

Modyfikowanie cech warstwy wierzchniej

DARIUSZ OZIMINA, NORBERT RADEK*

Przedstawiono rozszerzony model jednej z metod tworzenia warstw wierzchnich – za pomocą obróbki elektroiskrowej. Zidentyfikowano zjawiska elementarne decydujące o efektach obróbki. Opisano mechanizmy powstawania poszczególnych stref warstwy wierzchniej oraz czynniki determinujące cechy tej warstwy. Przedstawiono także wyniki badań wstępnych, które potwierdziły możliwość wykorzystania obróbki elektroiskrowej do nadawania oczekiwanych własności i właściwości powierzchni roboczym elementom maszyn współpracujących tarciowo. Uzyskane wyniki potwierdziły konieczność dalszej obróbki wytworzonych w taki sposób warstw wierzchnich. Powinno to przyczynić się do zwiększenia odporności na zużywanie elementów maszyn.

Wprowadzenie

Stan warstwy wierzchniej (WW) elementów maszyn determinuje najczęściej ich cechy użytkowe, zarówno eksploatacyjne jak i estetyczne. Stan tej warstwy po kolejnych operacjach nie zawsze jest wystarczająco dobry do tego aby spełniać założone zadania. W celu poprawienia cech WW prowadzi się działania modyfikujące ją. Jednym z kryterium klasyfikacji tych działań jest sposób wprowadzania zmian. Przy tym kryterium można wyróżnić modyfikacje dokonywane metodami [10]:

- PVD,
- CVD,
- skoncentrowaną wiązką energii,
- galwanicznie,
- ogniowo,
- natryskowo.

Procesy PVD i CVD, którymi nakładane są powłoki konwersyjne, różnią się od siebie mechanizmem, lecz mają podobny cel. Realizuje się je w celu wytworzenia cienkich warstw, o ściśle określonym składzie, modyfikujących fizyczne, chemiczne i/lub mechaniczne właściwości powierzchni obrabianego materiału. W celu zwiększenia efektywności tych procesów opracowano wiele ich odmian, wspomagając procesy podstawo-

we, m.in.: laserem, polem magnetycznym, wiązką elektronów itp.

Wykorzystanie skoncentrowanej wiązki energii w procesie modyfikowania cech WW to najczęściej stopowanie, podczas którego wzbogaca się WW w pierwiastki poprawiające cechy użytkowe stopowanych elementów. Można je stosować w odniesieniu do metali przewodzących prąd elektryczny gdyż proces ten wspomagany jest elektrycznością [4, 5].

Metodą galwaniczną modyfikację WW uzyskuje się wykorzystując proces elektrolizy. Pod wpływem działania prądu, na przedmiocie zanurzone w elektrolicie zawierającym jony metalu tworzy się jednolita powłoka, trwale przylegająca do powierzchni. Metodą tą uzyskuje się warstwę gładką, ale przy tym bardzo cienką – od 3 do 6 mikrometrów.

Ogniowe konstytuowanie WW odbywa się poprzez zanurzenie przygotowanego do tego procesu wyrobu w rozgrzanym metalu ochronnym. W tej metodzie najczęściej wykorzystuje się cynk. Wynikiem takiej kąpeli jest utworzenie stosunkowo grubej warstwy metalu (od 40 do 110 μm), zarówno na powierzchniach zewnętrznych jak i wewnętrznych.

Natryskowe nanoszenie powłok to liczny zbiór metod. Powłoki nanoszone tą metodą mają różne funkcje od estetycznych (głównie

malarskich), poprzez ochronne po regeneracyjne (metalizowanie natryskowe).

W dalszej części szerzej przedstawiono metodę modyfikowania cech WW wykorzystującą oddziaływanie skoncentrowaną wiązką energii.

