$ μ s, a) $I_c = 1,7$ A, b) $I_c = 5$ A,

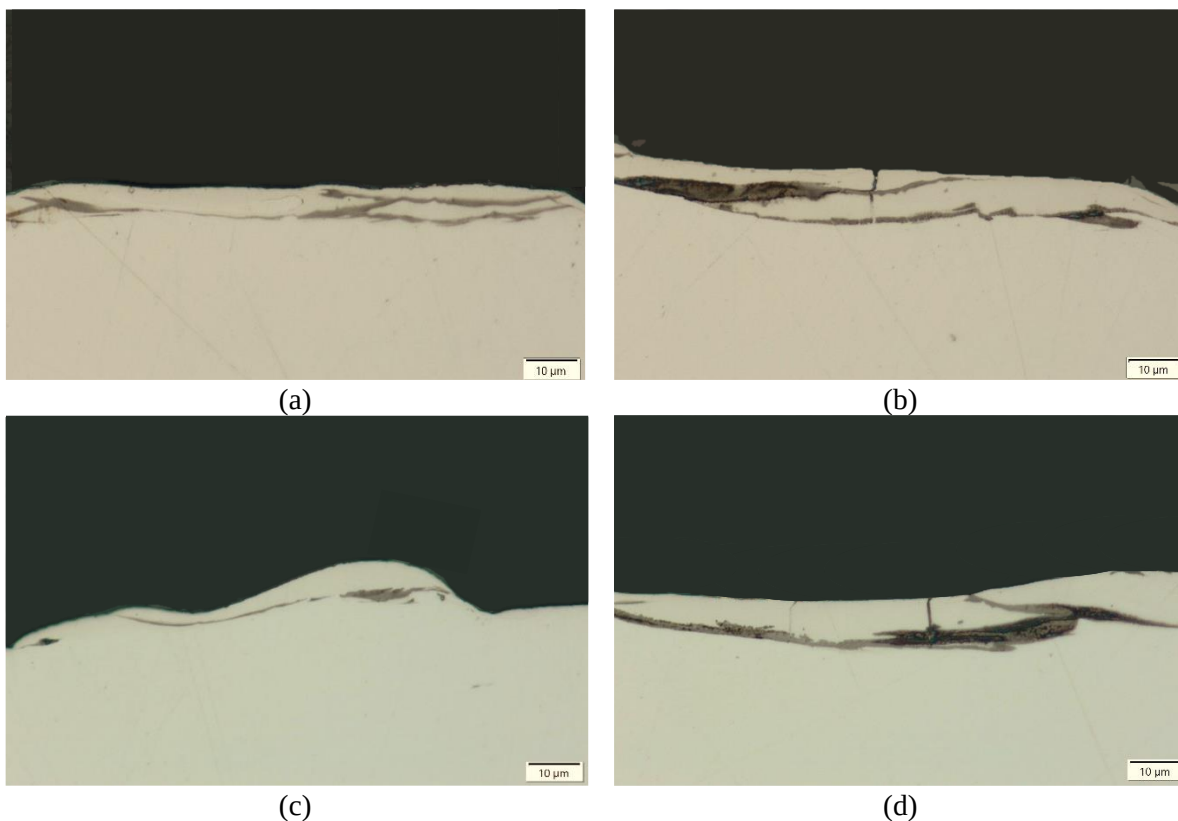


(a)

(b)

Rys. 9.4. Zgłady metalograficzne warstwy wierzchniej po obróbce elektrodą AF-5 z polaryzacją prostą wraz z odpowiadającymi im parametrami: $t_{on} = 30 \mu s$, $t_{off} = 37 \mu s$, a) $I_c = 1,7 A$, b) $I_c = 5 A$

Przy stałych wartościach natężenia prądu i czasu przerwy między impulsami ($I_c = 3,8 A$, $t_{off} = 37 \mu s$) wzrost czasu wyładowania elektrycznego od $t_{on} = 8$ do $55 \mu s$ powoduje istotny wzrost średniej grubości warstwy przetopionej (rys. 9.5). Dwukrotny wzrost grubości badanej warstwy jest związany z dłuższym oddziaływaniem kanału plazmowego, który indukuje intensywny dopływ ciepła do przedmiotu.



(a)

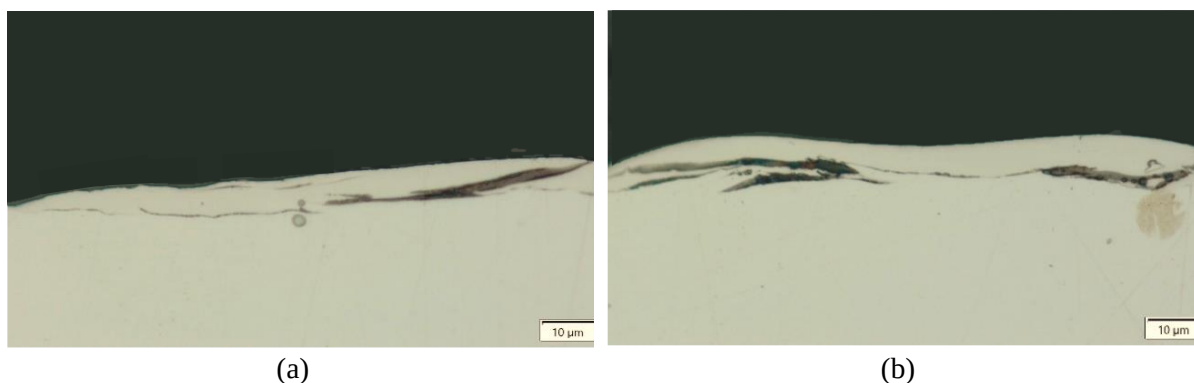
(b)

(c)

(d)

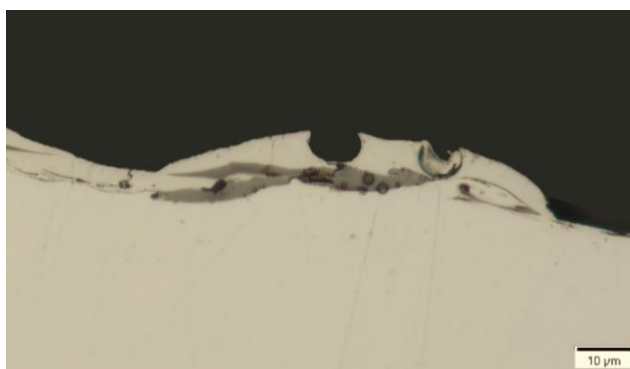
Rys. 9.5. Zgłady metalograficzne warstwy wierzchniej po obróbce z polaryzacją prostą wraz z odpowiadającymi im parametrami: $I_c = 3,8 A$, $t_{off} = 37 \mu s$, a) $t_{on} = 8 \mu s$ (S-180), b) $t_{on} = 55 \mu s$ (S-180), c) $t_{on} = 8 \mu s$ (AF-5), d) $t_{on} = 55 \mu s$ (AF-5)

Czas przerwy między impulsami nie wpływa w istotny sposób na średnią grubość warstwy przetopionej. Parametr ten nie odpowiada za wartość energii wyładowania elektrycznego oraz ilość ciepła dostarczonego do materiału. Wzrost czasu przerwy od $t_{off} = 6$ do $75 \mu s$, przy ustalonych parametrach natężenia prądu i czasu wyładowania elektrycznego ($I_c = 3,8 A$, $t_{on} = 30 \mu s$) nie wpłynęło w znaczący sposób na zmianę średniej grubości analizowanej warstwy dla obu badanych elektrod grafitowych (rys. 9.6).



Rys. 9.6. Zgłady metalograficzne warstwy wierzchniej po obróbce elektrodą S-180 z parametrami: $I_c = 3,8 A$, $t_{on} = 30 \mu s$, a) $t_{off} = 6 \mu s$, b) $t_{off} = 75 \mu s$

W trakcie procesu EDM wyładowania elektryczne prowadzą do miejscowego topnienia, odparowania i rekrytalizacji materiału, a także do transportu mas między katodą i anodą. Mechanizm zużycia elektrod grafitowych objawia się utratą ziaren, które przedostają się do szczeliny międzyelektrodowej. Na skutek wyładowań elektrycznych i zmian ciśnienia w szczelinie ziarna poruszają się chaotycznie z różnymi prędkościami. Przemieszczające się ziarna mogą uderzyć w jezioro roztopionego materiału w kraterze i w nim zakrzepnąć, o czym może świadczyć zarejestrowane zdjęcie warstwy przetopionej z wyraźnymi wgłębieniami podobnymi do kształtu i wielkości ziarna elektrody S-180 (rys. 9.7).



Rys. 9.7. Zgląd metalograficzny warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej elektrodą S-180 z parametrami: $I_c = 2,7 A$, $t_{on} = 41 \mu s$, $t_{off} = 51 \mu s$

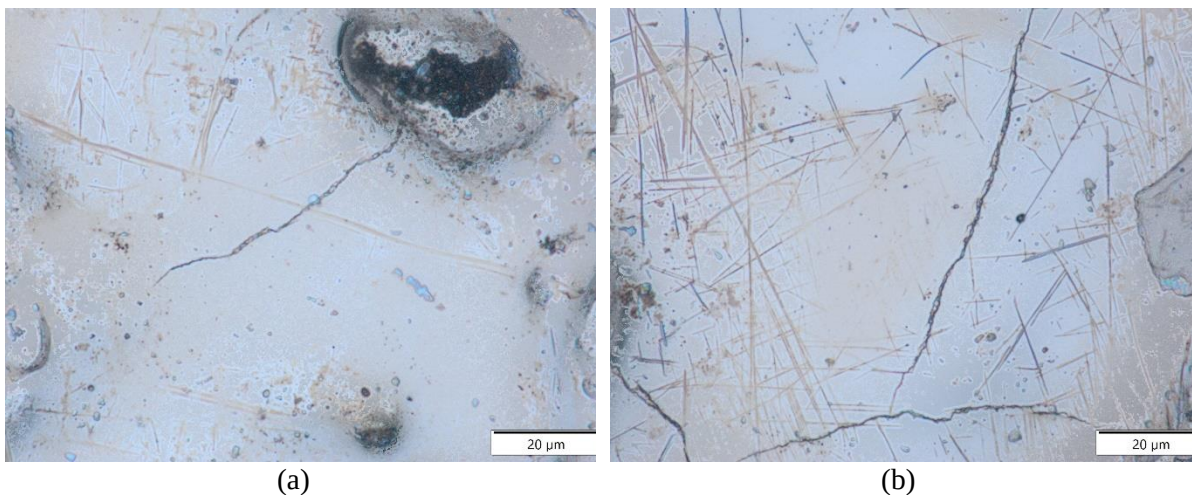
9.2. Badanie defektów mikrostrukturalnych

Na podstawie obserwacji zglądów metalograficznych stwierdzono występowanie defektów struktury w warstwie przetopionej w postaci mikropęknięć. Mikropęknięcia powstają w wyniku obecności naprężeń termicznych i rozciągających w warstwie wierzchniej przedmiotu. Naprężenia termiczne powstają wskutek oddziaływania bardzo wysokiej temperatury kanału plazmowego w trakcie wyładowania elektrycznego. Na powierzchni obrabianej tworzy się jezioro roztopionego materiału. Przepływający przez szczelinę dielektryk powoduje intensywne chłodzenie i rekrytalizację roztopionej warstwy metalu. Powstaje skurcz, któremu przeciwdziałal materiał rdzenia. Dyfuzja węgla z pirolizy dielektryka oraz z elektrody grafitowej sprawia, iż warstwa przetopiona ulega szybszemu kurczeniu niż materiał rodzimy. Gdy naprężenia przypowierzchniowe przekroczą granicę wytrzymałości materiału rdzenia na rozciąganie powstaną mikropęknięcia. Mikropęknięcia w warstwie wierzchniej materiału powodują pogorszenie właściwości mechanicznych przedmiotu, m.in. zmniejszenie odporności materiału na korozję oraz wytrzymałość zmęczeniową, zwłaszcza w przypadku pracy w warunkach obciążeń rozciągających i dynamicznych.

