

Wpływ dielektryka na cechy strukturalne i morfologiczne stali austenitycznej po obróbce elektroerozyjnej

The effect of dielectric liquid type on the structural and morphological characteristics of austenitic steel after electric discharge machining

AGNIESZKA ŻYRA
SEBASTIAN SKOCZYPIEC*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.1.2

Stal austenityczna X5CrNi 1810 znajduje szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Ze względu na bardzo dobre własności zarówno fizyczne, jak i mechaniczne należy do materiałów trudno obrabialnych konwencjonalnymi metodami. Dlatego w przypadku obróbki skomplikowanych kształtów czy elementów cienkościennych alternatywą są metody niekonwencjonalne, a zwłaszcza obróbka elektroerozyjna. W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu rodzaju wykorzystanego do obróbki elektroerozyjnej dielektryka na cechy strukturalne i morfologiczne stali austenitycznej X5CrNi 1810. Przeprowadzono badania porównawcze chropowatości i mikro twardości powierzchni po obróbce elektroerozyjnej w wodzie dejonizowanej i dielektryku węglowodorowym. Przenalizowano również stan obrobionych powierzchni i zmianę ich składu chemicznego po próbie korozyjnej. **SŁOWA KLUCZOWE:** obróbka elektroerozyjna, warstwa wierzchnia, X5CrNi 1810

Austenitic steel X5CrNi 1810 is widely used in different branches of industry. Due to the very good physical and mechanical properties, this material is classified as hard-to machine by conventional machining techniques. Therefore, while machining complicated shapes or thin-walled elements, unconventional machining methods are the alternative, especially electric discharge machining. In the paper the effect of dielectric liquid type to the structural and morphological characteristics of X5CrNi 1810 austenitic steel was presented. The research consisted of an investigation of roughness and micro hardness of the surface layer after electric discharge machining in water and kerosene based dielectric respectively. Based on the SEM images and EDS measurements the qualitative analysis of the surface layer quality after machining and corrosion test was carried out.

KEYWORDS: electrodischarge machining surface layer, X5CrNi 1810

Stal X5CrNi 1810 należy do grupy powszechnie stosowanych kwasoodpornych stali austenitycznych. Z powodu bardzo dobrych własności fizycznych, magnetycznych, termicznych i mechanicznych jest powszechnie wykorzystywana w przemyśle motoryzacyjnym, chemicznym, spożywczym, przetwórczym, maszynowym oraz w budownictwie, energetyce, lotnictwie i medycynie. Materiał ten trudno jest obrabiać konwencjonalnymi metodami, takimi jak skrawanie. Ze względu na wysoką wytrzymałość stali i jej ciągliwość, a przez to szczerpienie się wiórów z narzędziem podczas obróbki, dochodzi do szybkiego zużywania się ostrza skrawającego. Ponadto niska przewodność cieplna prowadzi do gwałtownego wzrostu temperatury na styku narzędzie–przedmiot obrabiany i zmniejsza trwałość ostrza. Alternatywą dla obróbki skrawaniem mogą być metody niekonwencjonalne, zwłaszcza obróbka elektroerozyjna (EDM), stosowana do wszystkich materiałów przewodzących prąd elektryczny [3]. Ponieważ umożliwia ona otrzymywanie skomplikowanych kształtów czy struktur cienkościennych i jest stosunkowo tania, stała się jedną z najpopularniejszych niekonwencjonalnych metod obróbki [1, 4].