Modyfikowanie cech WW z wykorzystaniem skoncentrowanej wiązki energii

Procesy tworzenia warstw wierzchnich na częściach metalowych przy wykorzystaniu skoncentrowanej wiązki energii związane są najczęściej z transferem materii i energii, a także z reakcjami: chemicznymi, elektrochemicznymi i elektrotermicznymi, które zachodzą między czynnikami biorącymi udział w procesach. Właściwości eksploatacyjnej warstwy wierzchniej (EWW), będącej finalnym efektem konstytuowania WW, włączając w to jej modyfikację, zależą przede wszystkim od technologicznej warstwy wierzchniej (TWW) i sposobu jej konstytuowania, głównie w aspekcie kumulowania energii w obrabianym elemencie [3], w tym także na jego powierzchni.

W obróbkach wykorzystujących skoncentrowaną wiązkę energii wspomaganą prądem elektrycznym, dzięki jego biegunowości można sterować ich przebiegiem, w wyniku czego mogą one mieć charakter obróbek przyrostowych lub ubytkowych. W zakresie modyfikowania cech użytkowych WW szczególnie przydatna jest pierwsza z wymienionych odmian obróbek.

* Prof. dr hab. inż. Dariusz Ozimina, dr hab. inż. Norbert Radek, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Kielce.

Warstwy wierzchnie uzyskane przystawą odmianą obróbki elektro-iskrowej, tj. przez dodawanie masy, powinny charakteryzować się dobrym połączeniem nanoszonej powłoki z metalicznym podłożem. Dzięki temu, że w obróbce elektroiskrowej zmieniając biegunowość istnieje możliwość wprowadzania do WW różnych pierwiastków, w dużym zakresie można sterować cechami formowanych powłok, modyfikując je w pożądanym zakresie.

Cechą charakterystyczną powłok nanoszonych elektroiskrowo jest to, że mają one specyficzną, nie trawiącą się strukturę – po obróbce pozostają jasne, metaliczne. Warstwa wierzchnia kształtowana jest w warunkach lokalnego oddziaływania wysokiej temperatury i dużych nacisków. Wartości podstawowych parametrów obróbki elektroerozyjnej są następujące [2]:

– ciśnienie fali uderzeniowej od iskry elektrycznej: $(27) \cdot 10^3$ GPa,

– temperatura: w zakresie $(540) \cdot 10^3$ K.

Współcześnie, w procesach technologicznych stosowane są różne odmiany obróbki elektroiskrowej, a WW ukonstytuowana w rezultacie ich realizacji posiada założone cechy, zarówno w aspekcie struktury wewnętrznej, jak również struktury geometrycznej powierzchni (SGP).

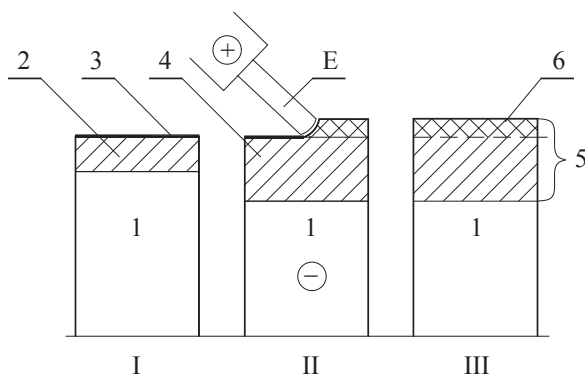
Zjawiska elementarne w obróbce elektroiskrowej

Tworzenie za pomocą obróbki elektroiskrowej warstwy wierzchniej, o cechach zmienionych w stosunku do pierwotnych cech WW elementu, jest procesem wysokoenergetycznym o charakterze

elektrotermicznym. Metoda ta zaszeregowana jest do technik nadtopieniowych tworzenia powłok [2]. Jej istota polega na wytwarzaniu na metalicznym podłożu cienkiej warstewki, o grubości od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów, o zmienionych w stosunku do podłoża właściwościach bądź właściwościach, np. warstewki przeciwzużyciowej. Zmiana cech następuje w wyniku transferu do warstw powierzchniowych czynnika zewnętrznego wspomaganego oddziaływaniem termicznym. Transfer czynnika następuje z elektrody roboczej lub otoczenia, gdyż nakładanie warstw może być realizowane w środowisku naturalnym, obojętnym lub reakcyjnym.

