

MAZURKIEWICZ Andrzej, BIELAK Stanisław

WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNE POWIERZCHNI ELEMENTÓW STAŁOWYCH PO OBRÓBCE ELEKTRODRAŻENIEM

Streszczenie

Elektrodrażenie jest ważną i nowoczesną technologią wytwarzania ze względu na możliwości obróbki różnych materiałów trudnoobrabialnych z wysoką dokładnością. W artykule, na przykładzie stali narzędziowej chromowej, przedstawiono czynniki wpływające na jakość eksploatacji, wytwarzanych tą technologią wyrobów, ze względu na możliwość powstawania zmian w warstwie wierzchniej. Zwrócono uwagę na stan materiału wyjściowego oraz zastosowane parametry technologiczne.

WSTĘP

Właściwości eksploatacyjne wyrobu uzależnione są od stanu warstwy wierzchniej po obróbce wytwarzającej i nadającej kształt końcowy. Aktualne wymagania dla wszystkich procesów wytwarzania nakazują uzyskanie: dużej wydajności, dużej dokładności obróbki i ściśle określonej budowy warstwy wierzchniej. Obróbka elektroerozyjna wykonywana na obrabiarkach nowej generacji jest w stanie spełnić te zadania. Tradycyjnymi metodami kształtowane elementy maszyn, urządzeń, narzędzi do obróbki plastycznej, form wtryskowych oraz kokili odlewniczych i narzędzi skrawających są zastępowane niekonwencjonalnymi metodami kształtowania materiałów. Zastosowanie obrabiarek elektroerozyjnych z pełnym sterowaniem numerycznym zapewnia powtarzalność procesu i powtarzalność wymiarów.

Czynnikami wpływającymi na coraz częstsze wykorzystywania elektrodrażarek są:

- wysoka dokładność;
- wzrost wydajności;
- zmniejszenie zużycia narzędzi;
- poprawa właściwości warstwy wierzchniej;
- obróbka nowych materiałów o specjalnych właściwościach;
- kształtowanie powierzchni o małej chropowatości R_a .
- obróbka elementów o małych wymiarach.
- skrócenie cyklu uruchamiania nowych wyrobów, narzędzi;
- zmniejszenie szkodliwego oddziaływania na środowisko.

Według danych firmy AgieCharmilles najczęściej wyrobów podanych technologii elektrodrażeniu było wykonanych ze stali, a produkowane narzędzia i elementy były z przeznaczeniem dla różnych gałęzi przemysłu, głównie wykrojniki 41%, formy i elektrody 23%, mikromechanika 12% [5].

Obróbkę elektroerozyjną stosuje się przede wszystkim do obróbki materiałów trudnoobrabialnych ze względu na ich właściwości mechaniczne związane ze strukturą metalograficzną, są to głównie: węgliki spiekane, stale narzędziowe i wysokostopowe, tytan, oraz przewodzące materiały kompozytowe.

1. ISTOTA PROCESU ELEKTRODRAŻENIA

Obróbka elektroerozyjna (*Electrical Discharge Machining* – EDM) to metoda kształtowania materiałów przewodzących prąd elektryczny przez usuwanie warstw zewnętrznych, w wyniku erozji elektrycznej, zachodzącej na skutek impulsowych wyładowań elektrycznych pomiędzy elektrodą roboczą – narzędziem i przedmiotem obrabianym, oddzielonych warstwą dielektryka [4].

Kształtowanie elektroerozyjne jest realizowane za pomocą elektrody roboczej i impulsów prądu elektrycznego. Impulsy prądu elektrycznego i przepływające między elektrodą roboczą i kształtowanym przedmiotem, spełniają rolę ostrza narzędzia jak obróbka skrawaniem.

W procesie obróbki elektroerozyjnej usuwanie materiału następuje przez zjawisko cieplne. Efekt tego wysoko temperaturowego zjawiska wpływa oczywiście na strukturę obrabianego materiału. Wpływ ten jest zależny od rodzaju materiału. Są materiały, które w ogóle nie ulegają żadnej zmianie struktury.

Zmiany strukturalne poddawane są gruntownym badaniom. Przy określonych zastosowaniach muszą być dokonywane pewne przedsięwzięcia dla możliwie największego ograniczenia tych zmian strukturalnych.

Wpływ obróbki elektroerozyjnej na obrabiany materiał jest zupełnie inny niż w przypadku tradycyjnych metod obróbki [3, 6].