Niezwykle istotne ze względu na przeznaczenie obrabianych elementów są właściwości technologiczne warstwy wierzchniej. Kształtują je parametry technologiczne procesu usuwania materiału, tj. amplituda natężenia prądu oraz czas impulsu [5÷7]. Do czynników mających wpływ na cechy warstwy wierzchniej po EDM należy użyta ciecz robocza, od której zależy stabilność procesu, dokładność obróbki oraz jakość otrzymywanej powierzchni [2, 3]. Celem przeprowadzonych badań było pokazanie różnic w cechach strukturalnych i morfologicznych stali X5CrNi 1810 po obróbce EDM w dwóch najczęściej wykorzystywanych dielektrykach: wodnym (woda dejonizowana) i węglowodorowym (Exxsol D80). Zakres przeprowadzonych badań obejmował wyznaczenie mikro twardości i chropowatości powierzchni po obróbce oraz określenie na podstawie zdjęć SEM wpływu korozji na stan i zmianę składu chemicznego obrobionych powierzchni.

Wpływ dielektryka na właściwości warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej

Główną zaletą niekonwencjonalnych metod obróbki, takich jak EDM, jest możliwość kształtowania materiałów przewodzących prąd elektryczny niezależnie od ich składu chemicznego i własności mechanicznych. W EDM naddatek usuwany jest w wyniku zjawisk towarzyszących wyładowaniom elektrycznym (parowania, topienia i rozrywania materiału) w obszarze pomiędzy przedmiotem obrabianym a elektrodą roboczą. Elektroda robocza i przedmiot obrabiany są podłączone do generatora impulsów napięcia elektrycznego, a obszar między nimi jest wypełniony dielektrykiem. Termiczny charakter usuwania naddatku powoduje powstawanie strefy wpływów cieplnych na powierzchni przedmiotu obrabianego elektroerozyjnie. Składa się ona z:

- **warstwy białej** (o grubości w zakresie 1÷40 μm) – powstaje ona z przetopionego materiału, który nie został usunięty z powierzchni i ponownie zakrzepł. Oprócz rodzimego materiału znajdują się tu fragmenty materiału elektrody roboczej oraz produkty powstałe z pirolizy dielektryka. Warstwa biała charakteryzuje się drobnoziarnistą strukturą dendrytyczną i jest zazwyczaj mniej twarda niż materiał rodzimy;
- **warstwy wpływów** cieplnych (o grubości do 200 μm) – charakteryzuje się ona strukturą martenzytyczną i jest twardsza niż metal rodzimy. Wzrost twardości tej warstwy ma związek z dużą prędkością chłodzenia oraz rodzajem dielektryka;
- **warstwy odpuszczonej** (o grubości do 200 μm) – szybkość jej chłodzenia jest zbyt mała, aby spowodować ponowne hartowanie, dlatego jest ona mniej twarda niż materiał rodzimy.

Charakter zmian właściwości technologicznej warstwy wierzchniej po EDM jest związany z przyjętymi parametrami technologicznymi (do najważniejszych należy zaliczyć czas impulsu, napięcie wyładowania oraz amplitudę natężenia prądu, które określają energię wyładowania) i rodzajem zastosowanego dielektryka.

Wpływ dielektryka na właściwości warstwy wierzchniej jest związany z jego cechami fizycznymi, od których zależy spełnienie następujących funkcji [2]:

- umożliwienie zachodzenia wyładowań elektrycznych,
- wygaszenie łuku elektrycznego oraz schłodzenie i zestalenie odparowanego lub przetopionego materiału,

* Mgr inż. Agnieszka Żyra (agazyra@gmail.com), dr hab. inż. Sebastian Skoczy piec (skoczy piec@mech.pk.edu.pl) – Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Krakowskiej

- usunięcie produktów erozji ze strefy obróbki,
- rozproszenie ciepła z przedmiotu i elektrody roboczej.

W obróbce elektroerozyjnej najczęściej wykorzystuje się dielektryki węglowodorowe i wodne.