Powietrze w warunkach naturalnych nie przewodzi prądu elektrycznego. W celu wywołania przepływu ładunków elektrycznych, niezbędnego dla zaistnienia obróbki, do układu roboczego przykładają się dużą różnicę potencjałów, która wywołuje intensywne wyładowanie iskrowe. Proces ten poprzedzony jest wstępnym wyładowaniem elektrycznym – prekursorowym. W wyniku tych oddziaływań zachodzi zjawisko topnienia powierzchniowego, parowania i jonizacja materiału elektrody [9, 14]. W obszarze pracy układu roboczego powstaje plazma, która towarzyszy transferowi materii od anody do powierzchni elementu poddawanego obróbce elektroiskrowej. Sposób tworzenia tą metodą technologicznej warstwy wierzchniej przedstawiono schematycznie na rys. 1.

Warstwa wierzchnia materiału pierwotnego (przed obróbką) – etap I, jest niewielkiej grubości (najczęściej od kilku do kilkunastu mikrometrów), zależnej od sposobu kształtowania jego postaci, np. obróbką plastyczną, obróbką skrawa-



Rys. 1. Zmiana cech warstwy wierzchniej: I – stan pierwotny, II – etap obróbki elektroiskrowej, III – stan po obróbce; 1 – materiał rdzenia, 2 – pierwotna WW, 3 – powierzchnia pierwotna, 4 – wytworzona warstwa dyfuzyjna lub reakcyjno-dyfuzyjna, 5 – technologiczna WW (po obróbce), 6 – strefa WW o zmienionych cechach; E – elektroda robocza

niem itp. Na jej powierzchni tworzą się związki chemiczne o składzie zależnym od środowiska obróbki – najczęściej będą to tlenki. Podczas obróbki – etap II, pod wpływem przyłożonego potencjału elektrycznego i wywołanych nim oddziaływań termicznych, zewnętrzna warstwa obrabianej powierzchni staje się warstwą dyfuzyjną lub reakcyjno-dyfuzyjną (w zależności od składu chemicznego środowiska obróbki). Zauważyć można, że strefa niezmieniona – rdzeń ulega zmniejszeniu w wyniku oddziaływania ciepła. Naniesiona warstewka materiału elektrody roboczej wraz z warstwą materiału podłoża o zmienionej strukturze – etap III, stanowią TWW o zmienionych w założonym zakresie właściwościach. Po zakończeniu obróbki na jej powierzchni samoczynnie powstają związki metali z gazami otaczającej atmosfery, które mogą spowodować dalsze zmiany cech WW.

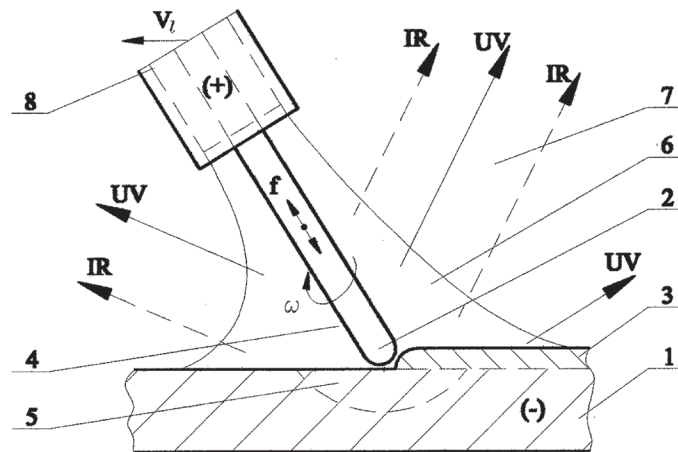
Mechanizm obróbki elektroiskrowej

Najistotniejszą fazą tworzenia TWW za pomocą obróbki elektroiskrowej jest etap początkowy – inicjacji procesu – związany z utworzeniem plazmy, pojawieniem się prądu jonowego i elektroнового.