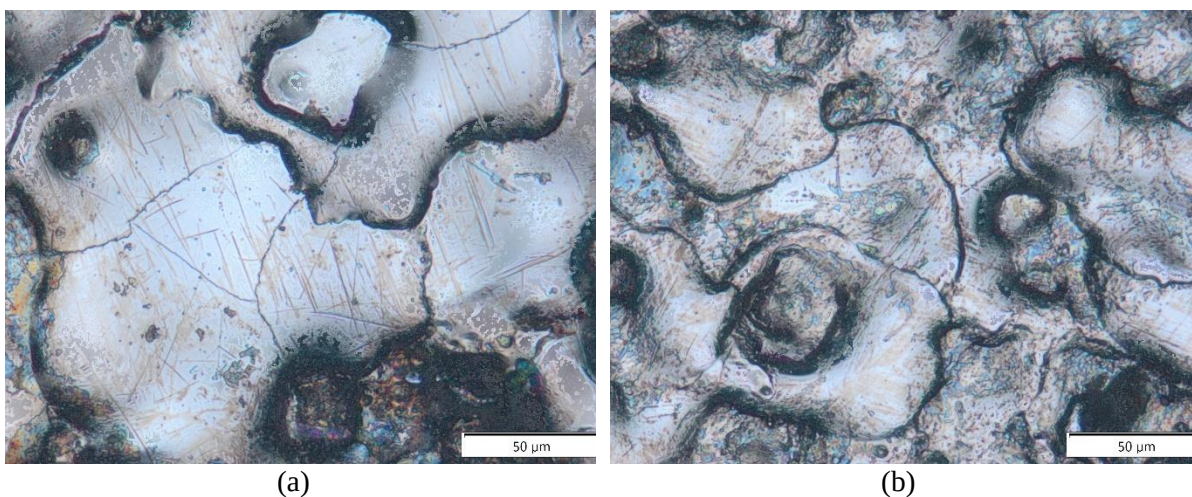
Na rysunkach 9.8 – 9.14 przedstawiono obrazy mikropęknięć w warstwie przetopionej. Gęstość pęknięć zależy od warunków obróbki oraz materiału elektrod. Większość mikropęknięć zorientowana jest prostopadle do powierzchni obrabianej. Ich głębokość penetracji zazwyczaj sięga do końca warstwy przetopionej. W nielicznych przypadkach zaobserwowano propagację mikropęknięć równoległe do powierzchni. Najczęściej skutkowało to oderwaniem cienkiej przetopionej warstwy od materiału rdzenia (rys. 9.13a).

Po obróbce elektroerozyjnej elektrodą grafitową S-180 w warstwie przetopionej stwierdzono nieznacznie większą gęstość mikropęknięć niż po obróbce elektrodą AF-5. Wynika to głównie z mniejszej oporności elektrycznej grafitu gruboziarnistego, który wprowadza większe naprężenia cieplne w warstwie wierzchniej w trakcie procesu elektroerozji.

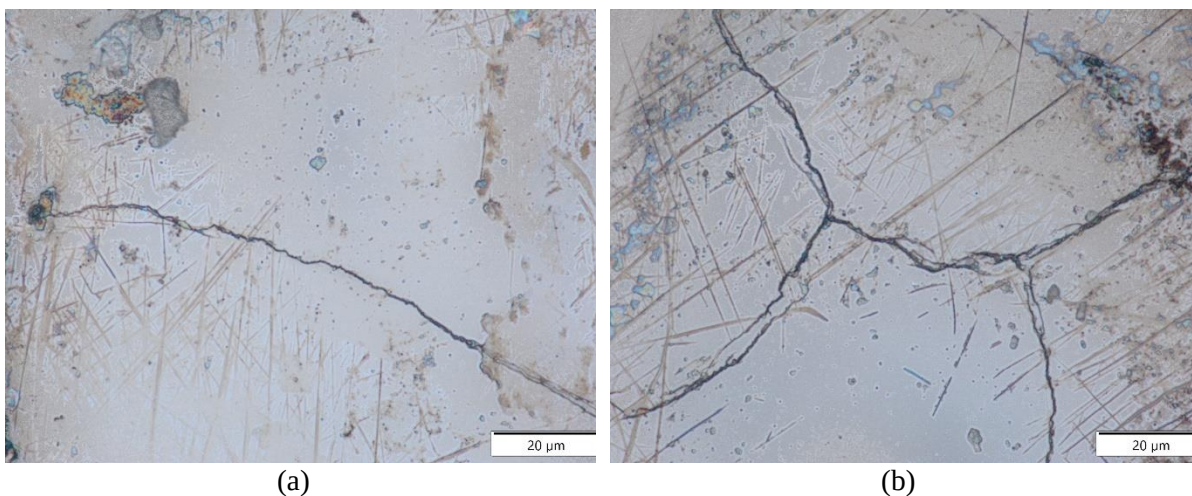
Na podstawie obserwacji defektów mikrostrukturalnych w warstwie przetopionej stwierdzono wysoką zależność pomiędzy energią wyładowań elektrycznych a grubością analizowanej warstwy i ilością mikropęknięć. Zwiększając natężenie prądu i czas wyładowania elektrycznego, a tym samym energię pojedynczego wyładowania, zaobserwowano większą grubość warstwy przetopionej oraz mniejszą gęstość mikropęknięć. Może to wynikać z koncentracji naprężeń rozciągających w warstwie przetopionej, które prowadzą do jej pęknięcia. Wraz ze zmniejszeniem czasu wyładowania oraz natężenia prądu powstaje cieńsza warstwa przetopiona, która jest bardziej podatna na pęknięcia.



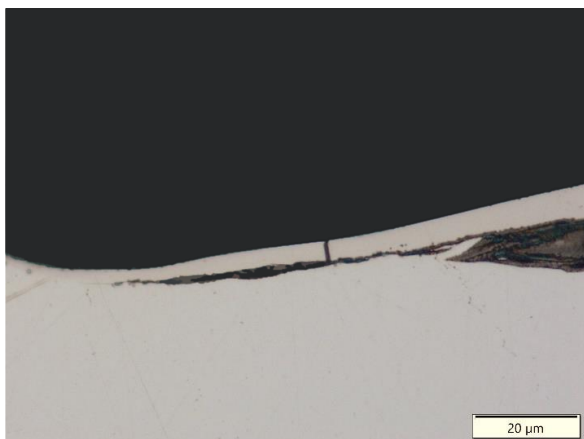
Rys. 9.8. Mikropęknięcia na powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą S-180 z parametrami:
a) $I_c = 4 \text{ A}$, $t_{on} = 17 \text{ µs}$, $t_{off} = 51 \text{ µs}$, b) $I_c = 4 \text{ A}$, $t_{on} = 41 \text{ µs}$, $t_{off} = 51 \text{ µs}$



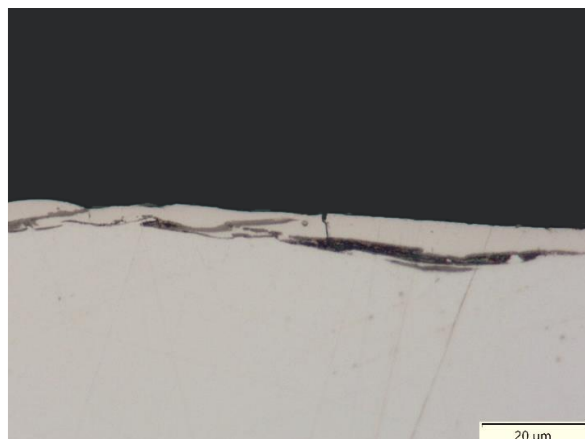
Rys. 9.9. Mikropęknięcia na powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą AF-5 z parametrami:
a) $I_c = 4 \text{ A}$, $t_{on} = 41 \text{ µs}$, $t_{off} = 51 \text{ µs}$, b) $I_c = 2,7 \text{ A}$, $t_{on} = 17 \text{ µs}$, $t_{off} = 19 \text{ µs}$



Rys. 9.10. Mikropęknięcia na powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą AF-5 z parametrami:
a) $I_c = 5 \text{ A}$, $t_{on} = 31 \text{ µs}$, $t_{off} = 37 \text{ µs}$, b) $I_c = 3,8 \text{ A}$, $t_{on} = 55 \text{ µs}$, $t_{off} = 37 \text{ µs}$

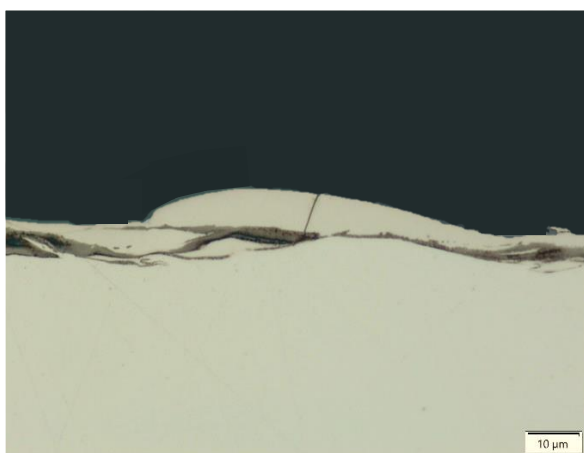


(a)

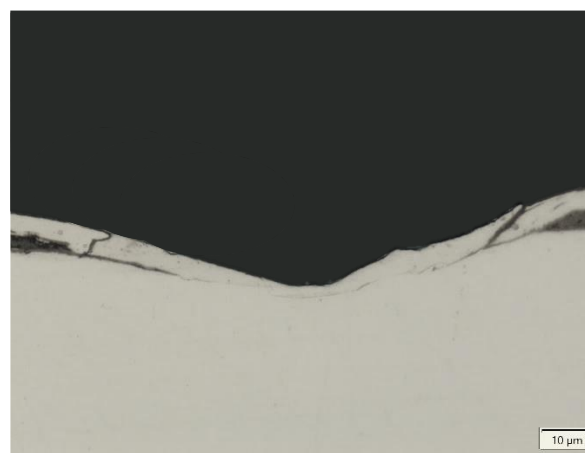


(b)

Rys. 9.11. Mikropęknięcia w warstwie przetopionej po obróbce elektroerozyjnej elektrodą S-180 z parametrami: a, b) $I_c = 3,8 \text{ A}$, $t_{on} = 55 \text{ μs}$, $t_{off} = 37 \text{ μs}$

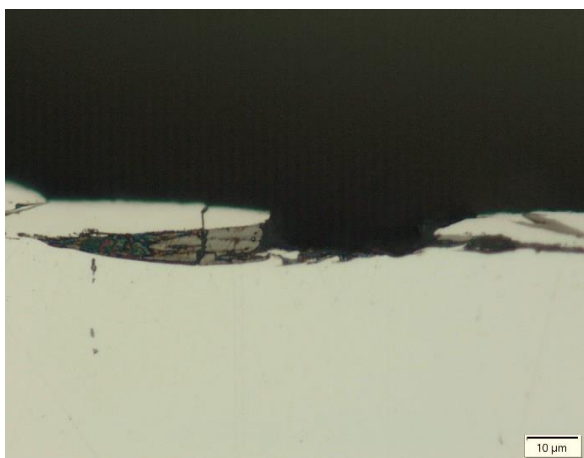


(a)



(b)

Rys. 9.12. Mikropęknięcia w warstwie przetopionej po obróbce elektroerozyjnej elektrodą AF-5 z parametrami: a) $I_c = 2,7 \text{ A}$, $t_{on} = 41 \text{ μs}$, $t_{off} = 19 \text{ μs}$, b) $I_c = 4 \text{ A}$, $t_{on} = 41 \text{ μs}$, $t_{off} = 19 \text{ μs}$

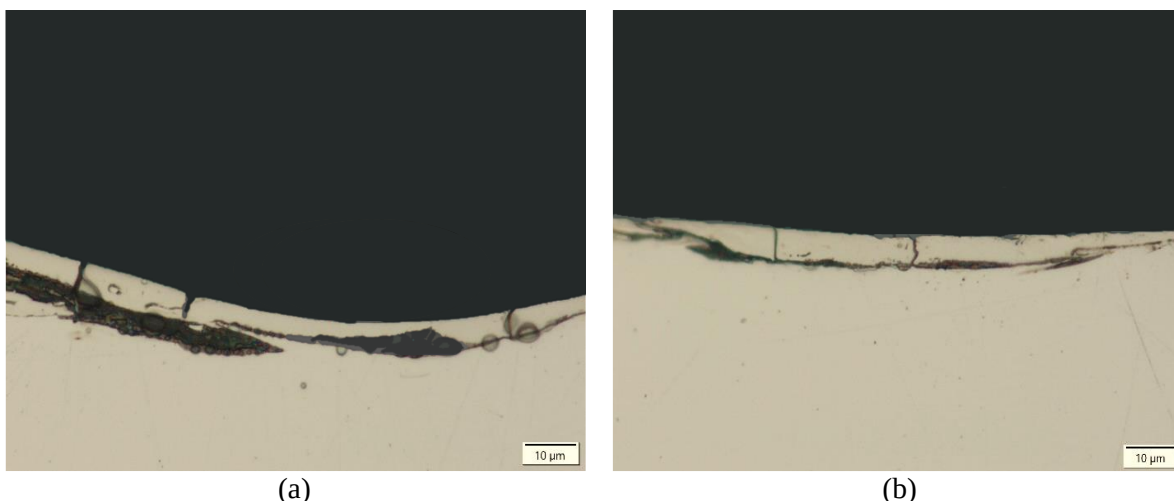


(a)



(b)

Rys. 9.13. Mikropęknięcia w warstwie przetopionej po obróbce elektroerozyjnej z parametrami: $t_{on} = 41 \text{ μs}$, $t_{off} = 51 \text{ μs}$, a) $I_c = 2,7 \text{ A}$, elektroda AF-5 b) $I_c = 4 \text{ A}$, elektroda S-180



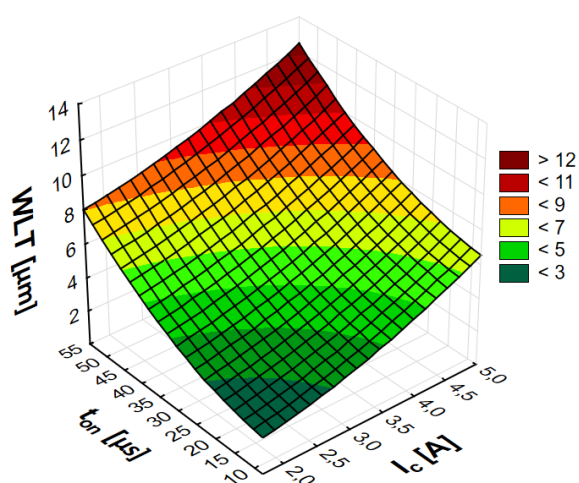
Rys. 9.14. Mikropęknięcia w warstwie przetopionej po obróbce elektroerozyjnej elektrodą S-180 z parametrami: a, b) $I_c = 4 \text{ A}$, $t_{on} = 41 \text{ }\mu\text{s}$, $t_{off} = 51 \text{ }\mu\text{s}$