Ze względu na niewielką lepkość, która ułatwia przepłukiwanie obszaru wyładowania, najwcześniej zaczęto stosować do tego celu **dielektryki węglowodorowe** i są one najpopularniejsze. Charakteryzuje je jednak stosunkowo niski próg zapłonu, niska temperatura parowania (szybko przechodzą w stan lotny), a ich opary (tj. CO i CH₄) są szkodliwe. Powstające w trakcie wyładowania pary – składające się z policyklicznych aromatycznych węglowodorów, benzenu, aerozoli mineralnych i innych produktów ubocznych – dyfundują w głąb warstwy białej, tworząc wtrącenia węglkowe (Fe₃C). Wpływa to na przebieg kolejnych operacji technologicznych – podczas obróbki cieplnej wzrasta nawęglenie warstwy wierzchniej, a wzdłuż granic ziaren propagują liczne mikropęknięcia [2].

Dielektryki wodne (najczęściej woda dejonizowana, ewentualnie z domieszką, np. gliceryny, glikolu etylenowego, glikolu polietylenowego, glukozy czy sacharozy) są znacznie bardziej stabilne termicznie (mają ośmiokrotnie wyższą energię parowania i niższą temperaturę wrzenia), co przekłada się na możliwość uzyskania dużo wyższej energii wyładowania. Dlatego obróbka w dielektrykach wodnych charakteryzuje się większą wydajnością, mniejszym zużyciem elektrody roboczej (zwłaszcza przy wysokiej energii wyładowania). Z drugiej jednak strony dokładność kształtowania z ich użyciem jest niższa. Po EDM w wodzie dejonizowanej chropowatość powierzchni jest niższa, a w warstwie wierzchniej obserwuje się mniejszą liczbę mikropęknięć. Poza tym dodatkowa obróbka cieplna nie powoduje dalszej propagacji mikropęknięć, jednak obserwuje się utlenianie materiału [2]. Niewątpliwą zaletą dielektryków wodnych jest również znacznie mniejsze zanieczyszczenie środowiska naturalnego oraz brak negatywnego oddziaływania na organizm człowieka. Właściwości dielektryków wodnych są trudne do ustabilizowania (z czasem tracą one cechy izolacyjne), dlatego stosowane są najczęściej podczas wycinania elektroerozyjnego (ze względu na obniżenie ryzyka pożarowego).

Metodyka badań

Celem badań doświadczalnych było określenie wpływu zastosowanego dielektryka na wybrane cechy strukturalne i morfologiczne stali austenitycznej X5CrNi 1810. W próbach wykorzystano dielektryk węglowodorowy Exxsol D80 oraz wodę dejonizowaną przy trzech różnych wartościach amplitudy natężenia prądu. Badania przeprowadzono w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Krakowskiej, na stanowisku badawczym wyposażonym w generator elektroerozyjny BP 95 produkcji ZAP B.P. Końskie–Kutno [8]. Warunki obróbki przedstawiono w tabl. I. Na obrabianych powierzchniach:

- zmierzono chropowatość za pomocą profilometru warsztatowego Taylor Hobson Surtronic 25 (długość odcinka pomiarowego: 0,8 mm),

TABLICA I. Warunki przeprowadzenia prób obróbki elektroerozyjnej

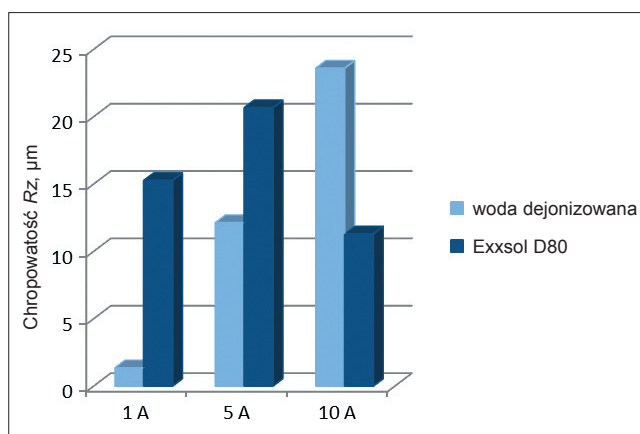
Dielektryk	woda dejonizowana	Exxsol D80
Czas impulsu	100 μs	
Czas przerwy	10 μs	
Amplituda natężenia prądu	1 A, 5 A, 10 A	
Elektroda robocza	walcowa elektroda miedziana Ø 10,84 mm	walcowa elektroda miedziana Ø 4,44 mm
Biegunowość elektrody i materiału obrabianego	biegunowość prosta	