Po włączeniu układu zasilającego obrabiarki zapoczątkowany zostaje proces ładowania kondensatorów. Następuje wzrost natężenia pola elektrycznego i za inicjowanie pośredniego kontaktu między elektrodami (anodą [-] jest obrabiany przedmiot, a katodą [+] – narzędzie) w wyniku przeskoku tzw. prekursora. Wywołuje on jonizację gazu w obszarze kontaktu, a w konsekwencji – przepływ strumienia elektronów. W rezultacie występowania dużej koncentracji energii na granicy faz: elektroda-atmosfera otoczenia bliskiego, istnieje duże prawdopodobieństwo zaistnienia zjawisk:

- topnienia powierzchniowego,
- powstawania plazmy,
- transferu masy (w wyniku przepływu prądu jonowego).

Silnym efektem świetlnym VIS, związanym z wyładowaniami elektro-iskrowymi, towarzyszy promieniowanie niewidzialne: ultrafioletowe UV i podczerwone IR [7]. Wtórny efekt wyładowań elektrycznych jest pojawienie



Rys. 2. Istota formowania WW w procesie obróbki elektroiskrowej: 1 – materiał podłoża (katoda), 2 – elektroda robocza (anoda), 3 – utworzona powłoka o oczekiwanych cechach użytkowych, 4 – plazma, 5 – strefa dyfuzyjna lub reakcyjno-dyfuzyjna, 6 – otoczenie bliższe (gaz ochronny), 7 – otoczenie dalsze (powietrze), 8 – uchwyt elektrody z kanałami doprowadzającymi gaz; IR – promieniowanie podczerwone, UV – promieniowanie ultrafioletowe [5]

się bezwładnościowego ciepła – promieniowania cieplnego. Obszar występowania w tym procesie plazmy nierównowagowej i związanej z nią wiązki jonów, elektronów i fotonów stanowi przestrzeń, w której przenoszona jest materia (M): atomy metalu (M^{n+}) i ładunki elektryczne (e). Tę fazę procesu obróbki można symbolicznie zapisać następująco:



Przenoszenie materiału anody w formie uaktywnionej plazmy nierównowagowej i prądu jonowego tłumaczy się faktem istnienia układu silnie spolaryzowanego. Taka forma przemian, związana z powstawaniem termojonów w wyniku oddziaływań energetycznych wykorzystywana jest w technikach analitycznych [13]. Przemieszczanie materii następuje pod działaniem różnoimiennych pól sił występujących między elektrodami w formie sił elektrostatycznych, wspomaganych niekiedy siłami grawitacji.

Konstituowanie powłoki za pomocą obróbki elektroiskrowej

W rezultacie opisanych wyżej zjawisk podczas obróbki elektroiskrowej następuje przemieszczanie materiału elektrody M_1 na powierzchnię podłoża M_2 . Powstaje w ten sposób warstwa reakcyjno-dyfuzyjna o składzie $xM_1^* - yM_2^*$. W objętości tworzonej warstwy występować będą także składniki domieszkowe a na jej powierzchni forma utleniona tej warstwy: $xM_1 - yM_2 - O_x$

Najistotniejsze elementy tworzenia powłoki w wyniku obróbki elektroiskrowej przedstawiono na rys. 2.

W wyniku celowego wprowadzenia do warstwy wierzchniej pierwiastków wybranych metali, ma ona cechy zmienione w założonym zakresie [1, 6, 8]. Bardzo często w ten sposób poprawia się (modyfikuje) właściwości tribologiczne powierzchni roboczych elementów współpracujących tarciowo. Podczas współpracy mogą występować jednocześnie efekty synergetyczne, ujawniające się podczas oddziaływań składników zawartych w substancji smarowej oraz katalityczne – mające również wpływ na tworzenie określonej postaci eksploatacyjnej warstwy wierzchniej, a tym samym na przebieg procesu zużywania.