9.3. Modele statystyczne kształtowania warstwy przetopionej po obróbce EDM z polaryzacją prostą

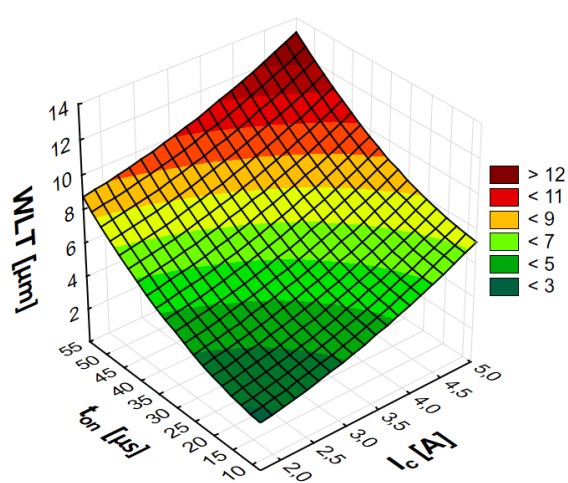
Na podstawie przeprowadzonych badań mikrostruktury i pomiarów średniej grubości warstwy przetopionej opracowano statystyczne modele matematyczne opisujące wpływ analizowanych parametrów obróbki na konstytuowanie się grubości badanej warstwy. Modelowanie grubości warstwy przetopionej pozwala na ocenę cech struktury metalograficznej w odniesieniu do własności eksploatacyjnych przedmiotów po obróbce elektroerozyjnej. Równania regresji w postaci wielomianu drugiego stopnia (tabela 9.2) zostały wyznaczone w programie STATISTICA 13.3 na podstawie uśrednionych wyników pomiarów grubości warstwy przetopionej (tabela 9.2). Ich graficzną interpretację przedstawiono na rys. 9.15. Równania uzyskały wysoki współczynnik korelacji R na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Adekwatność wyliczonego współczynnika korelacji wielorakiej została zweryfikowana testem F-Snedecora ($F/F_{kr} > 1$). Istotność poszczególnych współczynników równania regresji była badana testem t-Studenta na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Na podstawie analizy reszt stwierdzono, iż wyznaczone modele charakteryzują się wysoką wiarygodnością, co świadczy o znaczącym wpływie badanych parametrów elektrycznych i właściwości fizycznych elektrod na średnią grubość warstwy przetopionej (rys. 9.16).

Tabela 9.2. Równania regresji opisujące grubość warstwy przetopionej WLT dla polaryzacji prostej

Polaryzacja prosta (+)			
Material elektrody	Równanie regresji	R	F/F_{kr}
AF-5	$WLT = 1,4 + 0,2 \cdot I_c^2 + 0,002 \cdot t_{on}^2$	0,94	2,4
S-180	$WLT = 2,1 + 0,2 \cdot I_c^2 + 0,002 \cdot t_{on}^2$	0,94	2,5

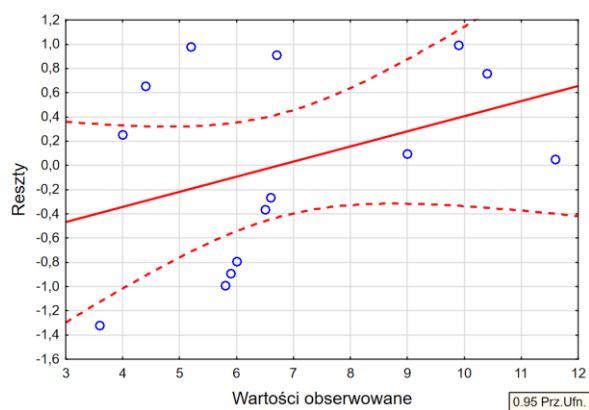


(a)

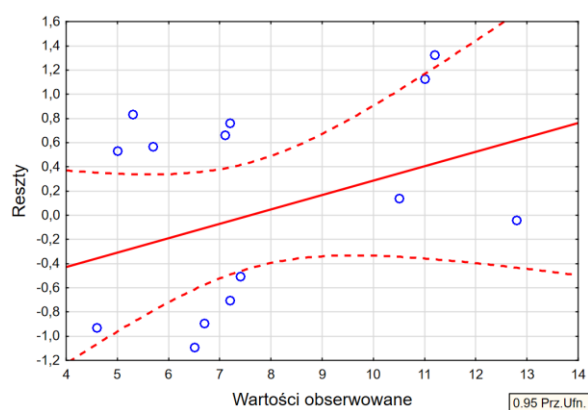


(b)

Rys. 9.15. Zależność grubości warstwy przetopionej WLT od natężenia prądu I_c , czasu wyładowania t_{on} dla polaryzacji prostej, materiał elektrody: a) AF-5, b) S-180



(a)



(b)

Rys. 9.16. Wykres reszt w funkcji wartości obserwowanych dla równania WLT i elektrody: a) AF-5, b) S-180

Na podstawie wyznaczonych równań regresji wnioskuje się, iż średnia grubość warstwy przetopionej zależy w głównej mierze od natężenia prądu I_c oraz czasu wyładowania elektrycznego t_{on} , a tym samym od ilości energii cieplnej dostarczonej do materiału obrabianego. Wzrost natężenia prądu powoduje zwiększenie liczby oraz prędkości elektronów oraz dodatnio naładowanych jonów w kanale plazmowym, co przyspiesza tempo topnienia i parowania materiału obrabianego. Przy stałych wartościach czasu wyładowania wzrost natężenia prądu powoduje erozję większej objętości materiału, co przekłada się bezpośrednio na wzrost średniej grubości warstwy przetopionej. Jednoczesny wzrost natężenia prądu i czasu wyładowania powoduje zwiększenie ilości topionego materiału, w konsekwencji również większa objętość materiału, która nie została usunięta ze sferycznego krateru przez dielektryk, ulega rekryształizacji na powierzchni rdzenia materiału rodzimego.

Opracowane modele statystyczne konstytuowania się grubości warstwy przetopionej w funkcji parametrów elektrycznych mogą posłużyć w doborze odpowiedniego gatunku elektrody grafitowej oraz warunków obróbki w celu zapewnienia pożądanego stanu WW. Kontrola procesu obróbki elektroerozyjnej poprzez dobór odpowiednich parametrów technologicznych umożliwi zminimalizowanie lub całkowite wyeliminowanie dodatkowych operacji wykończeniowych powierzchni (szlifowania bądź zgniotu powierzchniowego), które są często wykorzystywane do usunięcia defektów mikrostrukturalnych po obróbce elektroerozyjnej.

10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszej pracy dokonano analizy wpływu właściwości fizycznych i wielkości ziarna elektrod grafitowych o wysokiej izotropowości na wskaźniki technologiczne i stan warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej stopu Hastelloy C-22. Dokonano szczegółowej oceny wpływu parametrów elektrycznych obróbki, w zależności od zastosowanej wielkości ziarna elektrod grafitowych, na cechy struktury geometrycznej powierzchni przedmiotu oraz względne zużycie elektrody roboczej i wydajność procesu. Realizacja powyższego zadania wymagała wykorzystania toru pomiarowego, który wyznaczał rzeczywiste zmiany w charakterze przebiegu wyładowania elektrycznego w trakcie obróbki elektroerozyjnej. Określono wpływ parametrów technologicznych procesu na właściwości tribologiczne oraz strukturę metalograficzną warstwy wierzchniej. Przeprowadzono analizę składu chemicznego powierzchni przedmiotu i elektrod po obróbce elektroerozyjnej w celu kompleksowego poznania mechanizmu zużycia elektrod grafitowych. Na podstawie otrzymanych wyników badań doświadczalnych opracowano statyczne modele matematyczne, które opisują wpływ analizowanych elektrod grafitowych oraz parametrów elektrycznych obróbki EDM na wskaźniki technologiczne oraz wynikowy stan warstwy wierzchniej.

10.1. Wnioski o charakterze użytkowym i poznawczym

Z przeprowadzonej w pracy analizy teoretycznej oraz badań doświadczalnych sformułowano następujące wnioski:

1. Wykazano, iż wielkość ziarna elektrod grafitowych oraz charakter impulsów elektrycznych wpływa na wskaźniki technologiczne procesu elektroerozji oraz stan struktury geometrycznej i metalograficznej warstwy wierzchniej.
2. Stwierdzono, iż właściwości fizyczne elektrod grafitowych (tj. przewodność elektryczna, gęstość pozorna oraz porowatość) mają równie istotny wpływ na proces elektroerozji, jak wielkość ziarna i parametry elektryczne procesu EDM.
3. Jednym z podstawowych czynników determinujących wydajność obróbki elektroerozyjnej z wykorzystaniem elektrod grafitowych jest stopień zanieczyszczenia szczeliny międzyelektrodowej przez oderwane ziarna grafitu oraz ich wpływ na charakter i stabilność wyładowań elektrycznych. Czynnikiem ten jest również wysoko skorelowany z gęstością

pozorną grafitu, która wpływa na wskaźnik zużycia narzędzia. Równie istotnym parametrem, który uzupełnia wielkość ziarna grafitu jest jego przewodność elektryczna. Powiązanie przewodności elektrycznej grafitu z wielkością ziarna oraz stopnia jego zużycia i zalegania w szczelinie oddziałuje na przebieg i czas erozji materiału.

4. Wydajność objętościowa drążenia w głównej mierze uzależniona jest od natężenia prądu oraz w mniejszym stopniu od czasu wyładowania elektrycznego i czasu przerwy między impulsami. Wzrost natężenia prądu i czasu wyładowania powoduje zwiększenie średnicy oraz mocy kanału plazmowego, co prowadzi do usunięcia większej objętości materiału. Czas przerwy między impulsami wpływa na stabilność obróbki. Zbyt krótki czas przerwy, w stosunku do czasu wyładowania elektrycznego, może utrudnić odprowadzanie produktów erozji i ziaren grafitu ze szczeliny, co prowadzi do obniżenia oporności dielektryka i impulsów zwarciovych.
5. Względne zużycie elektrody roboczej przy polaryzacji prostej determinuje głównie czas wyładowania elektrycznego oraz natężenie prądu. Wydłużenie czasu wyładowania sprzyja dyfuzji węgla z rozkładu dielektryka oraz cząsteczek katody na powierzchnię elektrody, tworząc tym samym warstwę ochronną zapobiegającą zużyciu erozyjnemu narzędzia. Głównym czynnikiem determinującym wartość zużycia ER przy polaryzacji odwróconej jest natężenie prądu oraz w mniejszym stopniu czas przerwy między impulsami.
6. W badanym zakresie zmienności parametrów elektrycznych grafit S-180 charakteryzował się większym stopniem zużycia niż grafit AF-5, zarówno przy polaryzacji ujemnej, jak i dodatniej. Wynika to głównie z mniejszej rezystywności oraz gęstości pozornej grafitu S-180, a także udziałem większych porów w materiale.
7. Wartość względnego zużycia elektrody grafitowej i wydajność usuwania materiału osiągają największe wartości z wykorzystaniem biegunowości odwróconej.
8. Wyniki badań doświadczalnych wykazały, iż w trakcie obróbki z biegunowością prostą elektroda grafitowa o wielkości ziarna 10 μm zapewniła większą wydajność usuwania materiału niż elektroda grafitowa o rozmiarze ziarna 1 μm , w badanym zakresie zmienności parametrów elektrycznych. W przypadku biegunowości ujemnej uzyskano odwrotną zależność.
9. Złożony charakter zużycia elektrod grafitowych, w postaci odrywania się ziaren grafitu w trakcie obróbki, powoduje chwilowe zmiany w przebiegu prądowo-napięciowym wyładowania elektrycznego, co prowadzić może do dyspersji wyładowania lub impulsów zwarciovych uszkadzających powierzchnię.

