

elektrodrążenie, wycinanie drutem, dielektryk, elektroda, erozja, impuls prądu, warstwa wierzchnia, chropowatość

Andrzej MAZURKIEWICZ¹

CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA JAKOŚĆ WYTWARZANIA TECHNOLOGIĄ ELEKTRODRĄŻENIA

Obróbka elektroerozyjna to kluczowa technologia, wykorzystywana przy produkcji narzędzi, form, wykrojników, dotycząca obróbki materiałów ze stali narzędziowych. Technologia elektrodrążenia pozwala na wytwarzanie elementów z bardzo dużą dokładnością oraz gładkością powierzchni. Jednak niewłaściwie zaprojektowany proces, źle dobrane parametry mogą pogorszyć jakość powierzchni, a tym samym właściwości eksploatacyjne wyrobu. W pracy zwrócono uwagę na te elementy procesu, które mogą wpływać na jakość powierzchni obrabianego materiału.

FACTORS INFLUENCING ON THE QUALITY OF THE PRODUCTION USING TECHNOLOGY OF ELECTRODISCHARGE

Electrodischarge machining is a key technology, used in production of tools, forms, punches, so the processing of materials from tool steel. The technology of electrodischarge allows production of elements with large exactitude and the smoothness of the surface. However wrongly designed process, bad well-chosen parameters can worsen the quality of the surface, and the same exploational proprieties of the article. In the article attention was paid in to these elements of the process which can influence to the quality of the surface of the worked material.

1. WSTĘP

Obróbka elektroerozyjna (EDM) to kluczowa technologia, wykorzystywana przy produkcji narzędzi, form, wykrojników. Wykorzystywane w tym celu urządzenia to obrabiarki elektroerozyjne - wgłębne (EDM - *Electrical Discharge Machining*) i elektrodrążarki drutowe (wycinanie drutem WEDM - *Wire Electrical Discharge Machining*) Obydwie metody pozwalają na zachowanie dużej dokładności wymiarowej oraz chropowatości powierzchni poszczególnych elementów urządzeń technicznych. Obróbce elektroerozyjnej podlegają materiały, których elektryczna przewodność właściwa jest

¹ Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny; 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54.
tel: + 48 48 361-76-07, e-mail: amazurkiewicz@pr.radom.pl

większa od 10^2S/m . Do tej grupy należą wszystkie metale i ich stopy oraz duża grupa materiałów niemetalowych i kompozytowych z materiałami ceramicznymi włącznie [1].

W obróbce elektroerozyjnej wgłębnej wykorzystuje się elektrodę, która ma postać przestrzennej bryły o dowolnych kształtach. Kształt elektrody roboczej w najprostszej odmianie jest zbliżony do kształtu wykonywanego otworu lub wgłębienia, zaś w obrabiarkach ze sterowaniem numerycznym, kształt wgłębienia lub otworu może być wynikiem superpozycji prostego kształtu elektrody i odpowiedniego toru jej ruchu względem przedmiotu obrabianego. Wymiary wgłębienia powstałego w detalu obrabianym różni się od wymiarów wgłębienia powstałego o grubość szczeliny międzyelektrodowej. Po zakończeniu obróbki wgłębnej warstwa wierzchnia przedmiotu może wykazywać obecność naprężeń rozciągających, a jej grubość rośnie wraz ze zwiększeniem energii impulsów. Warstwa wierzchnia w większości przypadków usuwana jest w kolejnej operacji, co zwiększa koszty wytwarzania.

Podczas elektrodrażenia, szczególnie elementów ze stali narzędziowych występują wysokie temperatury, zmieniające pierwotną strukturę metalu i jego twardość. Może to prowadzić do powstania niepodatnej na chemiczne trawienie warstwy powierzchniowej. Zależnie od szybkości procesu elektrodrażenia grubość takiej warstwy może wynosić nawet 0,2 mm. W ekstremalnych przypadkach (duży prąd, niewłaściwe płukanie) może to doprowadzić do miejscowych przypaleń stali. Usunięcie tak przegrzanych miejsc nie jest możliwe nawet w procesie polerowania [2].