- zmierzono mikrotwardość metodą Vickersa z użyciem mikrotwardościomierza firmy Innovatest (obciążenie: 0,5 N; czas działania: 10 s),
- w celu identyfikacji zmian struktury i składu chemicznego warstwy wierzchniej wykonano zdjęcia powierzchni skaninowym mikroskopem elektronowym JSM 5510 LV,
- z wykorzystaniem przystawki EDS oznaczono zmiany składu chemicznego w obszarach poddawanych analizie (przyjęto metodę jakościową, która umożliwiła jedynie stwierdzenie występowania poszczególnych pierwiastków w badanym obszarze),
- przeprowadzono uproszczoną próbę odporności na korozję (próbki umieszczono w 65-procentowym roztworze kwasu azotowego V w temperaturze 22 °C na 14 dni; po upływie tego czasu powtórnie wykonano zdjęcia SEM oraz dokonano analizy jakościowej EDS – rentgenowskiej spektroskopii energodispersyjnej – badanych próbek).

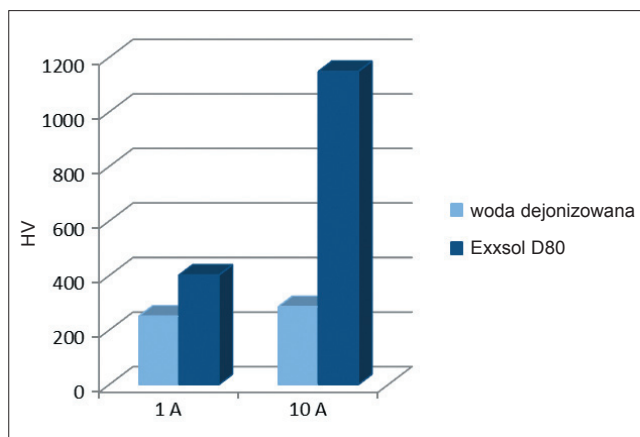
Analiza wyników

Z przedstawionych na rys. 1. wyników pomiarów chropowatości (Rz) analizowanych powierzchni wynika, że wraz ze wzrostem amplitudy natężenia prądu:

- obróbka w wodzie dejonizowanej prowadzi do równomiernego wzrostu chropowatości,
- obróbka w dielektryku węglowodorowym przy amplitudzie natężenia prądu $I = 10$ A powoduje spadek chropowatości.



Rys. 1. Wpływ amplitudy na wartość chropowatości w wyniku obróbki EDM



Rys. 2. Wpływ amplitudy natężenia prądu i rodzaju użytego dielektryka na mikrotwardość HV

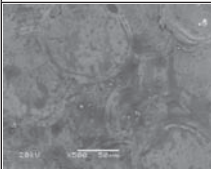
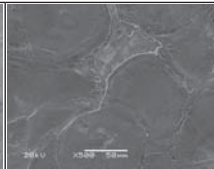
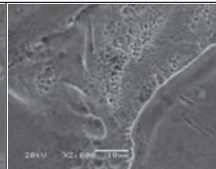
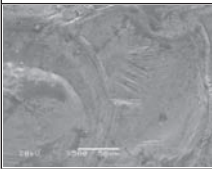
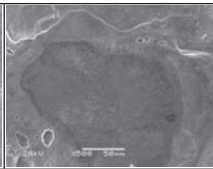
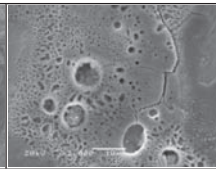
Zastosowanie wody dejonizowanej pozwala na uzyskanie znacznie wyższej energii pojedynczego wyładowania, która określa ilość materiału usuniętego w pojedynczym wyładowaniu. Wyższa energia wyładowania to większe rozmiary krateru erozyjnego, a tym samym wyższa chropowatość. W trakcie prób zaobserwowano również, że przy $I = 10$ A obróbka w wodzie dejonizowanej jest stabilniejsza.