10. Struktura geometryczna powierzchni po obróbce EDM charakteryzuje się wysoką izotropowością i jest uzależniona w głównej mierze od energii pojedynczego wyładowania elektrycznego.
11. Przy niskich wartościach natężania prądu i krótkim czasie wyładowania elektrycznego tekstura powierzchni charakteryzuje się dużym zagęszczeniem wierzchołków nierówności. Wydłużenie czasu wyładowania, przy wysokiej wartości natężenia prądu, powoduje zwiększenie średnicy kanału plazmowego i zmniejszenie gęstości energii cieplnej, co prowadzi do generowania chropowatości o większej amplitudzie i odległości pomiędzy sąsiednimi wierzchołkami nierówności.
12. Wykazano, iż elektroda grafitowa o mniejszym ziarnie i udziale procentowym porów zapewnia lepsze wykończenie i niższą chropowatość powierzchni obrabianej niż grafit o większym ziarnie i dużym udziale porów o większej średnicy.
13. Wielkość ziarna elektrod grafitowych przy obróbce z polaryzacją odwróconą nie wpływa w tak znaczącym stopniu na stan SGP, jak parametry elektryczne.
14. Powierzchnia po obróbce elektroerozyjnej elektrodą AF-5 z niską energią wyładowań elektrycznych posiada lepszą odporność na ścieranie. Przy polaryzacji odwróconej uformowana topografia powierzchni przez elektrodę S-180 zapewnia lepsze właściwości smarne.
15. Potwierdzono, na podstawie analizy składu chemicznego powierzchni przedmiotu i elektrod, dyfuzję cząsteczek katody i anody w kanale plazmowym w trakcie wyładowania elektrycznego.
16. Stwierdzono, iż na grubość warstwy przetopionej dominujący wpływ ma przewodność elektryczna elektrod grafitowych, zaś wielkość ziarna wpływa na ciągłość warstwy.
17. Obróbka elektroerozyjna z biegunowością odwróconą zalecana jest przy obróbce zgrubnej z dużą wydajnością usuwania materiału. Przy obróbce wykończeniowej rekomendowana jest biegunowość dodatnia oraz elektroda grafitowa o mniejszym ziarnie, w celu uzyskania niskiej chropowatości powierzchni.
18. Opracowane równania regresji mogą zostać zaimplementowane w projektowaniu technologii obróbki EDM jako wytyczne doboru odpowiednich parametrów obróbki, które umożliwią osiągnięcie pożądaných wskaźników technologicznych oraz jakości wykończenia powierzchni.

10.2. Wnioski dotyczące dalszych badań

1. Celowym jest podjęcie badań eksperymentalnych wpływu ciśnienia podawania dielektryka do szczeliny międzyelektrodowej na efektywność usuwania ziaren grafitu i produktów erozji, a także na stabilność wyładowań elektrycznych.
2. Analizę efektywności usuwania ziaren grafitu i produktów obróbki ze szczeliny należy rozszerzyć m.in. o badania wpływu drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej na stabilność obróbki lub oddziaływania pola magnetycznego w szczelinie międzyelektrodowej.
3. Należy przeprowadzić badania wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych o wysokiej izotropowości na wskaźniki technologiczne w warunkach drążenia w głębokiego elektrodami cienkościennymi.
4. Wskazany jest opracowanie zaawansowanych modeli numerycznych rozkładu temperatury na elektrodach, które mogą pomóc w eksperymentalnym zdefiniowaniu dokładnych wartości czasu wyładowania elektrycznego oraz czasu przerwy między impulsami, przy których można uzyskać praktycznie zerowe zużycie elektrody grafitowej.

LITERATURA

- (1) Ho, K. H.; Newman, S. T. State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **2003**, 43 (13), 1287–1300. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00162-7).
- (2) Gostimirovic, M.; Kovac, P.; Sekulic, M.; Skoric, B. Influence of Discharge Energy on Machining Characteristics in EDM. *Journal of Mechanical Science and Technology* **2012**, 26 (1), 173–179. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0922-x>.
- (3) Skoczypiec, S.; Machno, M.; Bizon, W. The Capabilities of Electrodischarge Microdrilling of High Aspect Ratio Holes in Ceramic Materials. *Management and Production Engineering Review* **2015**, 6 (3), 61–69. <https://doi.org/10.1515/mper-2015-0027>.
- (4) Sawicki, J.; Paczkowski, T. Electrochemical Machining of Curvilinear Surfaces of Revolution: Analysis, Modelling, and Process Control. *Materials* **2022**, 15 (21), 7751. <https://doi.org/10.3390/ma15217751>.
- (5) Kunieda, M.; Lauwers, B.; Rajurkar, K. P.; Schumacher, B. M. Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **2005**, 54 (2), 64–87. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60020-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60020-1).
- (6) Huang, C. A.; Hsu, F. Y.; Yao, S. J. Microstructure Analysis of the Martensitic Stainless Steel Surface Fine-Cut by the Wire Electrode Discharge Machining (WEDM). *Materials Science and Engineering: A* **2004**, 371 (1), 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.277>.
- (7) Ruszaj, A. Investigations of the Electrodischarge Machining Process for Various Electrode Kinematics. *Precision Engineering* **1992**, 14 (2), 77–83. [https://doi.org/10.1016/0141-6359\(92\)90052-X](https://doi.org/10.1016/0141-6359(92)90052-X).
- (8) Skoczypiec, S.; Ruszaj, A. A Sequential Electrochemical–Electrodischarge Process for Micropart Manufacturing. *Precision Engineering* **2014**, 38 (3), 680–690. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.03.007>.
- (9) Wire EDM. <https://www.manufacturingguide.com/en/wire-edm> (accessed 2022-04-26).
- (10) Świercz, R.; Oniszczyk-Świercz, D.; Nowicki, R. Wire Electrical Discharge Machining Nickel Super Alloy. *Mechanik* **2018**, 91 (3), 220–222. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.3.36>.

- (11) Aghdeab, S.; Hasan, M.; Makhrib, G. Design Engineering Effect of Gap Space on Surface Roughness (Ra) in the Electrical Discharge Machining (EDM) for Tool Steel AISI M6. *Design Engineering (Toronto)* **2021**, ISSN: 0011-9342, 11358–11366.
- (12) Alam, M. N.; Siddiquee, A. N.; Khan, Z. A.; Khan, N. Z. A Comprehensive Review on Wire EDM Performance Evaluation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* **2022**, 236 (4), 1724–1746. <https://doi.org/10.1177/09544089221074843>.
- (13) Singh, H.; Kumar, H. Review on Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) of Aluminum Matrix Composites. *International Journal of Mechanical And Production Engineering* **2015**, 3 (10), 94–101.
- (14) Czelusniak, T.; Higa, C. F.; Torres, R. D.; Laurindo, C. A. H.; de Paiva Júnior, J. M. F.; Lohrengel, A.; Amorim, F. L. Materials Used for Sinking EDM Electrodes: A Review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* **2018**, 41 (1), 14. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1520-y>.
- (15) Hui, R. K.; Malla, C. A Review Based Paper on Investigation of Process Parameters and Optimization in EDM. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology* **2017**, 640–647. <https://doi.org/10.5281/zenodo.322498>.
- (16) Jain, S.; Parashar, V. Critical Review on the Impact of EDM Process on Biomedical Materials. *Materials and Manufacturing Processes* **2021**, 36 (15), 1701–1724. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1942907>.
- (17) Burek, J.; Babiarz, R.; Buk, J.; Sułkiewicz, 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>.
- (18) Pandey, A. K.; Anas, M. Sustainability and Recent Trends in Micro- Electric Discharge Machining (μ -EDM): A State-of-the-Art Review. *Materials Today: Proceedings* **2022**, 57, 2049–2055. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.250>.
- (19) Oniszczyk-Świercz, D.; Świercz, R.; Nowicki, R.; Kopytowski, A.; Dąbrowski, L. Investigation of the Influence of Process Parameters of Wire Electrical Discharge Machining Using Coated Brass on the Surface Roughness of Inconel 718. *AIP Conference Proceedings* **2018**, 2017, 020020. <https://doi.org/10.1063/1.5056283>.
- (20) Kumar, D.; Singh, N. K.; Bajpai, V. Recent Trends, Opportunities and Other Aspects of Micro-EDM for Advanced Manufacturing: A Comprehensive Review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* **2020**, 42 (5), 222. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02296-4>.

- (21) Świercz, R.; Oniszczyk-Świercz, D. Investigation of the Influence of Reduced Graphene Oxide Flakes in the Dielectric on Surface Characteristics and Material Removal Rate in EDM. *Materials* **2019**, *12* (6), 943.
<https://doi.org/10.3390/ma12060943>.
- (22) Muthuramalingam, T.; Mohan, B. A Review on Influence of Electrical Process Parameters in EDM Process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* **2015**, *15* (1), 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.02.009>.
- (23) Singh, N. K.; Pandey, P. M.; Singh, K. K.; Sharma, M. K. Steps towards Green Manufacturing through EDM Process: A Review. *Cogent Engineering* **2016**, *3* (1), 1272662. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1272662>.
- (24) Świercz, R.; Oniszczyk-Świercz, D.; Marczak, M. Surface texture of HTCS 150 steel after EDM. *Mechanik* **2015**, No. 4, 327/80-327/84.
<https://doi.org/10.17814/mechanik.2015.4.176>.
- (25) Świercz, R.; Oniszczyk-Świercz, D. Influence of EDM parameters on the functional properties of the steel with a high thermal conductivity. *Mechanik* **2015**, No. 1, 54/29-54/34. <https://doi.org/10.17814/mechanik.y2015.iss1.art15>.
- (26) Nowicki, R.; Świercz, R.; Oniszczyk-Świercz, D.; Dąbrowski, L.; Kopytowski, A. Influence of Machining Parameters on Surface Texture and Material Removal Rate of Inconel 718 after Electrical Discharge Machining Assisted with Ultrasonic Vibration. *AIP Conference Proceedings* **2018**, *2017* (1), 020019.
<https://doi.org/10.1063/1.5056282>.
- (27) Kumar, S. S.; Varol, T.; Canakci, A.; Kumaran, S. T.; Uthayakumar, M. A Review on the Performance of the Materials by Surface Modification through EDM. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* **2021**, *4* (1), 127–144.
<https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.08.002>.
- (28) Escobar, A. M.; de Lange, D. F.; Medellín Castillo, H. I. Simplified Plasma Channel Formation Model for the Electrical Discharge Machining Process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2020**, *106* (1), 143–153.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04593-2>.
- (29) Nowicki, R.; Świercz, R.; Kopytowski, A.; Vagaská, A. Surface Texture of Inconel 718 after Electrical Discharge Machining Assisted with Ultrasonic Vibration of a Tool Electrode. *Welding Technology Review* **2019**, *R. 91*, nr 2.
<https://doi.org/10.26628/wtr.v91i2.1021>.

- (30) Spadło, S.; Dudek, D. Investigation on the accuracy of holes machined by EDM process. *Mechanik* **2015**, No. 12, 978/23-978/28.
<https://doi.org/10.17814/mechanik.2015.12.532>.
- (31) Kopytowski, A.; Oniszczyk-Świercz, D.; Świercz, R.; Nowicki, R.; Chmielewski, T.; Sałaciński, T. Micro Wire Electrical Discharge Machining of Titanium Alloy Ti-6Al-4V; 2019; pp 1560–1565. <https://doi.org/10.37904/metal.2019.968>.
- (32) Khoshaim, A. B.; Muthuramalingam, T.; Moustafa, E. B.; Elsheikh, A. Influences of Tool Electrodes on Machinability of Titanium α - β Alloy with ISO Energy Pulse Generator in EDM Process. *Alexandria Engineering Journal* **2023**, 63, 465–474.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.07.059>.
- (33) Descoeudres, A.; Hollenstein, C.; Wälder, G.; Perez, R. Time-Resolved Imaging and Spatially-Resolved Spectroscopy of Electrical Discharge Machining Plasma. *Journal of Physics D: Applied Physics* **2005**, 38 (22), 4066–4073.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/22/009>.
- (34) Raizer, Y. P. *Gas Discharge Physics*, Springer Berlin, Heidelberg.; Original Russian edition published by Nauka: Moscow, 1991.
- (35) Devins, J. C.; Rzađ, S. J.; Schwabe, R. J. Breakdown and Prebreakdown Phenomena in Liquids. *Journal of Applied Physics* **1981**, 52 (7), 4531–4545.
<https://doi.org/10.1063/1.329327>.
- (36) Descoeudres, A. Characterization of Electrical Discharge Machining Plasmas. Doctoral thesis, EPFL, Lausanne, 2006. <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-3542>.
- (37) Schumacher, B. M.; Krampitz, R.; Kruth, J.-P. Historical Phases of EDM Development Driven by the Dual Influence of “Market Pull” and “Science Push.” *Procedia CIRP* **2013**, 6, 5–12. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.001>.
- (38) Jameson, E. C. *Electrical Discharge Machining*; Society of Manufacturing Engineers: Dearborn, Mich, 2001.
- (39) McGeough, J. A.; Rasmussen, H. A Macroscopic Model of Electro-Discharge Machining. *International Journal of Machine Tool Design and Research* **1982**, 22 (4), 333–339. [https://doi.org/10.1016/0020-7357\(82\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0020-7357(82)90010-5).
- (40) Frayssines, P. E.; Bonifaci, N.; Denat, A.; Lesaint, O. Streamers in Liquid Nitrogen: Characterization and Spectroscopic Determination of Gaseous Filament Temperature and Electron Density. *Journal of Physics D: Applied Physics* **2002**, 35 (4), 369–377.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/35/4/313>.