Obróbka EDM może również stanowić alternatywny dla obróbki skrawaniem kształtowania wyrobów kompozytowych zbrojonych cząsteczkami ceramicznymi [3].

2. CHARAKTERYSTYKA PROCESU ELEKTRODRAŻENIA

Elektrodrażenie polega na wywołaniu erozji materiału poprzez impulsowe wyładowania elektryczne pomiędzy dwiema elektrodami, z których jedna jest narzędziem druga zaś przedmiotem obrabianym, obie elektrody zanurzone są w płynnym dielektryku.

Elektroda robocza i przedmiot obrabiany połączone są z generatorem impulsów prądu stałego o amplitudach: napięcia od kilkudziesięciu do kilkuset woltów i natężenia prądu rzędu $1 \div 100 \text{A}$.

W wyniku postępującej erozji elektrycznej podczas kolejnych wyładowań, w miarę dosuwania elektrody, następuje kształtowanie obrabianego przedmiotu. Równolegle z ubytkiem materiału na przedmiocie obrabianym następuje erozja elektrody narzędziowej, a więc jej zużycie, powodująca zmianę pierwotnego kształtu.

Elektroda narzędziowa jest najczęściej używana jako anoda, materiał lub metal który ma być obrabiany jest wtedy katodą. Jest to najczęściej spotykane ustawienie, ale w zależności od okoliczności i polaryzacja może być zmieniona. Dwie elektrody nigdy nie dotykają się, mała szczelina między nimi jest zawsze utrzymywana, a jej wielkość jest regulowana przez prąd płynący oraz ustawienia drążarki.

Obie elektrody są zanurzone w płynnym dielektryku, który ma trzy podstawowe zadania:

- izolowanie przestrzeni pomiędzy elektrodą a materiałem obrabianym. W ten sposób napięcie jonizuje dielektryk i powoduje przeskok iskry pomiędzy elektrodą i materiałem obrabianym w sposób kontrolowany;

- czyszczenie obszaru erozji (wmywanie płynnego metalu z obszaru erozji) by ułatwić proces;
- chłodzenie materiału obrabianego (anody) i chłodzenie elektrody (katody).

Iskra przekazuje energię do powierzchni materiału, energia ta zmienia się na energię cieplną co powoduje lokalne podniesienie temperatury powierzchni metalu do 12000°C. W wyniku tego następuje topienie i parowanie metalu z powierzchni. Częstotliwość wyładowań elektrycznych osiąga wartości setek kHz. Taki proces jest kontynuowany, aż do momentu, gdy powierzchnia materiału osiągnie taki kształt jaki jest pożądany (kształt elektrody). Erozja następuje w materiale obrabianym, ale również na elektrodzie.

W celu wygenerowania iskry między dwoma elektrodami należy przyłożyć napięcie większe od napięcia przebicia szczeliny (przestrzeń między drutem i przedmiotem obrabianym). To napięcie przebicia zależy od:

- odległości między drutem i przedmiotem obrabianym;
- elektrycznych właściwości izolacyjnych dielektryka (brak przewodności);
- stopnia zanieczyszczenia w szczelinie.

W maszynie do cięcia elektroiskrowego jedna z elektrod jest częścią, która jest obrabiana (przedmiot obrabiany), natomiast druga elektroda jest ruchomym drutem, który jest utrzymywany między dwoma prowadnicami.

Taki układ oznacza, że:

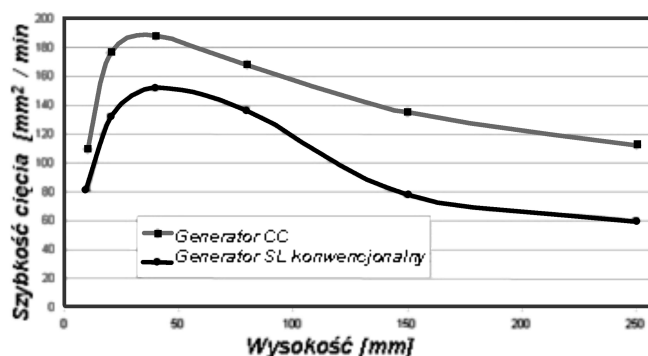
- bieguny generatora iskrowego są podłączone z jednej strony do przedmiotu obrabianego, a z drugiej strony do drutu przez dwa styki powyżej i poniżej przedmiotu obrabianego;
- zużycie drutu jest kompensowane przez odwijanie ze szpuli;
- obrabiane powierzchnie mają kształt obrotu, generowanego przez ruchy dwóch prowadnic. Prowadnice te są zamontowane wewnątrz głowicy górnej i głowicy dolnej, które poruszają się poziomo po jednej ze stron przedmiotu obrabianego wzdłuż prostopadłych osi;
- przestrzeń (zwana szczeliną) między przedmiotem obrabianym i drutem, w której wytwarzane są iskry, jest napełniona z dejonizowaną wodą, co jest realizowane przez współosiowe przepłukiwanie lub przez zanurzenie przedmiotu obrabianego.

Na sterowanie obróbką ma wpływ kilka parametrów, a w tym:

- prędkość ruchu prowadnic;
- szybkość przesuwu drutu;
- biegunowość i wartość napięcia między drutem i przedmiotem obrabianym;
- przepływ dielektryka.

Duży wpływ na efektywność procesu ma zastosowany generator. Wprowadzony do obrabiarek erozyjnych w roku 2002 generator nowej generacji CC (*Clean Cut* - czyste cięcie) jest całkowicie nową konstrukcją. Najistotniejszą cechą użytkową tego rozwiązania jest prędkość cięcia, która wynosi 400 mm²/min przekroju oraz minimalna chropowatość R_a 0,2µm (rys. 1). Takie rezultaty osiągnięto w wyniku zmiany sposobu kształtowania impulsu, w tym zwiększenia jego dynamiki przy równoczesnym skróceniu jego czasu trwania. W efekcie po usunięciu takiej samej ilości materiału w jednym przejściu w krótszym czasie, otrzymujemy mniejsze zniszczenia powierzchni obrabianej. Pozwala to zakończyć obróbkę całkowitą przy mniejszej ilości przejść wykańczających. Nowa metoda kształtowania impulsów to także poprawienie charakterystyki generatora przy cięciu na dużej wysokości. Zwyczajowo cięcie na wysokości pełnej 220mm oznaczało istotny spadek wydajności. Zjawisko jest tym bardziej zauważalne im wysokość cięcia jest większa. W

nowym generatorze CC zjawisko znacząco ograniczono. Przeprowadzone próby wykazały, że dla prac trudnych tj. cięcia na dużej wysokości z dużymi wymaganiami, co do chropowatości, skrócenie czasu całkowitego z powodów wyżej wymienionych priorytetów może wynosić nawet 50%. Ponadto lepsze wykorzystanie energii impulsu oraz nowa jego charakterystyka praktycznie wyeliminowała zjawisko elektrolizy przy obróbce węglików spiekanych, co jest szczególnie istotne dla producentów narzędzi tnących [4].



Rys. 1. Wykres zależności szybkości cięcia do wysokości, drutem 0,25mm generatorem SL i CC [4]

Wycinanie elektroerozyjne (WEDM - *Wire Electrical Discharge Machining*) jest odmianą obróbki elektroerozyjnej (EDM), w której elektrodą jest cienki drut o średnicy 0,02 - 0,5mm z mosiądzu, miedzi, wolframu, molibdenu lub drut z pokryciem, np. mosiądz ocynkowany. Przedmiot obrabiany mocowany jest na stole, który najczęściej jest przemieszczany w kierunkach wzajemnie prostopadłych przez układy napędowe sterowane numerycznie.