Eksperymentalna weryfikacja rezultatów analiz teoretycznych

Warunki badań

Przedmiotem badań były próbki ze stali 45, na których tytanową elektrodą o średnicy $\varnothing = 1$ mm, nakładano powłokę. O przyjęciu tego gatunku stali węglowej konstrukcyjnej wyższej jakości zdecydowały: jej dostępność oraz powszechność stosowania w budowie maszyn.

Powłoki nanoszono za pomocą urządzenia produkcji bułgarskiej ELFA-541 w atmosferze otoczenia. Wykorzystując zalecenia producenta oraz wyniki analiz charakterystyk prądowych wybrano poniższy zbiór wartości parametrów nanoszenia powłoki:



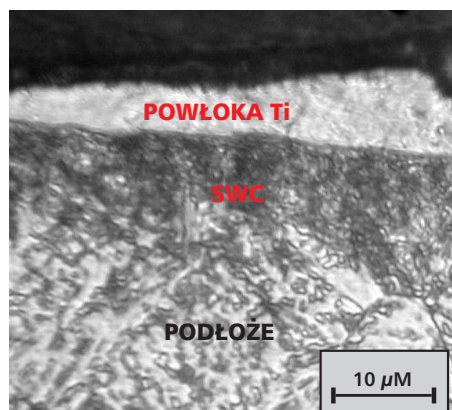
- natężenie prądu: $I = 16 \text{ A}$,
- prędkość przesuwu stołu: $V = 0,5 \text{ mm/s}$,
- prędkość głowicy wraz z elektrodą: $n = 4200 \text{ obr/min}$,
- liczba przejść roboczych elektrody: $i = 2$,
- pojemność zespołu kondensatorów: $C = 0,47 \text{ F}$,
- czas impulsu: $T_i = 8 \text{ s}$,
- czas przerwy między impulsami: $T_p = 32 \text{ s}$,
- częstotliwość: $f = 25 \text{ kHz}$.

Uzyskane w wyniku obróbki w powyższych warunkach warstwy poddano następującym badaniom:

- analizie mikrostruktury na mikroskopie optycznym Neophot 2,
- pomiarom chropowatości przyrządem TALYSURF 4,
- badaniom tribologicznym za pomocą testera T-01M.

Wyniki eksperymentu

Na rysunku 3 przedstawiono mikrostrukturę powłoki tytanowej uzyskanej za pomocą obróbki elektroiskrowej.



Rys. 3. Mikrostruktura powłoki Ti

Można zidentyfikować trzy strefy: powłokę z Ti, strefę wpływu ciepła (SWC) oraz materiał podłoża. Grubość uzyskanych warstw Ti wyniosła średnio około 8 m, natomiast zasięg SWC w głąb materiału podłoża wyniósł średnio około 20 m. Na przedstawionej fotografii widoczna jest wyraźna granica między powłoką a SWC, natomiast przejście od SWC do podłoża jest łagodne.

Kolejny etap badań dotyczył pomiarów chropowatości uzyskanych powłok tytanowych. Przeprowadzono je w Laboratorium Pomiarów Wielkości Geo-

metrycznych Politechniki Świętokrzyskiej na przyrządzie TALYSURF 4, wykorzystując program SUFORM. Pomiar wykonano w dwóch kierunkach, przy czym kierunek oznaczony „w” był zgodny z przemieszczaniem się głowicy roboczej, natomiast kierunek oznaczony „p” – był prostopadły do ściegów skanujących. Analizowano następujące parametry wysokościowe mikrogeometrii:

Ra – średnie arytmetyczne odchylenie profilu,

Rp – maksymalna wysokość wzniesienia profilu,

Rv – maksymalna głębokość wgłębienia profilu,

Rm – maksymalna wysokość profilu chropowatości.