- (41) Miernikiewicz, A. *Doświadczalno-Teoretyczne Podstawy Obróbki Elektroerozyjnej (EDM)*; Politechnika Krakowska, 2000.
- (42) Albiński, K.; Miernikiewicz, A.; Ruszaj, A.; Zimny, J. *Laboratorium Obróbki Erozyjnej*, 1980.
- (43) Rich, J. A. Resistance Heating in the Arc Cathode Spot Zone. *Journal of Applied Physics* **1961**, 32 (6), 1023–1031. <https://doi.org/10.1063/1.1736153>.
- (44) McGeough, J. A.; Rasmussen, H. A Theoretical Model of Electrodischarge Texturing. *Journal of Materials Processing Technology* **1997**, 68 (2), 172–178. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00024-6).
- (45) DiBitonto, D. D.; Eubank, P. T.; Patel, M. R.; Barrufet, M. A. Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining Process. I. A Simple Cathode Erosion Model. *Journal of Applied Physics* **1989**, 66 (9), 4095–4103. <https://doi.org/10.1063/1.343994>.
- (46) Maradia, U.; Wegener, K. EDM Modelling and Simulation. *Technologies and Applications* **2015**, 67–121.
- (47) Shen, Y.; Liu, Y.; Zhang, Y.; Tan, B.; Ji, R.; Cai, B.; Zheng, C. Determining the Energy Distribution during Electric Discharge Machining of Ti–6Al–4V. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2014**, 70 (1), 11–17. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5194-4>.
- (48) Xia, H.; Kunieda, M.; Nishiwaki, N. Removal Amount Difference between Anode and Cathode in EDM Process. *International Journal of Electrical Machining* **1996**, 1, 45–52. <https://doi.org/10.2526/ijem.1.45>.
- (49) Kojima, A.; Natsu, W.; Kunieda, M. Spectroscopic Measurement of Arc Plasma Diameter in EDM. *CIRP Annals* **2008**, 57 (1), 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.097>.
- (50) Tamura, T.; Kobayashi, Y. Measurement of Impulsive Forces and Crater Formation in Impulse Discharge. *Journal of Materials Processing Technology* **2004**, 149 (1), 212–216. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.063>.
- (51) Świercz, R.; Holubek, R. Experimental Investigation of Influence Electrical Discharge Energy on the Surface Layer Properties after EDM. *Welding Technology Review* **2020**, R. 92, nr 5. <https://doi.org/10.26628/wtr.v92i5.1115>.
- (52) Zhang, S.; Zhang, W.; Chang, H.; Liu, Y.; Ma, F.; Yang, D.; Sha, Z. Study of the Thermal Erosion, Ejection and Solidification Processes of Electrode Materials during EDM. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* **2019**, 13 (1), 1153–1164. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1676313>.

- (53) Zolotych, B. N. The Mechanism of Electrical Erosion of Metals in Liquid Dielectric Media. *Soviet physics. Technical physics* **1959**, 4 (12), 1370–1373.
- (54) Zolotych, B. N. Osnovnyje Voprosy Kaciestviennoj Teorii Elektroiskrovoj Obrabotki v Zidkoj Dielektriceskoj Srede. *Problemy Električeskoj Obrabotki Metallov*. **1962**, 5–43.
- (55) Dijck, F. V. Physico-Mathematical Analysis of the Electro Discharge Machining Process., Katholieke Universiteit te Leuve, Leuven, 1973.
<https://cir.nii.ac.jp/crid/1570572699137356288> (accessed 2022-04-26).
- (56) Xia, H. Study of Factors Affecting Electrode Wear Ratio and Improvement of Machining Characteristics in EDM Process. Doctoral thesis, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo, 1995.
<https://cir.nii.ac.jp/crid/1572824499348955136> (accessed 2022-04-26).
- (57) Natsu, W.; Kunieda, M.; Nishiwaki, N. Study on Influence of Inter-Electrode Atmosphere on Carbon Adhesion and Removal Amount. *International journal of electrical machining* **2004**, 9, 43–50.
- (58) Motoki, M.; Lee, C.; Tan, P. C. Research on Electrode Erosion Caused by Transient Arc Discharge in Dielectric Liquid. *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers* **1968**, 2 (3), 48–56. <https://doi.org/10.2526/jseme.2.48>.
- (59) Maradia, U.; Boccadoro, M.; Stirnimann, J.; Kuster, F.; Wegener, K. Electrode Wear Protection Mechanism in Meso–Micro-EDM. *Journal of Materials Processing Technology* **2015**, 223, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.039>.
- (60) Vetter, J. 60years of DLC Coatings: Historical Highlights and Technical Review of Cathodic Arc Processes to Synthesize Various DLC Types, and Their Evolution for Industrial Applications. *Surface and Coatings Technology* **2014**, 257, 213–240.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.017>.
- (61) Ming, W.; Xie, Z.; Cao, C.; Liu, M.; Zhang, F.; Yang, Y.; Zhang, S.; Sun, P.; Guo, X. Research on EDM Performance of Renewable Dielectrics under Different Electrodes for Machining SKD11. *Crystals* **2022**, 12 (2), 291.
<https://doi.org/10.3390/cryst12020291>.
- (62) Żyra, A.; Bogucki, R.; Skoczypiec, S. Austenitic steel surface integrity after EDM in different dielectric liquids. *Czasopismo Techniczne* **2017**, 2017 (Volume 12), 231–242.
<https://doi.org/10.4467/2353737XCT.17.222.7765>.

- (63) Żyra, A.; Skoczypiec, S. The effect of dielectric liquid type on the structural and morphological characteristics of austenitic steel after electric discharge machining. *Mechanik* **2016**, No. 1, 26–28. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2016.1.2>.
- (64) Pragadish, N.; Kaliappan, S.; Subramanian, M.; Natrayan, L.; Satish Prakash, K.; Subbiah, R.; Kumar, T. Ch. A. Optimization of Cardanol Oil Dielectric-Activated EDM Process Parameters in Machining of Silicon Steel. *Biomass Conversion and Biorefinery* **2022**, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02268-1>.
- (65) Kumar, S.; Singh, R.; Singh, T. P.; Sethi, B. L. Surface Modification by Electrical Discharge Machining: A Review. *Journal of Materials Processing Technology* **2009**, 209 (8), 3675–3687. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.032>.
- (66) Zhang, Y.; Liu, Y.; Shen, Y.; Ji, R.; Li, Z.; Zheng, C. Investigation on the Influence of the Dielectrics on the Material Removal Characteristics of EDM. *Journal of Materials Processing Technology* **2014**, 214 (5), 1052–1061. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.12.012>.
- (67) Kiran, P.; Mohanty, S.; Das, A. K. Surface Modification through Sustainable Micro-EDM Process Using Powder Mixed Bio-Dielectrics. *Materials and Manufacturing Processes* **2022**, 37 (6), 640–651. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1967976>.
- (68) Żyra, A.; Skoczypiec, S. Primary Research on Influence of Workpiece Cooling on Efficiency of Inconel's 625 Alloy Electrodischarge Milling in Carbon Dioxide. *Journal of Physics: Conference Series* **2022**, 2235 (1), 012040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2235/1/012040>.
- (69) Żyra, A.; Skoczypiec, S.; Bogucki, R. Selected Aspects of Surface Integrity of Inconel 625 Alloy after Dry-EDM in Carbon Dioxide. *Key Engineering Materials* **2022**, 926, 1681–1688. <https://doi.org/10.4028/p-o1809g>.
- (70) Leão, F. N.; Pashby, I. R. A Review on the Use of Environmentally-Friendly Dielectric Fluids in Electrical Discharge Machining. *Journal of Materials Processing Technology* **2004**, 149 (1), 341–346. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.043>.
- (71) Dhakar, K.; Chaudhary, K.; Dvivedi, A.; Bembalge, O. An Environment-Friendly and Sustainable Machining Method: Near-Dry EDM. *Materials and Manufacturing Processes* **2019**, 34 (12), 1307–1315. <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1643471>.
- (72) Sivapirakasam, S. P.; Mathew, J.; Surianarayanan, M. Constituent Analysis of Aerosol Generated from Die Sinking Electrical Discharge Machining Process. *Process Safety and Environmental Protection* **2011**, 89 (2), 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.10.003>.

- (73) Sadagopan, P.; Mouliprasanth, B. Investigation on the Influence of Different Types of Dielectrics in Electrical Discharge Machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2017**, 92 (1), 277–291.
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0039-1>.
- (74) Eden, A.; Temel, D. Investigation on the Use of Water as Dielectric Liquid in Electric Discharge Machining. *Machine Tool Design and Research Conference, Manchester* **1981**, 437–440.
- (75) Chen, S. L.; Yan, B. H.; Huang, F. Y. Influence of Kerosene and Distilled Water as Dielectrics on the Electric Discharge Machining Characteristics of Ti–6Al–4V. *Journal of Materials Processing Technology* **1999**, 87 (1), 107–111.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00340-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00340-9).
- (76) König, W.; Jörres, L. Aqueous Solutions of Organic Compounds as Dielectrics for EDM Sinking. *CIRP Annals* **1987**, 36 (1), 105–109.
[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62564-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62564-5).
- (77) Liu, Y.; Ji, R.; Zhang, Y.; Zhang, H. Investigation of Emulsion for Die Sinking EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2010**, 47 (1), 403–409. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2209-2>.
- (78) Masuzawa, T. Machining Characteristics of E.D.M. Using Water As a Dielectric Fluid. In *Proceedings of the Twenty-second International Machine Tool Design and Research Conference*; Davies, B. J., Ed.; Macmillan Education UK: London, 1982; pp 441–447.
https://doi.org/10.1007/978-1-349-06281-2_55.
- (79) Żyra, A.; Bizoń, W.; Skoczypiec, S. Primary Research on Dry Electrodischarge Machining with Additional Workpiece Cooling. *AIP Conference Proceedings* **2018**, 020034. <https://doi.org/10.1063/1.5056297>.
- (80) Hinduja, S.; Kunieda, M. Modelling of ECM and EDM Processes. *CIRP Annals* **2013**, 62 (2), 775–797. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.011>.
- (81) Hayakawa, S.; Sasaki, Y.; Itoigawa, F.; Nakamura, T. Relationship between Occurrence of Material Removal and Bubble Expansion in Electrical Discharge Machining. *Procedia CIRP* **2013**, 6, 174–179.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.095>.
- (82) Yoshida, M.; Kunieda, M. Study on the Distribution of Scattered Debris Generated by a Single Pulse Discharge in EDM Process. *International journal of electrical machining* **1998**, 3, 39–46.

- (83) Yoshida, M.; Hanaoka, D.; Flynn, B.; McGeough, J. A. Observation of Craters Formed by Single Pulse Discharge by Stacking Cross Sectional Shapes: Comparison of Craters in Liquid and Air. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* **2011**, 225 (8), 1311–1318.
<https://doi.org/10.1177/2041297510393641>.
- (84) Yang, X.; Guo, J.; Chen, X.; Kunieda, M. Molecular Dynamics Simulation of the Material Removal Mechanism in Micro-EDM. *Precision Engineering* **2011**, 35 (1), 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.09.005>.
- (85) Zhang, Y.; Liu, Y.; Ji, R.; Zheng, C.; Shen, Y.; Wang, X. Transient Dynamics Simulation of the Electrical Discharge-Generated Bubble in Sinking EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2013**, 68 (5), 1707–1715. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4969-y>.
- (86) Wang, J.; Han, F. Simulation Model of Debris and Bubble Movement in Consecutive-Pulse Discharge of Electrical Discharge Machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **2014**, 77, 56–65.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.10.007>.
- (87) Mikolajczyk, T.; Malinowski, T.; Moldovan, L.; Fuwen, H.; Paczkowski, T.; Ciobanu, I. CAD CAM System for Manufacturing Innovative Hybrid Design Using 3D Printing. *Procedia Manufacturing* **2019**, 32, 22–28.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.178>.
- (88) Zaw, H. M.; Fuh, J. Y. H.; Nee, A. Y. C.; Lu, L. Formation of a New EDM Electrode Material Using Sintering Techniques. *Journal of Materials Processing Technology* **1999**, 89–90, 182–186. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00054-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00054-0).
- (89) Stucker, B. E.; Bradley, W. L.; Norasethekul, S.; Eubank, P. T. The Production of Electrical Discharge Machining Electrodes Using SLS: Preliminary Results; 1995.
<https://doi.org/10.15781/T2X05XZ21>.
- (90) Uhlmann, E.; Bergmann, A.; Bolz, R.; Gridin, W. Application of Additive Manufactured Tungsten Carbide Tool Electrodes in EDM. *Procedia CIRP* **2018**, 68, 86–90. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.027>.
- (91) Skoczypiec, S.; Kozak, J.; Ruszaj, A. Wybrane problemy technologii elektrochemicznej i elektroerozyjnej mikro-narzędzi. *Inżynieria Maszyn* **2009**, R. 14, z. 1, 20–30.
- (92) Mikolajczyk, T.; Paczkowski, T.; Kuntoglu, M.; Patange, A. D.; Binali, R. Research on Using an Unconventional Tool for Increasing Tool Life by Selective Exchange of

- Worn Cutting Edge. *Applied Sciences* **2023**, *13* (1), 460.
<https://doi.org/10.3390/app13010460>.
- (93) Sułkiewicz, P.; Babiarz, R.; Burek, J.; Buk, J.; Gancarczyk, K. A Method of Increasing the Accuracy of Low-Stiffness Shafts: Single-Pass Traverse Grinding Without Steady Rests. *Acta Mechanica et Automatica* **2022**, *16* (4), 357–364.
<https://doi.org/10.2478/ama-2022-0042>.
- (94) Mohije, R.; Titre, H.; Gohil, V.; Babruwan Meshram, D. A Study in EDM Electrode Manufacturing Using Additive Manufacturing. *Materials Today: Proceedings* **2023**.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.044>.
- (95) Kern, R. Sinkers Electrode Material Selection. *EDM Today*. **2008**, *4*, 32–38.
- (96) Welschhof, L.; Schäfer, N.; Herrig, T.; Klink, A.; Bergs, T. Effect of Electrode Material on Removal Efficiency Regarding Single Discharges in Wire EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2022**, *120* (3), 1583–1589.
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-07858-x>.
- (97) Mahajan, R.; Krishna, H.; Singh, A. K.; Ghadai, R. K. A Review on Copper and Its Alloys Used as Electrode in EDM. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **2018**, *377*, 012183. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012183>.
- (98) Rahul; Mishra, D. K.; Datta, S.; Masanta, M. Effects of Tool Electrode on EDM Performance of Ti-6Al-4V. *Silicon* **2018**, *10* (5), 2263–2277.
<https://doi.org/10.1007/s12633-018-9760-0>.
- (99) Bhaumik, M.; Maity, K. Effect of Electrode Materials on Different EDM Aspects of Titanium Alloy. *Silicon* **2019**, *11* (1), 187–196.
<https://doi.org/10.1007/s12633-018-9844-x>.
- (100) Uhlmann, E.; Polte, M.; Bolz, R.; Börnstein, J. Fundamental Research of Applying Tungsten Carbide-Cobalt as Tool Electrode Material for Sinking EDM. *Procedia CIRP* **2020**, *95*, 466–470. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.137>.
- (101) Liu, Y.; Wang, W.; Zhang, W.; Ma, F.; Wang, Y.; Rolfe, B.; Zhang, S. Study on Breakdown Probability of Multimaterial Electrodes in EDM. *Advances in Materials Science and Engineering* **2018**, *2018*, e2961879. <https://doi.org/10.1155/2018/2961879>.
- (102) Li, X.; Wei, D.; Li, Q.; Yang, X. Study on Effects of Electrode Material and Dielectric Medium on Arc Plasma in Electrical Discharge Machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2020**, *107* (11), 4403–4413.
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05278-x>.