Nadając przedmiotowi i elektrodzie złożone ruchy względne (postępowe i kątowe) możliwe jest wycinanie bardzo skomplikowanych kształtów. Wycinać możemy kształty o powierzchniach prostopadłych do powierzchni stołu

Do podstawowych cech WEDM należy wysoka dokładność obróbki (od 0,02 do 0,001mm). Konieczność zastosowań małych energii wyładowań (poniżej 5mJ), uwarunkowanych małą średnicą drutu (dla uniknięcia zerwania) powoduje, że uzyskiwana jest wysoka gładkość ($R_a = 2,5 - 0,5\mu\text{m}$), a zmiany w warstwie wierzchniej są nieznaczne (np. dla stali NCI0 po cięciu zgrubnym grubość warstwy zmienionej jest mniejsza od 0,02mm).

Elektrowycinanie jest obróbką efektywniejszą od elektrodrażenia wgłębnego wynika to z odmiennych parametrów elektrycznych obróbki w generatorach obrabiarek, kształtów elektrody roboczej, kinematyki posuwu oraz warunków oczyszczania szczeliny erozyjnej z produktów erozji. Obróbki elektroerozyjne różnią się ponadto ze względu na wielkość erozji naddatku, w obróbce wgłębnej cały naddatek zamieniany jest na produkty erozji, czyli podgrzewany, topiony i sublimowany, zaś w procesie elektroerozji drutowej tylko niewielka część materiału obrabianego poddawana jest temu procesowi.

Wyniki EDM uwarunkowane są nie tylko parametrami elektrycznymi nastawianymi w generatorze, lecz również zależą od takich czynników, jak:

- właściwości materiału, od których zależy obrabialność elektroerozyjna,
- właściwości materiału elektrody roboczej,
- właściwości dielektryka.

Wpływ właściwości materiału obrabianego i ER na wydajność obróbki oraz podatność ER na zużycie mogą być scharakteryzowane przez tzw. odporność elektroerozyjną danego materiału.

Doświadczalnie stwierdzono, że uzyskuje się tym lepszą wydajność i w pewnym stopniu mniejsze zużycie ER, im lepsza jest przewodność elektryczna elektrody. Najlepsze wyniki uzyskuje się dla elektrod miedzianych, miedziogرافitowych, grafitowych i mosiężnych [5].

Efekt erozji elektrycznej wyraźnie zwiększa się w obecności dielektryka i posiada wyraźnie zaznaczony kierunek (biegunowość). Od rodzaju dielektryka (składu chemicznego i właściwości), sposobu jego podawania w szczelinę iskrową oraz stopnia zanieczyszczenia produktami erozji zależą: wydajność obróbki, zużycie ER, dokładność i chropowatość powierzchni oraz zmiany zachodzące w warstwie wierzchniej. Dobry dielektryk powinien mieć m.in. następujące cechy: odpowiednią wytrzymałość dielektryczną (dużą stałą dielektryczną), dobrą zdolność gaszenia łuku (dobre właściwości dejonizacyjne), wysoką temperaturę zapłonu, dobre właściwości chłodzące, odpowiednią trwałość, nie powinien być chemicznie agresywny w stosunku do zespołów obrabiarki, materiałów obrabianych i obsługi, w wyniku pirolizy nie powinien wydzielać trujących gazów. Najczęściej stosowane są węglowodory płynne, a z nich nafta i olej transformatorowy [6].

3. CHARAKTERYSTYKA WARSTWY WIERZCHNIEJ PO CIĘCIU

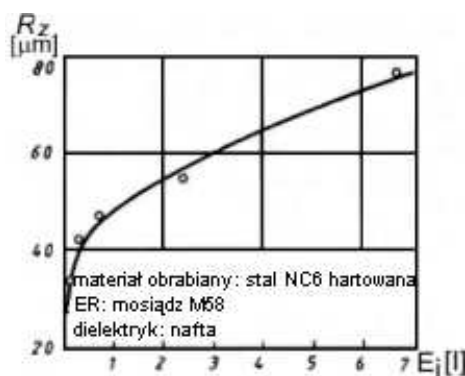
Do czynników, które mają wpływ na przebieg i skutki obróbki elektroerozyjnej, czyli tzw. parametrów obróbki elektroerozyjnej, zalicza się czynniki związane z:

- generacją wyładowań, czyli tzw. warunkami elektrycznymi oraz wynikające z nich kształt wyładowań, energia częstotliwość impulsów;
- dielektrykiem w szczelinie iskrowej, składem chemicznym właściwościami fizycznymi dielektryka, stopniem zanieczyszczenia produktami erozji lub innymi zawiesinami, grubością szczeliny iskrowej, prędkościami przepływu dielektryka;
- erodą tzn. własnościami chemicznymi i fizycznymi materiału erody, kształtem i wymiarami erody, kinematyką erody;
- materiałem obrabianym, jak właściwości chemiczne i fizyczne materiału, kształt i wymiary powierzchni obrabianej, kinematyka materiału obrabianego;
- obrabiarką, jak sztywność i stabilność dynamiczna, nadążność układu sterującego, dostępność do strefy obróbki, stopień mechanizacji i automatyzacji ruchów ustawnych i pomocniczych.

Następstwa, jakie mogą wystąpić w obróbce elektroerozyjnej wgłębnej przy nie odpowiednich parametrach nastawczych to: mała wydajność obróbki i duże zużycie ER, duży parametr Ra, nierównomierne zużywanie się ER, duża strefa wpływu ciepła (warstwa zmieniona) w materiale obrabianym, niezgodność wymiarowa (duża szczelina erozyjna).

Jakość powierzchni obrabianej elektroerozyjnie ocenia się za pomocą chropowatości powierzchni, odchyłki wymiarów powierzchni obrabianych, pozycjonowanie elektrody względem półwyroby, granicznej wartości warstwy wierzchniej, parametrów i jej struktury.

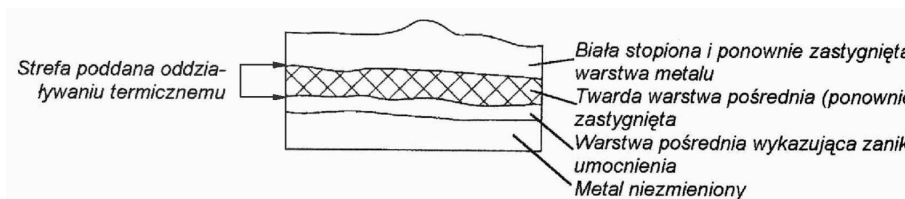
Chropowatość powierzchni obrabianych elektroerozyjnie jest wynikiem wzajemnie nakładających się kraterów. Wynika stąd, że wysokość nierówności jest tym większa, im większa energia poszczególnych impulsów, co pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Zależność chropowatości (parametru R_z) od energii poszczególnych impulsów [7]

Przy dużych wydajnościach chropowatość powierzchni obrabianej jest większa niż przy obróbce zgrubnej skrawaniem. Jest możliwe uzyskanie chropowatości R_z poniżej 0,1 mikrometra, ale przy bardzo małej wydajności, co związane jest z koniecznością zastosowania bardzo małych energii w pojedynczych wyładowaniach. Chropowatość powierzchni po obróbce jest tym większa, im większą zastosowano amplitudę prądu i większy współczynnik η . Ponadto zauważa się wyraźny wzrost chropowatości dla dłuższych czasów trwania impulsu t_i [8].

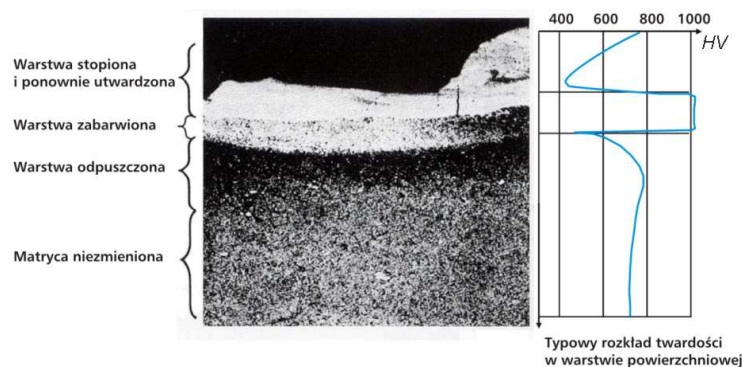
Elektrodrążenie to termiczna metoda obróbki, stąd należy spodziewać się zmiany struktury i właściwości w warstwie wierzchniej obrabianego materiału. Mikrostruktura warstwy wierzchniej obrabianej elektroerozyjnie ma zwykle trzy typowe warstwy (rys. 3)