Powierzchnia stali zostaje poddana oddziaływaniu wysokiej temperatury przekraczającej znacznie temperaturę topienia stali i osiąga wartości ponad 5000°C, co powoduje jej topienie lub parowanie, a to z kolei powoduje zmiany „wytrzymałości powierzchniowej” wyrobu. Czynnikiem odpowiedzialnym za „wytrzymałość powierzchniową” obrabianego wyrobu są: mikrostruktura, twardość, naprężenia, zawartość węgla.

Warstwa stopiona i utwardzona powstała podczas obróbki elektroerozyjnej jest również nazywana „warstwą białą”, bowiem nie następuje jej trawienie podczas przygotowania metalograficznego. W przypadku zwykłej obróbki zgrubnej warstwa ta posiada grubość około $15 \div 30 \mu\text{m}$.

W dalszej warstwie odpuszczonej, stal nie została nagrzana do temperatury hartowania i wystąpiło jedynie odpuszczenie. Występowanie tego efektu jest naturalnie mniejsze im bliżej rdzenia materiału [3, 7].

Grubości warstw wydają się być niezależne od gatunku stali oraz materiału użytego na elektrody. W przypadku materiału w stanie po wyżarzaniu warstwy są cieńsze, a pęknięć jest mniej. Krucha zahartowana warstwa jest prawie nieobecna.

W przypadku dłuższego czasu trwania impulsów ciepło wnika głębiej w materiał. Wyższe natężenie prądu wytwarza rzeczywiście „więcej ciepła” na powierzchni, jednakże to czas potrzebny na rozprzestrzenienie się ciepła ma tu największe znaczenie.

Wraz ze wzrostem czasu trwania impulsów może występować wzrost pęknięć w warstwie wierzchniej. Korzystne jest wykonanie wyżarzania przed elektrodrażeniem, które znacznie ogranicza występowanie pęknięć w materiale.

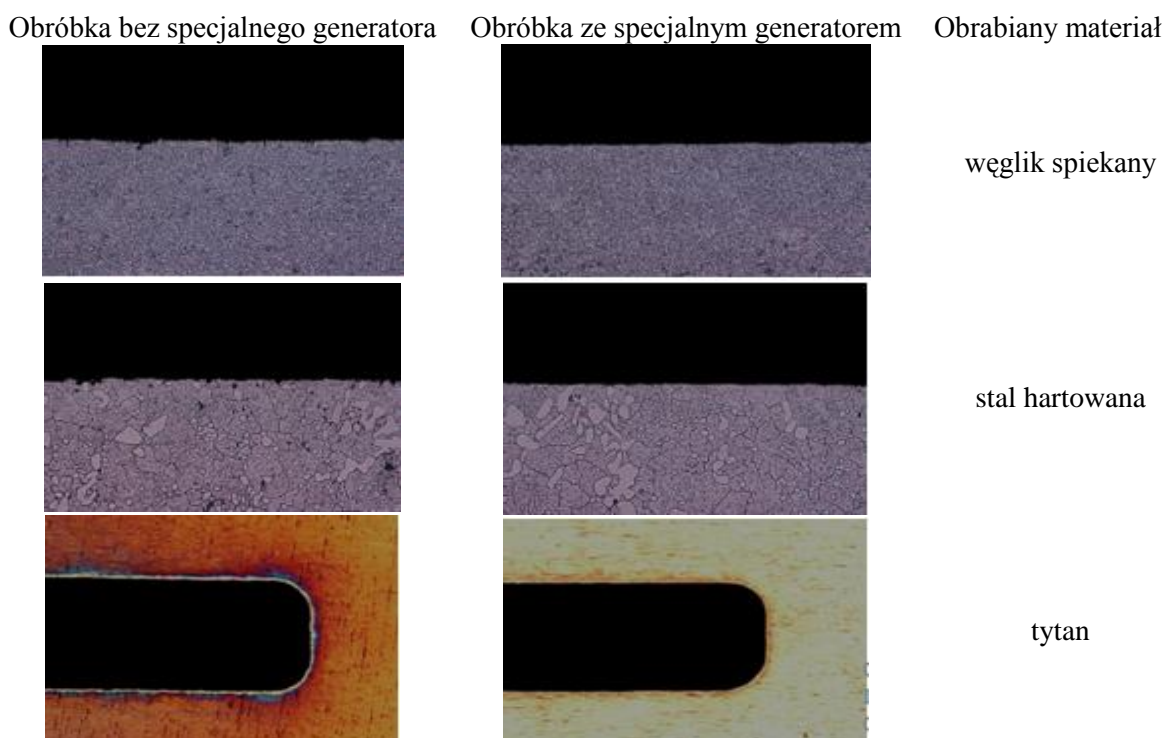
Większość gatunków obrabianych materiałów może wykazywać również zróżnicowaną twardość od powierzchni. Różnice twardości i objętości warstw powodują naprężenia, które, dochodzą do tej samej głębokości co warstwy powierzchniowe. Naprężenia te mogą zostać znacznie zmniejszone za pomocą dodatkowej obróbki cieplnej.