Rodzaj cieczy roboczej ma również wpływ na mikrotwardość warstwy wierzchniej (rys. 2). Twardość powierzchni po EDM w dielektryku węglowodorowym jest wyższa i wzrasta wielokrotnie wraz z amplitudą natężenia prądu (z ok. HV 400 dla $I = 1$ A do HV 1150 dla $I = 10$ A). W warstwie wierzchniej materiału obrobionego z zastosowaniem dielektryka węglowodorowego ukonstytuowała się strefa wpływów ciepła o zwiększonej twardości w stosunku do materiału rodzimego. Natomiast po obróbce w wodzie dejonizowanej bez względu na zastosowaną amplitudę natężenia prądu mikrotwardość mieści się w granicach HV 250÷300 i jej wzrost jest pomijalny (mikrotwardość powierzchni odniesienia: HV 231).

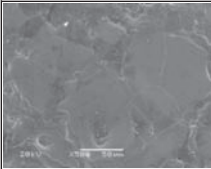
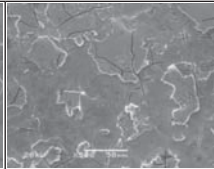
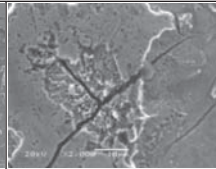
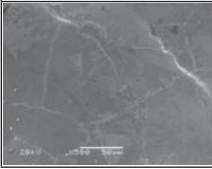
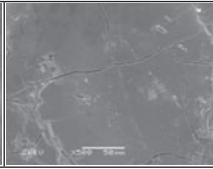
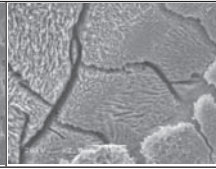
W tabl. II i III zestawiono zdjęcia mikroskopowe powierzchni po EDM oraz po próbie korozyjnej z zastosowaniem wody dejonizowanej (tabl. III) oraz dielektryka węglowodorowego (Exxsol D80). Analiza tych zdjęć prowadzi do następujących wniosków na temat technologicznej warstwy wierzchniej:

- wraz ze wzrostem amplitudy natężenia prądu obserwuje się rozrost ziaren austenitu oraz wzrost średniej średnicy kraterów wyładowczych,
- w przypadku obróbki w dielektryku węglowodorowym wraz ze wzrostem amplitudy natężenia prądu obserwuje się wzrost liczby i głębokości mikropęknięć (efekt ten nie występuje w wodzie dejonizowanej).

TABLICA II. Zestawienie zdjęć mikroskopowych powierzchni po EDM w wodzie dejonizowanej

EDM	EDM po próbie korozyjnej	
Powiększenie ×500	Powiększenie ×500	Powiększenie ×2000
$I = 1$ A		
		
$I = 10$ A		
		

TABLICA III. Zestawienie zdjęć mikroskopowych powierzchni po EDM w dielektryku węglowodorowym Exxsol D80

EDM	EDM po próbie korozyjnej	
Powiększenie ×500	Powiększenie ×500	Powiększenie ×2000
$I = 1$ A		
		
$I = 10$ A		
		

Poddanie próbek oddziaływaniom korozyjnym prowadzi do zwiększenia ilości wydzielenń tlenkowych na granicach ziaren i w obrębie kraterów oraz do pojawiania się wżerów korozyjnych (intensywność rozprzestrzeniania się wżerów korozyjnych w głąb kraterów zależy od amplitudy natężenia prądu). Warto również podkreślić, że na powierzchni po EDM

w dielektryku węglowodorowym obserwuje się dodatkowo zintensyfikowanie procesów korozyjnych w obrębie szczelin i mikropęknięć.