Rys. 3. Warstwy powierzchni metalu po elektrodrążeniu

Warstwa pierwsza od brzegu przedmiotu nazywana jest warstwą białą z powodu białej barwy po wytrawieniu w 4% HNO_3 . Powstała ona z przetopionego metalu, który nie został wyrzucony w otaczający ośrodek i ponownie zakrzepł. W warstwie tej, oprócz rodzimego

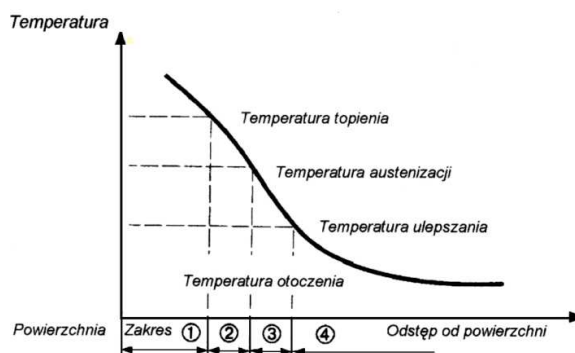
materiału, obserwuje się cząstki ER oraz produkty powstałe z pirolizy dielektryka. Charakteryzuje się ona bardzo drobnoziarnistą, dendrytyczną strukturą. Twardość jej jest na ogół niższa niż twardość rodzimego materiału, a grubość od kilku mikrometrów do kilku setnych części milimetra. Warstwa ta osiąga grubość około 15-30 μ m. Zawartość węgla może być zmieniona za pomocą nawęglania, pochodzącego z płynu spłukującego lub elektrody. W niektórych sytuacjach może wystąpić odwęglenie (rys. 4) [9].



Rys. 4. Warstwy mikrostruktury stali narzędziowej po elektrodrążeniu [9]

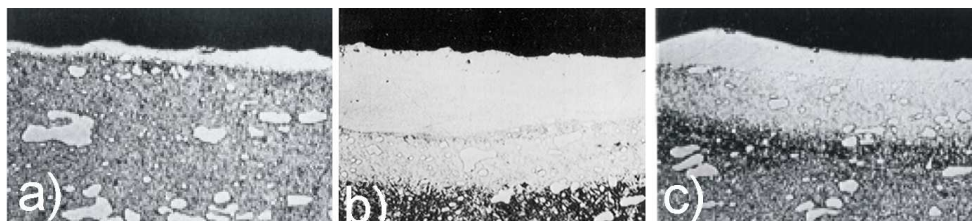
Drugą warstwą jest warstwa wpływów cieplnych mająca strukturę martenzytyczną. Charakteryzuje się większą twardością niż metal rodzimy i stąd często nazywana jest warstwą o podwyższonej twardości. Wzrost twardości spowodowany jest m.in. dyfuzją węgla powstałego z rozkładu dielektryka oraz bardzo dużą szybkością chłodzenia od temperatury hartowania (rys. 5).

Następna warstwa jest również wynikiem wpływów cieplnych. Przejęte ciepło przez materiał obrabiany powoduje odpuszczenie tej warstwy, a szybkość chłodzenia jest za mała, aby spowodować ponowne zahartowanie. Warstwa ta charakteryzuje się mniejszą twardością w stosunku do materiału rodzimego i nazywana jest warstwą odpuszczoną (pośrednią) [9, 10].



Rys. 5. Krzywa osiągniętych podczas erozji maksymalnych temperatur (według prostej normalnej na powierzchni) [11]

Struktura i właściwości warstwy wierzchniej jest związana z czasem trwania impulsu. Dłuższy czas sprzyja głębszemu wnikanu ciepła w materiał. Wyższe natężenie prądu tj. energia, wytwarza więcej ciepła na powierzchni, jednak to czas potrzebny na rozprzestrzenianie się ciepła wydaje się mieć tu największe znaczenie. Czynniki te uwzględnia również rodzaj zastosowanej elektrody (np. miedziana czy grafitowa) (rys. 6).