Jeżeli obróbka elektroerozyjna wraz z końcową fazą obróbki precyzyjnej są wykonywane poprawnie, to uszkodzenia powierzchni mogą być wyeliminowane.

Uwagi na temat powierzchni po obróbce elektrodowej są w większości prawdziwe dla procesu obróbki elektroiskrowej drutem. Obrabiana warstwa powierzchniowa jest jednakże stosunkowo cienka ($< 10 \mu\text{m}$) i może być porównywana do warstwy obrabianej za pomocą precyzyjnej obróbki elektroiskrowej. Zwykle na obrabianej powierzchni nie występują widoczne pęknięcia po obróbce elektroiskrowej drutem.

W niektórych przypadkach ryzyko pęknięcia może zostać zmniejszone, o ile zastosowana będzie odpowiednia technologia.

O jakości wytwarzanego wyrobu może również decydować rodzaj zastosowanej obrabiarki (rys. 1).



Rys. 1. Różne obrabiane materiały na drażkach posiadające generatory poprzedniej generacji i najnowszej, widoczna jakość powierzchni obrobionych materiałów [3, 5, 6]

Technologia dla stali (w powiązaniu z odpowiednim rodzajem generatora) ma za zadanie eliminować zmiany w warstwie wierzchniej obrabianego materiału. Wyroby obrobione na elektrodrażarkach z nowym generatorem mają zapewnioną większą trwałość, gdyż warstwa przekształcona jest bardzo cienka i praktycznie znika po przejściu zgrubnym i dwóch cięciach wykańczających, a uzyskana twardość powierzchni nie ulega zmianie. Przeprowadzone badania warstwy wierzchniej stali uwidaczniają wielkości białej warstwy w zależności od rodzaju obróbki, materiał ulega zniszczeniu do $10 \mu\text{m}$ podczas pierwszego przejścia otwierającego, a po czwartym przejściu wykańczającym zmieniona warstwa wierzchnia stali jest mniejsza od $1 \mu\text{m}$ [3].

2. BADANIE WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ WYRANEGO ELEMENTU ZE STALI WYSOKOSTOPOWEJ PO ELEKTRO DRAŻENIU

Do badań zastosowano stal X153CrMoV12 wg PN – EN ISO 4957: 2004 (tabela 1). Jest to materiał należący do najczęściej obrabianych tą technologią.