- (103) Lipiec, P.; Machno, M.; Skoczypiec, S. The Experimental Research on Electrodischarge Drilling of High Aspect Ratio Holes in Inconel 718. *AIP Conference Proceedings* **2018**, *1960* (1), 100009. <https://doi.org/10.1063/1.5034949>.
- (104) Ming, W.; Xie, Z.; Cao, C.; Liu, M.; Zhang, F.; Yang, Y.; Zhang, S.; Sun, P.; Guo, X. Research on EDM Performance of Renewable Dielectrics under Different Electrodes for Machining SKD11. *Crystals* **2022**, *12* (2), 291. <https://doi.org/10.3390/cryst12020291>.
- (105) Patel G. C., M.; Kumar, S.; Jagadish; Pimenov, D. Y.; Giasin, K. Experimental Analysis and Optimization of EDM Parameters on HcHcr Steel in Context with Different Electrodes and Dielectric Fluids Using Hybrid Taguchi-Based PCA-Utility and CRITIC-Utility Approaches. *Metals* **2021**, *11* (3), 419. <https://doi.org/10.3390/met11030419>.
- (106) Payal, H.; Fekadu, E.; Bhattacharya, A.; Priyadarshini, S.; Mishra, A. Optimization of Machining Parameters in EDM of Inconel 625 Using Taguchi Approach. *Materials Today: Proceedings* **2023**. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.223>.
- (107) Khan, A. A.; Saifuddin, S. E. Wear Characteristics of Copper and Aluminum Electrodes during EDM of Stainless Steel and Carbide; Dhaka, Bangladsh, 2005; pp 1–5.
- (108) Şimşek, Ü.; Çoğun, C.; Esen, Z. Effects of Electrolytic Copper and Copper Alloy Electrodes on Machining Performance in Electrical Discharge Machining (EDM). *Machining Science and Technology* **2022**, *26* (2), 229–244. <https://doi.org/10.1080/10910344.2022.2044855>.
- (109) Torres, A.; Luis, C. J.; Puertas, I. Analysis of the Influence of EDM Parameters on Surface Finish, Material Removal Rate, and Electrode Wear of an INCONEL 600 Alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2015**, *80* (1), 123–140. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6974-9>.
- (110) Haron, C. H. C.; Deros, B. M.; Ginting, A.; Fauziah, M. Investigation on the Influence of Machining Parameters When Machining Tool Steel Using EDM. *Journal of Materials Processing Tech.* **2001**, *1* (116), 84–87.
- (111) Wang, C. C.; Yan, B. H.; Chow, H. M.; Suzuki, Y. Cutting Austempered Ductile Iron Using an EDM Sinkers. *Journal of Materials Processing Technology* **1999**, *88* (1), 83–89. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00382-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00382-3).

- (112) Ozgedik, A.; Cogun, C. An Experimental Investigation of Tool Wear in Electric Discharge Machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2006**, 27, 488–500. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2220-6>.
- (113) Khan, A. A. Electrode Wear and Material Removal Rate during EDM of Aluminum and Mild Steel Using Copper and Brass Electrodes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2007**, 39 (5–6), 482–487.
- (114) Her, M.-G.; Weng, F.-T. Micro-Hole Maching of Copper Using the Electro-Discharge Machining Process with a Tungsten Carbide Electrode Compared with a Copper Electrode. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2001**, 17 (10), 715–719. <https://doi.org/10.1007/s001700170116>.
- (115) Singh, S.; Maheshwari, S.; Pandey, P. C. Some Investigations into the Electric Discharge Machining of Hardened Tool Steel Using Different Electrode Materials. *Journal of Materials Processing Technology* **2004**, 149 (1), 272–277. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.046>.
- (116) Amorim, F. L.; Weingaertner, W. L. Die-Sinking Electrical Discharge Machining of a High-Strength Copper-Based Alloy for Injection Molds. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* **2004**, 26, 137–144. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782004000200004>.
- (117) Salman, Ö.; Kayacan, M. C. Evolutionary Programming Method for Modeling the EDM Parameters for Roughness. *Journal of Materials Processing Technology* **2008**, 1–3 (200), 347–355. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.022>.
- (118) Mathew, N.; Kumar, D.; Beri, N.; Kumar, A. Study of Material Removal Rate of Different Tool Materials during EDM of H 11 Steel at Reverse Polarity. *International Journal of Advanced Engineering Technology* **2014**, 3, 25–30.
- (119) Marafona, J. D. Black Layer Affects the Thermal Conductivity of the Surface of Copper–Tungsten Electrode. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2008**, 42 (5), 482. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1613-3>.
- (120) D’Urso, G.; Merla, C. Workpiece and Electrode Influence on Micro-EDM Drilling Performance. *Precision Engineering* **2014**, 38 (4), 903–914. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.05.007>.
- (121) Ramulu, M.; Taya, M. EDM Machinability of SiCw/Alcomposites. *Journal of Materials Science* **1989**, 24 (3), 1103–1108. <https://doi.org/10.1007/BF01148805>.

- (122) Sundaram, M.; Rajurkar, K. Study on the Performance of Copper-Graphite as Tool Material in Micromachining by Micro Electro Discharge Machining. *Proceedings of the 21st Annual ASPE Meeting, ASPE 2006* **2006**.
- (123) Muttamara, A. Comparison Performances of EDM on Ti6Al4V with Two Graphite Grades. *International Journal of Chemical Engineering and Applications* **2015**, *6*, 250–253. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2015.V6.490>.
- (124) Sánchez, J. A.; Cabanes, I.; López de Lacalle, L. N.; Lamikiz, A. Development of Optimum Electrodischarge Machining Technology for Advanced Ceramics: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2001**, *18* (12), 897–905. <https://doi.org/10.1007/PL00003958>.
- (125) Jahan, M. P.; Wong, Y. S.; Rahman, M. A Study on the Quality Micro-Hole Machining of Tungsten Carbide by Micro-EDM Process Using Transistor and RC-Type Pulse Generator. *Journal of Materials Processing Tech.* **2009**, *4* (209), 1706–1716. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.029>.
- (126) Fu, Y.; Miyamoto, T.; Natsu, W.; Zhao, W.; Yu, Z. Study on Influence of Electrode Material on Hole Drilling in Micro-EDM. *Procedia CIRP* **2016**, *42*, 516–520. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.243>.
- (127) Tsai, Y.-Y.; Masuzawa, T. An Index to Evaluate the Wear Resistance of the Electrode in Micro-EDM. *Journal of Materials Processing Technology* **2004**, *149* (1), 304–309. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.043>.
- (128) Santoki, P. N.; Bhabhor, A. P. Parametric Study For Overcut Using EDM With Tool of Graphite, Copper & Silver. *International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering* **2015**, *2* (3), 8.
- (129) Kadirvel, A.; Hariharan, P.; Gowri, S. Experimental Investigation on the Electrode Specific Performance in Micro-EDM of Die-Steel. *Materials and Manufacturing Processes* **2013**, *28* (4), 390–396. <https://doi.org/10.1080/10426914.2013.763959>.
- (130) Hourmand, M.; Sarhan, A. A. D.; Sayuti, M. Micro-Electrode Fabrication Processes for Micro-EDM Drilling and Milling: A State-of-the-Art Review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2017**, *91* (1), 1023–1056. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9671-4>.
- (131) D'Urso, G.; Maccarini, G.; Ravasio, C. Influence of Electrode Material in Micro-EDM Drilling of Stainless Steel and Tungsten Carbide. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2016**, *85* (9), 2013–2025. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7010-9>.

- (132) Bhaumik, M. Study the Effect of Tungsten Carbide Electrode on Stainless Steel (AISI 304) Material in Die Sinking EDM. *Journal of Material Science and Mechanical Engineering* **2014**, 1 (1), 1–6.
- (133) Haşçalık, A.; Çaydaş, U. Electrical Discharge Machining of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V). *Applied Surface Science* **2007**, 253, 9007–9016.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.05.031>.
- (134) Sheppard, R. G.; Morgan, D.; Mathes, D. M.; BGray D. J. *Poco Graphite, Inc. Properties and Characteristics of Graphite*. kipdf.com. https://kipdf.com/poco-graphite-inc-properties-and-characteristics-of-graphite_5b1675257f8b9aa7148b45b0.html (accessed 2022-04-26).
- (135) *Odmiany węgla pierwiastkowego - Zintegrowana Platforma Edukacyjna*.
<https://zpe.gov.pl/a/odmiany-węgla-pierwiastkowego/D8mRW9Ag8>
(accessed 2022-04-26).
- (136) Niyogi, S.; Bekyarova, E.; Itkis, M. E.; McWilliams, J. L.; Hamon, M. A.; Haddon, R. C. Solution Properties of Graphite and Graphene. *Journal of the American Chemical Society* **2006**, 128 (24), 7720–7721. <https://doi.org/10.1021/ja060680r>.
- (137) Mercer, J. Graphite vs. Copper. *EDM Technical Manual* **2014**, 8.
- (138) Amorim, F. L.; Weingaertner, W. L. The Behavior of Graphite and Copper Electrodes on the Finish Die-Sinking Electrical Discharge Machining (EDM) of AISI P20 Tool Steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* **2007**, 29 (4). <https://doi.org/10.1590/s1678-58782007000400004>.
- (139) *Poco: EDM Technical Manual*. Poco Graphite. <http://www.edmtechman.com/>
(accessed 2022-04-26).
- (140) Properties and Characteristics of Graphite. *Engineris, Inc.* **2013**, 39.
- (141) Mohammadimehr, A.; Solmus, İ.; Ozyer, B.; Rees, D. A. S. Determination of Physical Properties and Thermal Conductivity of Graphite Foam with Image Analysis. *International Journal of Thermophysics* **2020**, 41 (4), 45.
<https://doi.org/10.1007/s10765-020-02623-w>.
- (142) Taylor, R. E.; Groot, H. *Thermophysical Properties of POCO Graphite*; Defense Technical Information Center: Fort Belvoir, VA, 1978.
<https://doi.org/10.21236/ADA060419>.
- (143) <https://poco.entegris.com/> (accessed 2022-04-26).
- (144) Nowicki, R.; Świercz, R.; Oniszcuk-Świercz, 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* (16), 5631. <https://doi.org/10.3390/ma15165631>.
- (145) Amorim, F. L.; Stedile, L. J.; Torres, R. D.; Soares, P. C.; Henning Laurindo, C. A. Performance and Surface Integrity of Ti6Al4V After Sinking EDM with Special Graphite Electrodes. *Journal of Materials Engineering and Performance* **2014**, *23* (4), 1480–1488. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0852-0>.
- (146) Aas, K. L. Performance of Two Graphite Electrode Qualities in EDM of Seal Slots in a Jet Engine Turbine Vane. *Journal of Materials Processing Tech.* **2004**, *1–3* (149), 152–156. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.005>.
- (147) Torres, A.; Puertas, I.; Luis, C. J. EDM Machinability and Surface Roughness Analysis of INCONEL 600 Using Graphite Electrodes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2016**, *84* (9), 2671–2688. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7880-x>.
- (148) Kumar, N.; Kumar, L.; Tewatia, H.; Yadav, R. Comparative Study for MRR on Die-Sinking EDM Using Electrode of Copper & Graphite. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology & Engineering Research* **2012**, *2* (2), 170–174.
- (149) Klocke, F.; Schwade, M.; Klink, A.; Veselovac, D. Analysis of Material Removal Rate and Electrode Wear in Sinking EDM Roughing Strategies Using Different Graphite Grades. *Procedia CIRP* **2013**, *6*, 163–167. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.079>.
- (150) Ayesta, I.; Izquierdo, B.; Sanchez, J.; Ramos, J. M.; Plaza, S.; Pombo, I.; Ortega, N.; Bravo, H.; Fradejas, R.; Zamakona, I. Influence of EDM Parameters on Slot Machining in C1023 Aeronautical Alloy. *Procedia CIRP* **2013**, *6*, 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.059>.
- (151) Muttamara, A.; Fukuzawa, Y.; Mohri, N.; Tani, T. Effect of Electrode Material on Electrical Discharge Machining of Alumina. *Journal of Materials Processing Tech.* **2009**, *5* (209), 2545–2552. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.018>.
- (152) Uhlmann, E.; Domingos, D. Dressing of Graphite Electrodes for EDM of Seal Slots in Nickel-Base Alloy MAR-M247. *Procedia CIRP* **2016**, *42*, 328–333. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.176>.
- (153) Flaño, O.; Ayesta, I.; Izquierdo, B.; Sanchez, J.; Ramos, J. M. Experimental Study on the Influence of Electrode Geometry and Electrode Path on Wear Pattern in EDM. *Procedia CIRP* **2018**, *68*, 405–410. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.103>.