Rys. 6. Stal narzędziowa SVERKER 21 po drążeniu różnymi elektrodami a) miedzianą, $t_i = 10\mu s$, pow. 500x, b) miedziana $t_i = 200\mu s$, pow. 500x, c) grafitową, $t_i = 10\mu s$, pow. 500x [9]

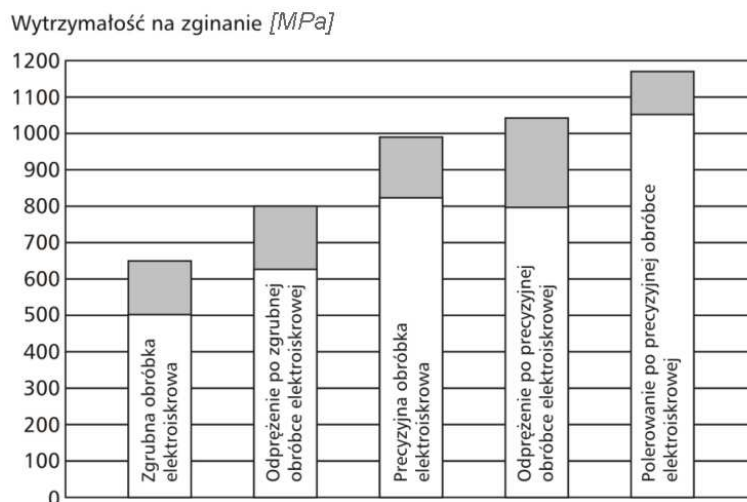
Jednocześnie np. w przypadku obróbki kompozytu aluminiowego zbrojonego SiC, warstwa wierzchnia ulega podczas obróbki wzbogaceniu w węgiel pochodzący z rozkładu dielektryka. Zawartość węgla na występkach nierówności powierzchni przewyższa zawartość węgla we wgłębieniach po wyerodowanym materiale [8].

W warstwie wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej obserwuje się naprężenia rozciągające, które maleją w miarę oddalania się od powierzchni i są wynikiem kurczenia się rozgrzanego materiału. Wraz ze wzrostem energii pojedynczych wyładowań oraz czasu ich trwania wzrasta wartość naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej. Obecność tych naprężeń jest przyczyną powstawania na powierzchni mikropęknięć, zwłaszcza przy obróbce zgrubnej (duże E_i i czasy trwania impulsów). Ze stanu warstwy wierzchniej wynikają właściwości użytkowe części obrabianych elektroerozyjnie, a mianowicie [12]:

- z powodu istnienia naprężeń rozciągających i możliwości wystąpienia mikropęknięć, wytrzymałość zmęczeniowa części zmniejsza się,
- jeśli innym sposobem obróbki zostanie usunięta warstwa biała (na ogół krucha), przedmiot będzie się charakteryzował zwiększoną odpornością na ścieranie,
- obserwuje się zwiększoną odporność części na korozję atmosferyczną, co jest związane z nasyceniem warstwy wierzchniej produktami pirolizy dielektryka. Jednak odporność na korozję gazową w podwyższonych temperaturach jest mniejsza niż po innych rodzajach obróbki.

Wymienione cechy warstwy wierzchniej i właściwości użytkowe części kierują dalszy dobór odpowiednich operacji w procesie technologicznym, zwłaszcza dla części bardzo odpowiedzialnych. Na przykład, dla łopatek turbin gazowych silników lotniczych niezbędna staje się obróbka elektrochemiczna w celu usunięcia uszkodzonej warstwy wierzchniej. Dla matryc, wykrojników itp. celowym może być docieranie powierzchni obrobionej.

Różne badania wskazują na wyraźne zwiększenie wytrzymałości na zginanie materiału polerowanego po obróbce elektroiskrowej w porównaniu z powierzchnią bez obróbki polerowaniem (rys. 7).