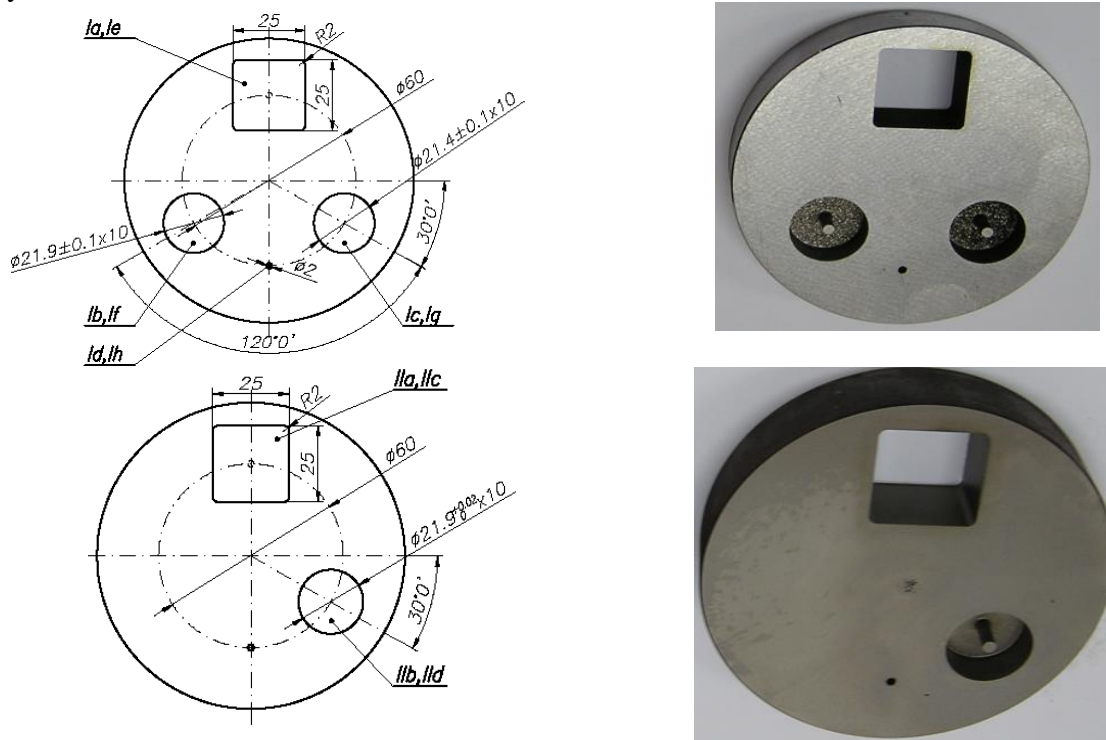
Tab. 1. Analiza spektralna składu chemicznego stali badanej stali, [%]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	W
1,5	0,28	0,25	0,013	0,012	10,6	0,24	0,68	0,17	0,012	0,9	0,07

Stal X153CrMoV12 jest ledeburytyczną, chromową stalą narzędziową do pracy na zimno o bardzo małych odkształceniach przy hartowaniu, bardzo dużej odporności na ścieranie, oraz odporna na uderzenia, dobrej ciągliwości i dzięki zawartości molibdenu i wanadu trwalsza od stali X210Cr12 z lepszymi właściwościami tnącymi.

W celu określenia wpływu elektrodrażenia na warstwę wierzchnią wybranego materiału zastosowano różne warianty procesu, stosując zarówno elektrodrażenie wgłębne oraz drutowe. Testowany materiał został obrobiony dwoma różnymi technologiami: jedna technologia opiera się na wycięciu jednym przejściem całego zaprogramowanego profilu z tak zwanym offsetem 0, druga technologia umożliwia zastosowanie wielu przejść z odpowiednimi offsetami, by osiągnąć żądany wymiar i klasę chropowatości na obrabianej powierzchni. Dodatkowo zastosowano materiał w różnym stanie wyjściowym, po wyżarzaniu zmiękczającym i po hartowaniu.

Dla zrealizowania postawionego zadania wykonano próbki o kształcie przedstawionym na rysunku 2.



Rys. 2. Rysunki próbek z zaznaczonymi procesami obróbkowymi i wielkościami wymiarowymi.

Procesy oznaczone I, to procesy wykonywane jednym przejściem o jednakowym nastawie prądowym generatora. Procesy oznaczone II, są procesami realizowanymi wieloma przejściami, nastawy prądowe generatora ulegają zmianie

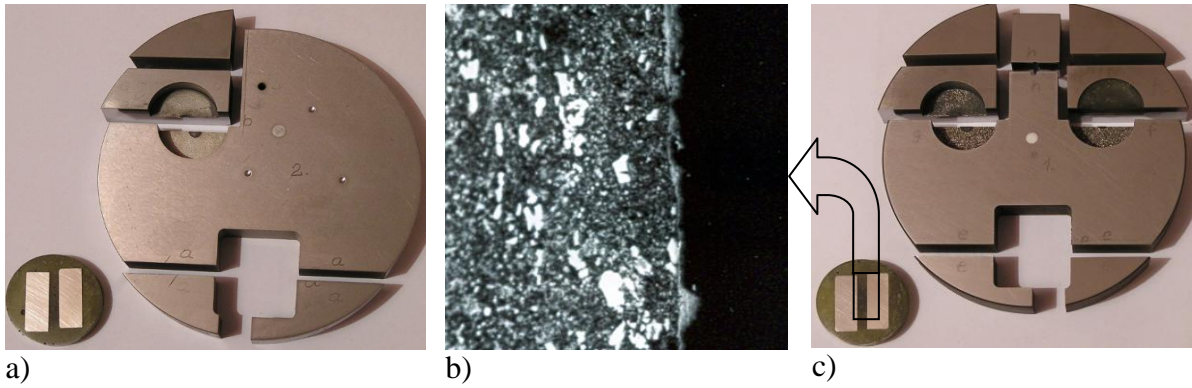
- Dla określenia wpływu różnej technologii wytwarzania, a w tym;
- sposobu elektrodrażenia, drutowego i elektrodowego;
 - ilości przejść elektroda;
 - stanu wyjściowego materiału;
- przeprowadzono badania próbek po testach przedstawionych w tabeli 2.