- (154) Janmanee, P.; Muttamara, A. Performance of Difference Electrode Materials in Electrical Discharge Machining of Tungsten Carbide. *Energy Research Journal* **2010**, *1* (2), 87–90. <https://doi.org/10.3844/erjsp.2010.87.90>.
- (155) Muttamara, A.; Tantipaibulvut, C. Experimental Investigations of EDM Parameters with Graphite Electrode on Copper Tungsten Using Taguchi Method. In *Technology & Disaster Management*; 2018. <https://doi.org/10.17758/ERPUB.ER0318406>.
- (156) Puertas, I.; Luis, C. J.; Álvarez, L. Analysis of the Influence of EDM Parameters on Surface Quality, MRR and EW of WC–Co. *Journal of Materials Processing Technology* **2004**, *153–154*, 1026–1032. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.346>.
- (157) Sundaram, M.; Yeo, S. H.; Rajurkar, K. A Study of Tool Electrode Materials and Flushing Techniques in Micro EDM. *Proceedings of the 20th Annual ASPE Meeting, ASPE 2005* **2005**.
- (158) El-Taweel, T. A.; El-Desouky, A. R.; Farouk, W. M. EDM Assisted by Magnetic Field for Armoured Steel. *Engineering Research Journal* **2020**, *34* (1), 43–55. <https://doi.org/10.21608/erjm.2020.67256>.
- (159) Uhlmann, E.; Domingos, D. C. Investigations on Vibration-Assisted EDM-Machining of Seal Slots in High-Temperature Resistant Materials for Turbine Components –Part II. *Procedia CIRP* **2016**, *C* (42), 334–339. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.179>.
- (160) Ahmed, N.; Ishfaq, K.; Moiduddin, K.; Ali, R.; Al-Shammary, N. Machinability of Titanium Alloy through Electric Discharge Machining. *Materials and Manufacturing Processes* **2019**, *34* (1), 93–102. <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1532092>.
- (161) Ahmed, N.; Ishfaq, K.; Rafaqat, M.; Pervaiz, S.; Anwar, S.; Salah, B. EDM of Ti-6Al-4V: Electrode and Polarity Selection for Minimum Tool Wear Rate and Overcut. *Materials and Manufacturing Processes* **2019**, *34* (7), 769–778. <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1594278>.
- (162) Suresh, S.; Jamil, M. A.; Sulaiman, S.; Shokor, M. R. M. Optimization of Electrode Material for EDM Die-Sinking of Titanium Alloy Grade 5 - Ti6Al4V. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology* **2016**, *6* (4), 534–539. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.6.4.902>.
- (163) Che Haron, C. H.; Ghani, J. A.; Burhanuddin, Y.; Seong, Y. K.; Swee, C. Y. Copper and Graphite Electrodes Performance in Electrical-Discharge Machining of XW42 Tool Steel. *Journal of Materials Processing Technology* **2008**, *201* (1), 570–573. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.285>.

- (164) Mohanty, C.; Mahapatra, S.; Singh, Dr. M. An Experimental Investigation of Machinability of Inconel 718 in Electrical Discharge Machining. *Procedia Materials Science* **2014**, 6, 605–611. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.075>.
- (165) Ajay C, V.; Guru T. D., C. An Analysis of Performance Parameters and Effect of Copper Tungsten and Graphite Electrodes on H13 Tool Steels in EDM. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development* **2019**, 3 (7), 1658–1667.
- (166) Świercz, R. Wpływ charakteru impulsów natężenia prądu i napięcia elektrycznego na strukturę warstwy wierzchniej po obróbce EDM: praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2013.
<https://repo.pw.edu.pl/info/phd/WUTf8f6c54e369548f1be15469532f138e8/?tab=&r=phd&lang=pl> (accessed 2022-04-26).
- (167) Soundhar, A.; Zubar, H. A.; Sultan, M. T. B. H. H.; Kandasamy, J. Dataset on Optimization of EDM Machining Parameters by Using Central Composite Design. *Data Brief* **2019**, 23, 103671. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.01.019>.
- (168) Faisal, N.; Kumar, K. Optimization of Machine Process Parameters in EDM for EN 31 Using Evolutionary Optimization Techniques. *Technologies* **2018**, 6 (2), 54. <https://doi.org/10.3390/technologies6020054>.
- (169) Ruszaj, A. Charakterystyka współczesnych procesów wytwarzania elementów maszyn i narzędzi. *Świat Obrabiarek i Narzędzi* **2014**, No. R. 9, nr 9–10, 23–29.
- (170) Ruszaj, A.; Skoczypiec, S. Obróbka elektroerozyjno-ścierna – wybrane zagadnienia. *Mechanik* **2015**, No. 3, 210–215. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2015.3.107>.
- (171) Oniszczyk, D.; Świercz, R. An Investigation into the Impact of Electrical Pulse Character on Surface Texture in the EDM and WEDM Process. *Advances in Manufacturing Science and Technology* **2012**.
<https://doi.org/10.2478/v10264-012-0019-y>.
- (172) Oniszczyk–Świercz, D.; Świercz, R.; Dąbrowski, L.; Marczak, M. Surface layer of Inconel 718 after WEDM process. *Mechanik* **2015**, No. 4, 327/71–327/74. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2015.4.174>.
- (173) Nowicki, R.; Świercz, R.; Oniszczyk–Świercz, D.; Kopytowski, A. Investigation of the Influence of Machining Parameters of Grinding Process Using Multi-Granular Wheels on the Surface Roughness of Inconel 718; 2019; pp 1634–1639. <https://doi.org/10.37904/metal.2019.967>.

- (174) Marczak, M.; Kopytowski, A.; Nowicki, R.; Stambolov, G. The Idea of Measuring the Real Induction in the Machining Gap Filled with Magnetic Material. *Welding Technology Review* **2019**, No. R. 91, nr 6, 22–28.
<https://doi.org/10.26628/wtr.v91i6.993>.
- (175) Kopytowski, A.; Świercz, R.; Nowicki, R.; Stambolov, G. Influence of Machining Parameters on Surface Texture of Inconel 718 after Grinding with Multi-Granular Wheels. *Welding Technology Review* **2019**, 91.
<https://doi.org/10.26628/wtr.v91i3.1042>.
- (176) Kansal, H. K.; Singh, S.; Kumar, P. Parametric Optimization of Powder Mixed Electrical Discharge Machining by Response Surface Methodology. *Journal of Materials Processing Tech.* **2005**, 3 (169), 427–436.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.028>.
- (177) Boujelbene, M.; Bayraktar, E.; Tebni, W.; Salem, S. B. Influence of Machining Parameters on the Surface Integrity in Electrical Discharge Machining. *Archives of Materials Science and Engineering* **37** (2), 110–116.
- (178) Ruszaj, A.; Grzesik, W. Manufacturing of Sculptured Surfaces Using EDM and ECM Processes. In *Machining of Complex Sculptured Surfaces*; Davim, J. P., Ed.; Springer: London, 2012; pp 229–251. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2356-9_7.
- (179) Pawade, M. M.; Banwait, S. S. An Exhaustive Review of Die Sinking Electrical Discharge Machining Process and Scope for Future Research. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* **2013**, 7 (6), 1104–1110.
- (180) Zhang, X. L.; Peng, H. L.; Zhang, L. Y.; Cao, C. L.; Yi, J. W.; Zhou, Y.; Zhang, Y. Evolution of White Layer during Wire-Cutting and Comparison of Several Methods to Improve Surface Integrity for Fineblanking Tools. *Materials Science Forum* **2018**, 920, 141–148. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.920.141>.
- (181) 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* **2017**, 89 (5–8), 1529–1534.
<https://doi.org/10.1007/s00170-016-9168-1>.
- (182) Salem, S. B.; Tebni, W.; Bayraktar, E. Prediction of Surface Roughness by Experimental Design Methodology in Electrical Discharge Machining (EDM). *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* **2011**, 49 (2), 8.
- (183) Lin, Y.-C.; Chen, Y.-F.; Wang, D.-A.; Lee, H.-S. Optimization of Machining Parameters in Magnetic Force Assisted EDM Based on Taguchi Method. *Journal of*

- Materials Processing Tech.* **2009**, 7 (209), 3374–3383.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.052>.
- (184) Bhaumik, M.; Maity, K. Effect of Machining Parameter on the Surface Roughness of AISI 304 in Silicon Carbide Powder Mixed EDM. *Decision Science Letters* **2017**, 6 (3), 261–268.
- (185) Buschaiah, K.; JagadeeswaraRao, M.; Krishnaiah, A. Investigation On The Influence Of Edm Parameters On Machining Characteristics For Aisi 304. *Materials Today: Proceedings* **2018**, 5 (2, Part 1), 3648–3656.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.615>.
- (186) Singh, S. K.; Kumar, N. Optimizing the EDM Parameters to Improve the Surface Roughness of Titanium Alloy (Ti-6AL-4V). *International Journal of Emerging Science and Engineering* **2013**, 1 (10).
- (187) Efendee, A. M.; Azhari, A.; Hasnain, A. R.; Ariffin, S. Z.; Mukhtar, M. Investigation of Magnetic Field Effect on MRR, EWR and Surface Roughness during EDM of AISI420 Tool Steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **2021**, 1068 (1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1068/1/012018>.
- (188) Firmansyah, M. F.; Suwarno, S.; Pradana, Y. R. A.; Suprayitno, S. Parameter Design of EDM Process to Optimize Surface Roughness and Material Removal Rate Using Taguchi Method. *Materials Science Forum* **2021**, 1028, 391–396.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1028.391>.
- (189) Świercz, R.; Oniszczyk-Świercz, D.; Dąbrowski, L.; Zawora, J. Optimization of Machining Parameters of Electrical Discharge Machining Tool Steel 1.2713. *AIP Conference Proceedings* **2018**, 2017 (1), 020032. <https://doi.org/10.1063/1.5056295>.
- (190) Nagaraju, N.; Venkatesu, S.; Ujwala, N. G. Optimization of Process Parameters of EDM Process Using Fuzzy Logic and Taguchi Methods for Improving Material Removal Rate and Surface Finish. *Materials Today: Proceedings* **2018**, 5 (2, Part 2), 7420–7428. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.413>.
- (191) Świercz, R.; Oniszczyk-Świercz, D. Experimental Investigation of Surface Layer Properties of High Thermal Conductivity Tool Steel after Electrical Discharge Machining. *Metals* **2017**, 7 (12), 550. <https://doi.org/10.3390/met7120550>.
- (192) Işık, A. T.; Çakıroğlu, R.; Günay, M. Multiresponse Optimization of Performance Indicators through Taguchi-Grey Relational Analysis in EDM of Cemented Carbide. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* **2023**, 41, 490–500.
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.01.012>.

- (193) Dastagiri, M.; Kumar, A. H. Experimental Investigation of EDM Parameters on Stainless Steel&En41b. *Procedia Engineering* **2014**, 97, 1551–1564.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.439>.
- (194) Williams, E. M. Theory of Electric Spark Machining. *Electrical engineering (New York, N.Y.)* **1952**, 71 (3), 257–260. <https://doi.org/10.1109/EE.1952.6438015>.
- (195) Guu, Y. H.; Hou, M. T.-K. Effect of Machining Parameters on Surface Textures in EDM of Fe-Mn-Al Alloy. *Materials Science & Engineering A* **2007**, 1–2 (466), 61–67.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.02.035>.
- (196) Hong, T. T.; Tuan, N. A.; Danh, B. T.; Ky, L. H.; Linh, N. H.; Giang, T. N.; Pi, V. N.; Cuong, N. M. Evaluating Influences of Input Parameters on Surface Roughness in Sinking EDM Cylindrical Shaped Parts. *Materials Science Forum* **2021**, 1018, 85–90.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1018.85>.
- (197) Tomadi, S. H.; Hassan, M. A.; Hamedon, Z.; Daud, R.; A.G.Khalid. Analysis of the Influence of EDM Parameters on Surface Quality, Material Removal Rate and Electrode Wear of Tungsten Carbide. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science* **2009**, 2175.
- (198) Keskin, Y.; Halkacı, H. S.; Kizil, M. An Experimental Study for Determination of the Effects of Machining Parameters on Surface Roughness in Electrical Discharge Machining (EDM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2006**, 28 (11), 1118–1121. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2478-8>.
- (199) Vikas; Roy, A. K.; Kumar, K. Effect and Optimization of Various Machine Process Parameters on the Surface Roughness in EDM for an EN41 Material Using Grey-Taguchi. *Procedia Materials Science* **2014**, Complete (6), 383–390.
<https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.049>.
- (200) Guo, Y.; Zhang, G.; Wang, L.; Hu, Y. Optimization of Parameters for EDM Drilling of Thermal-Barrier-Coated Nickel Superalloys Using Gray Relational Analysis Method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2016**, 83 (9), 1595–1605. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7685-y>.
- (201) Lee, S. H.; Li, X. P. Study of the Effect of Machining Parameters on the Machining Characteristics in Electrical Discharge Machining of Tungsten Carbide. *Journal of Mechanical Working Technology* **2001**, 3 (115), 344–358.
- (202) Chikalthankar, S. B.; Nandedkar, V.; Borde, S. V. Experimental Investigations of EDM Parameters. 2013, *International Journal of Engineering Research and Development* **2013**, 7, 31–34.