Na podstawie przeprowadzonej analizy EDS (tabl. IV) można stwierdzić, że skład chemiczny w warstwie wierzchniej ulega zmianie w stosunku do materiału rodzimego. Na wszystkich obrobionych powierzchniach zaobserwowano m.in. obecność śladowych ilości miedzi, co ma związek z zastosowaniem elektrody miedzianej. Miedź pod wpływem wysokiej temperatury podczas obróbki przenika do warstwy wierzchniej obrabianego materiału. Dodatkowo poddanie próbek działaniu środowiska silnie korozyjnego powoduje wyraźny wzrost zawartości tlenu, co wskazuje na utlenianie powierzchni. Warto jednak podkreślić, że badanie EDS służy przede wszystkim do jakościowej oceny składu próbek, stąd tak duże różnice w zawartościach procentowych poszczególnych pierwiastków po obróbce EDM i po próbie korozyjnej. Aby dokładniej określić skład warstwy wierzchniej, należałoby przeprowadzić dalsze badania, np. metodą ilościową WDS.

TABLICA IV. Wyniki analizy EDS: zawartość (w %) poszczególnych pierwiastków w próbce odniesienia i próbkach po obróbce EDM ($I = 10$ A) w wodzie dejonizowanej oraz po próbie korozyjnej

Pierwiastek	Próbka odniesienia	EDM	EDM po próbie korozyjnej
O	2,2	10,5	30,1
Cr	19,3	15,5	31,3
Fe	70,3	65,3	33,0
Ni	7,8	6,9	2,9
Cu	0	1,3	0,7

Podsumowanie

Przedstawiono wyniki badań określających wpływ rodzaju wykorzystywanego podczas obróbki elektroerozyjnej dielektryka na cechy strukturalne i morfologiczne warstwy wierzchniej stali austenitycznej X5CrNi 1810. Wskazują one jednoznacznie, że przy tych samych parametrach technologicznych obróbka elektroerozyjna prowadzona w środowisku dielektryka wodnego umożliwia otrzymanie powierzchni o mniejszej chropowatości i mikrotwardości oraz bez mikropęknięć w porównaniu z obróbką z użyciem dielektryka węglowodorowego. Rodzaj cieczy roboczej zastosowanej podczas EDM ma wpływ na właściwości technologicznej warstwy wierzchniej, a tym samym determinuje właściwości eksploatacyjne przedmiotu.

LITERATURA

1. Abbas N.M., Bahari M.F., Solomon D.G. "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. No. 47 (2007): pp. 1214÷1228.
2. Chakraborty S., Dey V., Ghosh S.K. "A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristic". *Precision Engineering*. No. 40 (2015): pp. 1÷6.
3. Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K.P., Schumacher B.M. "Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. No. 54 (2), (2005): pp. 64÷87.
4. Malshe A.P., Rajurkar K.P., Sundaram M.M. "Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining". *Procedia CIRP*. No. 6 (2013): pp. 13÷26.
5. Oniszczyk D., Świercz R. "Parametry i warunki obróbki determinujące proces WEDM". *Mechanik*. Nr 12 (2014): s. 16÷18.
6. Świercz R., Dąbrowski L., Oniszczyk D. "Struktura metalograficzna po obróbce EDM stali HTCS 150". *Mechanik*. Nr 4 (2015): s. 75÷80.
7. Świercz R., Oniszczyk D., Marczak M. "Topografia powierzchni po obróbce EDM stali HTCS 150". *Mechanik*. Nr 4 (2015): s. 80÷85.
8. Żyra A. "Wpływ obróbki elektroerozyjnej i elektrochemicznej na cechy strukturalne i morfologiczne stali austenitycznej X5CrNi 1810", praca inżynierska. Kraków: Politechnika Krakowska, 2014. ■