Tab. 2. Zestawienie zastosowanych w testach technologii elektrodrążenia

Oznaczenie na rysunku 1	Stan materiału	Obrabiarka (elektrodrążarka)	Rodzaj obróbki (procesu)	Założona klasa chropowatości <i>Ra</i>
Ia	zmiękczony	drutowa Robofil 240CC	jedno cięcie (jedno przejście drutem)	2.8 μm
Ib	zmiękczony	elektrodowa Roboform 30	drążenie od bazy 0 osią Z - 10 mm i orbitowanie osiami X i Y 0,5 mm, jeden nastaw generatora	11.2 μm
Ic	zmiękczony	elektrodowa Roboform 30	drążenie od bazy 0 osią Z - 10 mm, jeden nastaw generatora	11.2 μm
Id	zmiękczony	rurkowa HD30 CNC	drążenie od bazy 0 osią Z - 20 mm	
Ie	hartowany	drutowa Robofil 240CC	jedno cięcie (jedno przejście drutem)	2.8 μm
If	hartowany	elektrodowa Roboform 30	drążenie od bazy 0 osią Z - 10 mm i orbitowanie osiami X i Y 0,5 mm, jeden nastaw generatora	11.2 μm
Ig	hartowany	elektrodowa Roboform 30	drążenie od bazy 0 osią Z - 10 mm, jeden nastaw generatora	11.2 μm
Ih	hartowany	rurkowa HD30 CNC	drążenie od bazy 0 osią Z - 20 mm	
IIa	zmiękczony	drutowa Robofil 240CC	pięć przejść (cięcie otwierające i pozostałe w celu uzyskania kształtu i chropowatości)	0.28 μm
IIb	zmiękczony	elektrodowa Roboform 30	drążenie od bazy 0 osią Z - 10 mm i orbitowanie osiami X i Y 0,5 mm, wieloma nastawami generatora w celu uzyskania klasy chropowatości i wymiaru	0,8 μm
IIc	hartowany	Drutowa Robofil 240CC	pięć przejść (cięcie otwierające i pozostałe w celu uzyskania kształtu i chropowatości)	0.28 μm
IId	hartowany	elektrodowa Roboform 30	drążenie od bazy 0 osią Z - 10 mm i orbitowanie osiami X i Y 0,5 mm, wieloma nastawami generatora w celu uzyskania klasy chropowatości i wymiaru	0,8 μm

Do przeprowadzenia badań metalograficznych detale z testu zostały poprzecinane w sposób umożliwiający analizę wglębną struktury powierzchni (rys. 3).

Poniżej, ze względu na ograniczoną objętość publikacji, przedstawiono wybrane wyniki badań wykonanych tych testów, które wykazywały wyraźne zmiany właściwości warstwy wierzchniej.



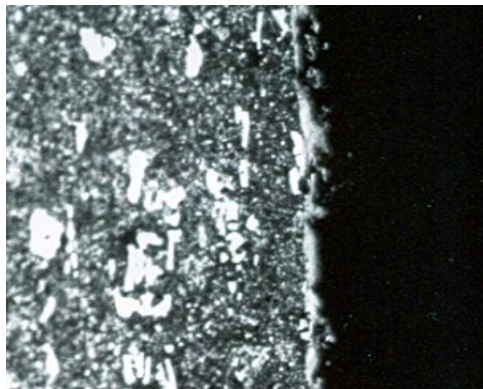
Rys. 3. Przygotowanie drążonych próbek do badań; a i c) przecięte i zainkludowane próbki do wykonania zglądów metalograficznych; c) oznaczone miejsce badania struktury i pomiaru mikrotwardości; b) struktura widziana na mikroskopie metalograficznym

Proces Ia (tabela 2) – wycięcie kwadratu o wym. 25x25 mm wykonane na elektrodrażarce drutowej jednym przejściem według założonej technologii dla drążenia stali; Wyniki pomiaru długościowego i chropowatości z opisanego procesu zestawione w tabeli 3.