Rys. 7. Wytrzymałość na zginanie w różnych fazach obróbki elektroiskrowej dla różnych rodzajów obróbki dodatkowej. Materiał stal RIGOR o twardości 57HRC. Obszary zacienione pokazują rozrzut pomiarów [9]

Zjawiska dotyczące obróbki EDM dotyczą również obróbki drutem WEDM. Ze względu na występujące tu parametry warstwa powierzchniowa jest niewielka zwykle poniżej $10\mu\text{m}$ i porównuje się do precyzyjnej obróbki EDM. Stąd pęknięcia na obrabianej powierzchni nie powinny tu występować.

4. WNIOSKI

Jakość wytwarzania elementów za pomocą elektrodrażenia jest związana z wieloma czynnikami. Końcowe wyniki uwarunkowane są:

- parametrami elektrycznymi generatora;
 - właściwościami materiału, od których zależy obrabialność elektroerozyjna;
 - właściwościami materiału elektrody roboczej, od której może zależeć grubość zmienionej warstwy wierzchniej;
 - właściwościami dielektryka.
2. Przy ustalaniu parametrów roboczych obróbki należy uwzględnić:
 - prędkość usuwania materiału;
 - ostateczne wykończenie powierzchni;
 - zużycie elektrody;
 - wpływ na obrabiany materiał.
 3. Wytworzone zmiany struktury i powierzchni obrabianego materiału może w niekorzystnych okolicznościach obniżyć żywotność wykonywanego narzędzia.
 4. Zbyt długie impulsy prądu sięgające $200\mu\text{s}$ mogą doprowadzić do powierzchniowych pęknięć.
 5. Elektrodrażenie pozwala na obróbkę trudnoobrabialnych stali narzędziowych, szybko tnących, węglików spiekanych, diamentu.

6. Podstawową cechą elektrodrażarek jest wysoka dokładność obróbki $0,02\pm 0,001\text{mm}$, wysoka gładkość $R_a = 2,5\pm 0,5\mu\text{m}$, a zmiany w warstwie wierzchniej są nieznaczne (np. dla stali NC10 po cięciu zgrubnym grubość warstwy zmienionej jest mniejsza od $0,02\text{mm}$).

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Filipowski R., Marciniak M.: *Techniki obróbki mechanicznej i erozyjnej*, Politechnika Warszawska, Warszawa 2000.
- [2] Suchecki M.: *Fakturowanie powierzchni narzędzi formujących (form wtryskowych i rozdmuchowych) dla przetwórstwa tworzyw sztucznych*, – SUMARIS (Mold-Tech Standex Int. Poznań, 2005.
- [3] Perończyk J., Biało D.: *Wybrane problemy obróbki elektroerozyjnej kompozytów aluminiowych*. KOMPOZYTY, nr 1, 2001.
- [4] Agie Charmilles Group. Georg Fischer – Manufacturing Technology. *Dokumentacja techniczna Robofil 240 SL i CC*, 2002.
- [5] Filipowski R., Marciniak M.: *Techniki obróbki mechanicznej i erozyjnej*, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2000.
- [6] Dąbrowski L.: *Prace Naukowe Szkoły Naukowej Obróbek Erozyjnych*. Warszawa, WNT 2003.
- [7] Albiński K., Tomczak J.: *Ciecze dielektryczne do drążenia elektroerozyjnego*. Mechanik, nr 1, 1989.
- [8] Trzaska M., Perończyk J., Biało D.: *Wpływ parametrów elektrycznych obróbki elektroerozyjnej na stan powierzchni kompozytów aluminiowych*. KOMPOZYTY, nr 5, 2005.
- [9] *Obróbka elektroiskrowa stali narzędziowych*. Narzędziowiec, nr 3 2007.
- [10] *Internetowy podręcznik z obróbki elektroerozyjnej*. Politechnika Warszawska. www.meil.pw.edu.pl/~edm/
- [11] *Struktura i cechy powierzchni poddanych elektrodrażeniu*. CHARMILES TECHNOLOGIES. 1995.
- [12] Albiński K., Miernikiewicz A., Ruszaj A., Zimny J.: *Laboratorium obróbki erozyjnej*. Warszawa, WNT 1980.