- (203) Papazoglou, E. L.; Markopoulos, A. P.; Manolakos, D. E. Experimental Research on EDM of AISI O1 Tool Steel and Study of the Surface White Layer Formation. *Procedia Structural Integrity* **2018**, *10*, 235–242.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.033>.
- (204) Dąbrowski, L.; Zawora, J.; Yu, J. Poly-optimization of the Electrical Discharge Machining process using electrical conductive powder in dielectric. *Mechanik* **2015**, No. 12, 979/40-979/44. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2015.12.536>.
- (205) Świercz, R. Electrical discharge machining with graphene flakes in dielectric. *Mechanik* **2017**, *90* (3), 186–187. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.3.38>.
- (206) Świercz, R.; Oniszczyk-Świercz, D. The Effects of Reduced Graphene Oxide Flakes in the Dielectric on Electrical Discharge Machining. *Nanomaterials* **2019**, *9* (3), 335.
<https://doi.org/10.3390/nano9030335>.
- (207) Cusanelli, G.; Hessler-Wyser, A.; Bobard, F.; Demellayer, R.; Perez, R.; Flükiger, R. Microstructure at Submicron Scale of the White Layer Produced by EDM Technique. *Journal of Materials Processing Technology* **2004**, *149* (1), 289–295.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.047>.
- (208) Żyra, A.; Bogucki, R.; Podolak-Lejtas, A.; Skoczypiec, S. Research on Influence of Heat Treatment Scheme of Ti10V2Fe3Al Alloy on Technological Surface Integrity after Electrodischarge Machining. *Journal of Manufacturing Processes* **2021**, *62*, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.038>.
- (209) Świercz, R.; Oniszczyk-Świercz, D.; Chmielewski, T. Multi-Response Optimization of Electrical Discharge Machining Using the Desirability Function. *Micromachines (Basel)* **2019**, *10* (1), E72. <https://doi.org/10.3390/mi10010072>.
- (210) Mahdiah, M. S. Recast Layer and Heat-Affected Zone Structure of Ultra-Fined Grained Low-Carbon Steel Machined by Electrical Discharge Machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* **2020**, *234* (5), 933–944. <https://doi.org/10.1177/0954405419889202>.
- (211) Lee, H. T.; Rehbach, W. P.; Tai, T. Y.; Hsu, F. C. Relationship between Electrode Size and Surface Cracking in the EDM Machining Process. *Journal of Materials Science* **2004**, *39* (23), 6981–6986. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000047541.95138.17>.
- (212) Tebni, W.; Boujelbene, M.; Bayraktar, E. Parametric Approach Model for Determining Electrical Discharge Machining (EDM) Conditions: Effect of Cutting Parameters on the Surface Integrity. *Advanced Materials Research* **2010**, *83–86*, 725–737.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.725>.

- (213) Lee, H. T.; Tai, T. Y. Relationship between EDM Parameters and Surface Crack Formation. *Journal of Materials Processing Technology* **2003**, 142 (3), 676–683. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00688-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00688-5).
- (214) Dąbrowski, L.; Świercz, R. Struktura metalograficzna powierzchni po obróbce elektroerozyjnej. *Inżynieria Maszyn* **2011**, R. 16, z. 3, 16–23.
- (215) Lee, S. H.; Li, X. Study of the Surface Integrity of the Machined Workpiece in the EDM of Tungsten Carbide. *Journal of Materials Processing Technology* **2003**, 1–3 (139), 315–321. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00547-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00547-8).
- (216) Wang, X.; Liu, Z.; Xue, R.; Tian, Z.; Huang, Y. Research on the Influence of Dielectric Characteristics on the EDM of Titanium Alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2014**, 72, 979–987. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5716-8>.
- (217) Gholipour, A.; Baseri, H.; Shabgard, M. R. Investigation of near Dry EDM Compared with Wet and Dry EDM Processes. *Journal of Mechanical Science and Technology* **2015**, 29 (5), 2213–2218. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0441-2>.
- (218) Rahimi, H.; Masoudi, S.; Tolouei-Rad, M. Experimental Investigation of the Effect of EDM Parameters and Dielectric Type on the Surface Integrity and Topography. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2022**, 118 (5), 1767–1778. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08040-z>.
- (219) Dwivedi, A. P.; Choudhury, S. K. Increasing the Performance of EDM Process Using Tool Rotation Methodology for Machining AISI D3 Steel. *Procedia CIRP* **2016**, 46, 131–134. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.207>.
- (220) Younis, M. A.; Abbas, M. S.; Gouda, M. A.; Mahmoud, F. H.; Abd Allah, S. A. Effect of Electrode Material on Electrical Discharge Machining of Tool Steel Surface. *Ain Shams Engineering Journal* **2015**, 6 (3), 977–986. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.02.001>.
- (221) Rajendran, S.; Marimuthu, K.; Sakthivel, M. Study of Crack Formation and Resolidified Layer in EDM Process on T90Mn2W50Cr45 Tool Steel. *Materials and Manufacturing Processes* **2013**, 28. <https://doi.org/10.1080/10426914.2012.727120>.
- (222) Ay, M.; Çaydaş, U.; Haşçalık, A. Optimization of Micro-EDM Drilling of Inconel 718 Superalloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2013**, 66 (5), 1015–1023. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4385-8>.
- (223) Chen, S.; Lian, M.; Wu, X.; Lei, J.; Zhao, H.; Peng, T.; Luo, F.; Yang, J.; Xu, B. Study on the Micro-EDM Processing Characteristics of Ti-6Al-4V Alloy with Different

- Electrode Materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2021**, 116 (11), 3369–3376. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07664-5>.
- (224) Kruth, J.-P.; Stevens, L.; Froyen, L.; Lauwers, B. Study of the White Layer of a Surface Machined by Die-Sinking Electro-Discharge Machining. *CIRP Annals* **1995**, 44 (1), 169–172. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62299-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62299-9).
- (225) Ogata, I. Carburizing and Decarburizing Phenomena in EDM'd Surface. *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering* **1993**, 27 (3), 197–202.
- (226) Kansal, H. k.; Singh, S.; Kumar, P. Application of Taguchi Method for Optimisation of Powder Mixed Electrical Discharge Machining. *International Journal of Manufacturing Technology and Management* **2005**, 7 (2–4), 329–341. <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2005.006836>.
- (227) Młynarczyk, P. S.; Spadło, S. Investigations of Electro-Discharge Mechanical Machining of Manganese Cast Steels. *Archives of Foundry Engineering* **2020**, Vol. 20, iss. 2. <https://doi.org/10.24425/afe.2020.131309>.
- (228) Yadav, R.; Kumar Jain, J.; Kumar Sharma, A.; Bhojak, V. Investigation of the Material Removal Rate on Haste Alloy C-276 Using Electrical Discharge Machining. *Materials Today: Proceedings* **2023**. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.212>.
- (229) Korzyński, M. *Metodyka eksperymentu: planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*, Wyd. 2 zm.; Wydawnictwo WNT: Warszawa, 2013.
- (230) Mańczak, K. *Technika planowania eksperymentu*, Wydanie 1.; Wydawnictwa Naukowo-Techniczne: Warszawa, 1976.
- (231) Polański, Z. *Planowanie doświadczeń w technice*; Państwowe Wydawnictwo Naukowe: Warszawa, 1984.
- (232) Poch, K. Plany eksperymentu. Opracowanie planu oceny czułości badań magnetyczno-proszkowych. *Welding Technology Review* **2012**, 84 (2). <https://doi.org/10.26628/wtr.v84i2.398>.
- (233) Erden, A. Effect of Materials on the Mechanism of Electric Discharge Machining (E.D.M.). *Journal of Engineering Materials and Technology* **1983**, 105 (2), 132–138. <https://doi.org/10.1115/1.3225627>.
- (234) Kolli, M.; Kumar, A. Effect of Dielectric Fluid with Surfactant and Graphite Powder on Electrical Discharge Machining of Titanium Alloy Using Taguchi Method. *Engineering Science and Technology, an International Journal* **2015**, 18 (4), 524–535. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.03.009>.

- (235) Jeswani, M. L. Effect of the Addition of Graphite Powder to Kerosene Used as the Dielectric Fluid in Electrical Discharge Machining. *Wear* **1981**, 70 (2), 133–139. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90148-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90148-4).
- (236) Joshi, A. Y.; Joshi, A. Y. A Systematic Review on Powder Mixed Electrical Discharge Machining. *Heliyon* **2019**, 5 (12), e02963. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02963>.
- (237) Kung, K.-Y.; Horng, J.-T.; Chiang, K.-T. Material Removal Rate and Electrode Wear Ratio Study on the Powder Mixed Electrical Discharge Machining of Cobalt-Bonded Tungsten Carbide. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2009**, 40 (1), 95–104. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1307-2>.
- (238) Goyal, A.; Sharma, D.; Bhowmick, A.; Pathak, V. K. Experimental Investigation for Minimizing Circularity and Surface Roughness under Nano Graphene Mixed Dielectric EDM Exercising Fuzzy-ANFIS Approach. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* **2022**, 16 (3), 1135–1154. <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00826-5>.
- (239) Surani, K.; Patel, S.; Alrubaie, A. J.; Oza, A.; Panchal, H.; Kumar, S.; Zahmatkesh, S. Performance Comparison of Powder Mixed EDM and Traditional EDM on TZM-Molybdenum Super Alloy Using Response Surface Methodology. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* **2022**, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-01088-5>.
- (240) Chaudhari, R.; Shah, Y.; Khanna, S.; Patel, V. K.; Vora, J.; Pimenov, D. Y.; Giasin, K. Experimental Investigations and Effect of Nano-Powder-Mixed EDM Variables on Performance Measures of Nitinol SMA. *Materials* **2022**, 15 (20), 7392. <https://doi.org/10.3390/ma15207392>.
- (241) Ishfaq, K.; Maqsood, M. A.; Anwar, S.; Harris, M.; Alfaify, A.; Zia, A. W. EDM of Ti6Al4V under Nano-Graphene Mixed Dielectric: A Detailed Roughness Analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2022**, 120 (11), 7375–7388. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09207-y>.
- (242) Kanlayasiri, K.; Boonmung, S. An Investigation on Effects of Wire-EDM Machining Parameters on Surface Roughness of Newly Developed DC53 Die Steel. *Journal of Materials Processing Technology* **2007**, 187–188, 26–29. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.220>.
- (243) Wang, G.; Han, F.; Zhu, L. Influence of Energy Input Process on the White Layer and Residual Stress in Electrical Discharge Machining. *The International Journal of*

- Advanced Manufacturing Technology* **2022**, 119 (7–8), 4925–4937.
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-08657-8>.
- (244) Grzesik, W. Effect of the machine parts surface topography features on the machine service. *Mechanik* **2015**, No. 8–9, 587–593.
<https://doi.org/10.17814/mechanik.2015.8-9.493>.
- (245) Wieczorowski, M. Teoretyczne podstawy przestrzennej analizy nierówności powierzchni. *Inżynieria Maszyn* **2013**, R. 18, z. 3, 7–34.
- (246) Nowicki, B. W. *Struktura geometryczna: chropowatość i falistość powierzchni*; Wydawnictwo Naukowo-Techniczne: Warszawa, 1991.
- (247) Żak, K.; Rząsa, M. Wykorzystanie Wymiaru Fraktalnego Do Identyfikacji Podobieństwa Powierzchni. *Mechanik* **2016**, 85, 1868–1869.
<https://doi.org/10.17814/mechanik.2016.12.528>.
- (248) Oniszczyk-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>.
- (249) Matuszewski, M. Nośność Powierzchni a Rodzaj Jej Obróbki. *Tribologia* **2011**, No. 6, 143–150.
- (250) Zawada-Tomkiewicz, A.; Storch, B. Machine surface texture analysis with the use of bearing area curve. *Mechanik* **2016**, No. 11, 1728–1729.
<https://doi.org/10.17814/mechanik.2016.11.512>.
- (251) Spadło, S.; Bańkowski, D.; Mamla, M. Tests of finishing work of parts cut using loose fittings. *Mechanik* **2017**, 90 (11), 1012–1014.
<https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.11.166>.