Tab. 3. Uzyskane parametry wymiarowe z procesu Ia

Odległość od bazy 0, mm	Wymiar zmierzony, mm	Różnica od nominalu, mm	Klasa chropowatości osiągnięta Ra	Rodzaj krawędzi
-2	25,00392	+0,00392	3,0965 μm	Minimalne zaokrągleni ~ 0.013 mm
-10	25,01024	+0,01024		
-18	25,01537	+0,01537		

Wyniki badania struktury (rys 4) i pomiaru twardości (tabela 4) przedstawiono poniżej.



Rys. 4. Struktura drążonej krawędzi z widocznymi licznymi nierównościami krawędzi i z niewielką ilością zmienionej struktury, tak zwaną białą warstwą (trawiono nital 8 s, powiększeniu 200x)

Tab. 4. Pomiar twardości metodą Vickersa

Próba twardości HV 0.2	183	303	321	319
Odległość od krawędzi	0,05 mm	0,1 mm	0,12 mm	0,2 mm

Proces Ic (tabela 2) – wydrążenie otworu nieprzelotowego elektrodą miedzianą na drażarce wgłębnej. Założenia konstrukcyjne: średnica otworu 21,4±0.1 mm, głębokość otworu 10 mm.

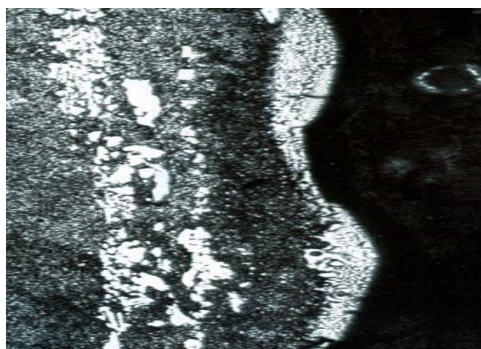
Założenia technologiczne: elektroda miedziana z płukaniem przez otwór w elektrodzie, średnica elektrody 21,24⁰_{-0,01}, dla klasy chropowatości otworu $Ra = 11,2 \mu\text{m}$, nastaw

prądowy E414 przeskok iskrowy 180 μm . Wyniki pomiaru długości i chropowatości opisanego procesu zestawione w tabeli 5.

Tab. 5. Uzyskane parametry wymiarowe z procesu Ic

Odległość od bazy 0, mm	Wymiar zmierzony, mm	Różnica od nominalu, mm	Klasa chropowatości osiągnięta Ra	Rodzaj krawędzi (rys.7.21)
-1	21,66157	+0,26157	11,29 μm	Zmiana wymiaru od powierzchni czołowej w głąb o 0,22 mm i zaokrąglenie
-6	21,72896	+0,32896		

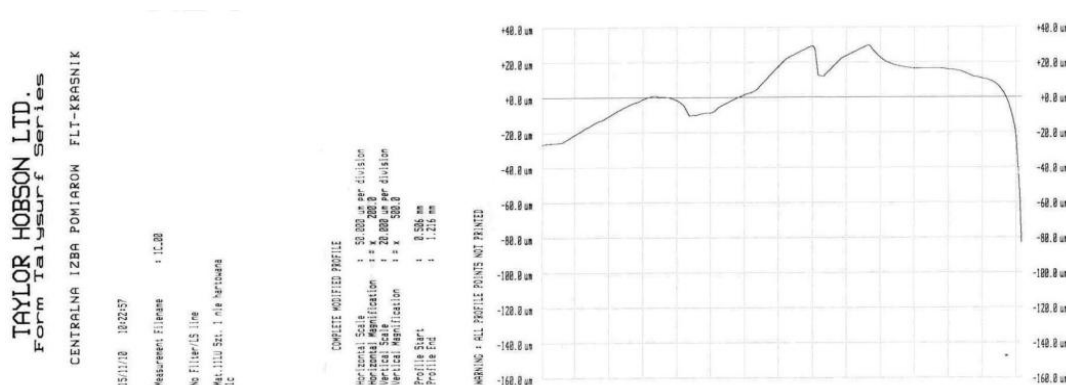
Wyniki badania struktury (rys. 5) i pomiaru twardości (tabela 6), profilu powierzchni (rys. 6) przedstawiono poniżej.



Rys. 5. Krawędź z widoczną zmianą struktury na całym obwodzie otworu w wyniku dużego prądu elektrodrażenia oraz liczne mikropęknięcia zmienionej struktury (białej warstwy) wielkość zmian zależna od wielkości przeskoku iskier (trawiono nitałem 8 s, powiększeniu 200x)

Tab. 6. Pomiar twardości metodą Vickersa

Próba twardości HV 0.2	1027	644	566	498	453	335	303	293
Odległość od krawędzi, mm	0,02	0,025	0,035	0,04	0,055	0,065	0,12	0,23



Rys. 6. Wykres wykonany na profilometrze pokazujący nierówności struktury oraz zaokrąglenie krawędzi wierzchniej (przypalenie) po elektrodrażeniu w procesie Ic

Proces IIa (tabela 2) – wycięcie kwadratu o wymiar 25x25 mm wykonane na elektrodrażarce drutowej w pięciu przejściach, według założonej technologii dla drażenia stali: nastawy i offsety wg tabeli 7, klasa chropowatości $Ra = 0,28 \mu\text{m}$, technologia dla drutu miedzianego nie pokrywanego średnicy 0,25 mm, wytrzymałości 500 N/mm², typ LS 25A. Wyniki pomiaru długości i chropowatości opisanego procesu zestawiono w tabeli 8.

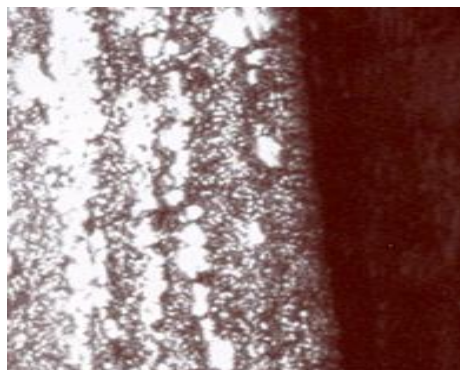
Tab. 7. Nastawy generatora i offsety

Nastaw	E2	E7	E8	E23	E24
Offset	0,234	0,157	0,143	0,136	0,132

Tab. 8. Uzyskane parametry wymiarowe z procesu IIa

Odległość od bazy 0, mm	Wymiar zmierzony, mm	Różnica od nominalu, mm	Klasa chropowatości osiągnięta Ra	Rodzaj krawędzi
-2	24,9965	-0,0035	0,378 μm	Ostra krawędź
-10	24,99881	-0,00119		
-18	25,00156	+0,00156		

Wyniki badania struktury przedstawia rysunek 7.

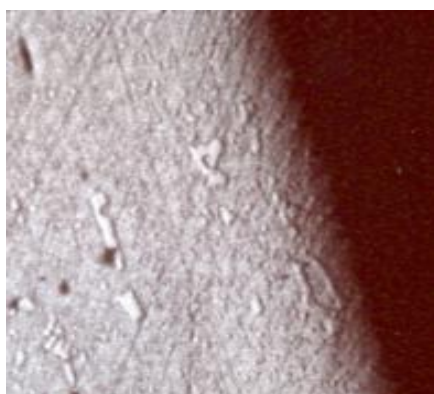
**Rys. 7.** Struktura drążonej krawędzi. Widoczne nieliczne nierówności wynikające z klasy chropowatości, niewidoczna zmiana struktury (trawiono nitalem 8 s, powiększeniu 200x)

Proces IIc (tabela 2) – wycięcie kwadratu o wym. 25x25 mm wykonane na elektrodrążarce drutowej w pięciu przejściach według założonej technologii dla drążenia stali: nastawy i offsety wg tabeli 7, klasa chropowatości $Ra = 0,28 \mu\text{m}$, technologia dla drutu mosiężnego nie pokrywanego średnicy 0,25 mm, wytrzymałości 500 N/mm², typ LS 25A. Wyniki pomiaru długościowego i chropowatości z opisanego procesu zestawione w tabeli 9.

Tab. 9. Uzyskane parametry wymiarowe z procesu IIc

Odległość od bazy, mm	Wymiar zmierzony, mm	Różnica od nominalu, mm	Klasa chropowatości osiągnięta Ra	Rodzaj krawędzi
-2	24,99666	+0,00334	0,439 μm	Ostra krawędź
-10	24,99829	-0,00171		
-18	25,0011	+0,0011		

Wyniki badania struktury (rys 8) i pomiaru twardości (tabela 10) przedstawiono poniżej.

**Rys. 8.** Struktura drążonej krawędzi z widocznymi nielicznymi nierównościami wynikającymi z klasy chropowatości, niewidoczna zmiana struktury (trawiono nitalem 20 s, powiększeniu 200x)**Tab. 10.** Pomiar twardości metodą Vickersa

Próba twardości HV 0.2	818	874	874	874
Odległość od krawędzi	0.025 mm	0.04 mm	0.055 mm	0.07 mm

PODSUMOWANIE

1. Detale w stanie zmiękczone wykonane na drążarce drutowej jednym przejściem, sprzyjają w warunkach produkcyjnych otrzymaniu klasy chropowatości obrobionej powierzchni rzędu $Ra = 3 \mu\text{m}$ i zaokrąglonej krawędzi (proces Ia). Należy zwrócić uwagę na zmianę wymiaru na wysokości obróbki $+0,015\text{mm}$, oraz niewielką zmianę w warstwie wierzchniej z utworzeniem „białej warstwy”, o czym świadczy zmiana twardości w głąb tej warstwy.
2. Detale w stanie zmiękczone wykonane na drążarce drutowej wieloma przejściami mają zapewnioną w warunkach produkcyjnych klasę chropowatości obrobionej powierzchni $Ra = 0,3 \mu\text{m}$, ostrą krawędź naroża, zachowaną twardość oraz przy wysokości detalu 20 mm dokładność wykonania 0,004 mm (proces IIa). Wyroby tak wytwarzane, przy wysokich wymaganiach jakościowych nie będą wymagały dodatkowej obróbki.
3. Wydrążenie otworu w detalach w stanie zmiękczone elektrodą miedzianą od bazy 0 osią Z i orbitowanie osiami X i Y służy uzyskaniu wymiaru i klasy chropowatości $Ra \sim 12 \mu\text{m}$ (proces Ic). Powstaje znaczna zmiana warstwy wierzchniej w postaci bardzo twardej i kruchej warstwy wierzchniej i przejściowej odpuszczonej w materiale hartowanym, ze zmianą wymiaru od powierzchni czołowej w głąb o 0,22 mm. Metoda ta nie powinna być zalecana do dokładnego wytwarzania wyrobów wykonanych z testowanego materiału.
4. Detale wykonane na drążarce drutowej wieloma przejściami dla materiałów po hartowaniu mają zapewnioną w warunkach produkcyjnych klasę chropowatości obrobionej powierzchni $Ra = 0,43 \mu\text{m}$ (proces IIc). Posiadają ostrą krawędź naroża i zachowaną twardość w głąb warstwy, przy wysokości detalu 20 mm wysoką dokładność wykonania. Wyroby tak wytwarzane, przy wysokich wymaganiach jakościowych nie będą wymagały dodatkowej obróbki.

BIBLIOGRAFIA

1. AgieCharmilles Group. Georg Fischer – Manufacturing Technology: Dokumentacja techniczna Roboform, 1996.DTR.
2. AgieCharmilles Group. Georg Fischer – Manufacturing Technology: Dokumentacja techniczna Robofil CC, 2006.DTR.
3. Kowalec A., Doskonalenie możliwości wytwórczych obrabiarek erozyjnych. Mechanik, 2010, nr 4.
4. Mazurkiewicz A., Technologie Specjalne Kształtowania Materiałów. Wyd. II popr. PR, Radom 2009.
5. Nowości GF AgieCharmilles. Mechanik, nr 1, 2010.
6. Oczóś K. E., Dobrowolski L., Forum obrabiarek erozyjnych – przykłady nowych rozwiązań. Mechanik, 2008 nr 1.
7. Uddeholm Tooling AB. Obróbka elektroiskrowa stali narzędziowych. Narzędziowiec 2007, nr 3.

OPERATING CHARACTERISTICS OF THE SURFACE TREATMENT OF STEEL EDM

Abstract

Electrical discharge is an important and modern production technology, the potential treatment of a variety of difficult materials with high accuracy. The article uses example of chromium alloy tool steel, showing the factors affecting the quality of the operation of this technology products produced due to the potential for changes in the surface layer. Attention is paid to the state of the starting material and technological parameters used.

Autorzy:

dr inż. **Andrzej Mazurkiewicz** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu
inż. **Stanisław Bielak** – Fabryka Łożysk Toczących – Kraśnik S.A.