Wybrane wyniki pomiarów chropowatości powłok przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane wyniki badań chropowatości powłok tytanowych

L.p.	Mierzony parametr	Wartość parametru w kierunku, μm .	
		w	p
1	Ra	1,19	1,07
2	Rp	5,01	4,16
3	Rv	3,64	3,31
4	Rm	8,62	7,53

Analizując wyniki badań zawarte w tabeli i porównując je ze zmierzoną chropowatością podłoża, można zauważyć, że powłoki Ti posiadały znacznie większą chropowatość (powierzchnia przed obróbką elektroiskrowa charakteryzowała się chropowatością o parametrze $Ra = 0,52 \text{ m}$). Ponadto, parametry wysokościowe mikrogeometrii mierzone w kierunku „w” były od 10 do 20% większe od mierzonych w kierunku „p”.

Dotychczas przeprowadzone badania oraz synteza informacji literaturowych wykazują, że kształtowanie powierzchni zachodzi w wyniku nakładania się na siebie kraterów (będących skutkiem erozji podłoża) oraz grzbietów utworzonych z transferowanych na powierzchnię cząstek materiału elektrody. Tak powstała powierzchnia posiada szereg cech, z których najistotniejsze to:

- regularność,



- brak lub nieznaczna kierunkowość SGP (anizotropia),
- duże promienie zaokrągleń wierzchołków mikronierówności.

Dla styku ciernie współpracujących ciał cechy powyższe można uznać za pozytywne w aspekcie tribologicznym.

Jedną z głównych wad powłok naniesionych obróbką elektroiskrową jest ich duża chropowatość końcowa. W wielu opracowaniach naukowych, np. [8,11,12], analizuje się wpływ parametrów procesu na chropowatość powierzchni. Sterując tymi parametrami można uzyskać zakładaną mikrogeometrię powierzchni. Jest to zatem sposób na wytwarzanie powierzchni o zadanej rozwiniętej powierzchni chropowatej zwanej reliefem powierzchniowym.

Aby ocenić praktyczną przydatność otrzymanych powłok w trzecim etapie prezentowanych doświadczeń przeprowadzono badania tribologiczne. Przeprowadzono je na standardowym testerze tribologicznym T-01M, przy następujących parametrach:

- prędkość obrotowa: $n=682$ obr/min,
- czas próby: $t=600$ s
- wartości obciążenia: 5, 10, 15 N.

Podczas badań między próbką a przeciwpróbką, którą była kulka występowało tarcie technicznie suche co oznacza, że w obszarze współpracy występował styk niekonforemny (kulka – tarcza), a wartość nacisków można określić ze wzorów Hertza.

Na wykresach (rys. 4a i 4b) przedstawiono przykłady zarejestrowanych

zmian sił tarcia w czasie próby, przy obciążeniu 10 N.

Podczas technicznie suchego tarcia powierzchni próbki z przeciwpróbką następuje oddziaływanie atmosfery otoczenia bliskiego z tą powierzchnią, w rezultacie czego, a także w wyniku oddziaływania obciążenia zewnętrznego następuje transformacja eksploatacyjnej warstwy wierzchniej (EWW). Dla próbek bez powłoki – rys. 4a, w przedziale od 50 do 150 s można zaobserwować pewne oznaki stabilizacji siły tarcia.

Inny przebieg ma zależność $F=f(t)$ dla przypadku współpracy przeciwpróbki z próbką pokrytą powłoką tytanową – rys. 4b. Obserwuje się stabilizację siły tarcia, co może świadczyć o stabilizacji stanu ukonstytuowanej w rezultacie obróbki elektroiskrowej warstwy wierzchniej.

Istnieją przesłanki, że stabilizacja zachodzi jako rezultat reakcji tribochemicznych w wyniku których powstają związki tytanu z gazami otoczenia bliższego. Przypuszczenia te wymagają jednak jeszcze weryfikacji.

Średnia wartość siły tarcia między przeciwpróbką a próbką ze stali 45 wyniosła $F_{sr}=3,01$ N, a dla próbki z powłoką Ti siła ta miała wartość $F_{sr}=4,65$ N.

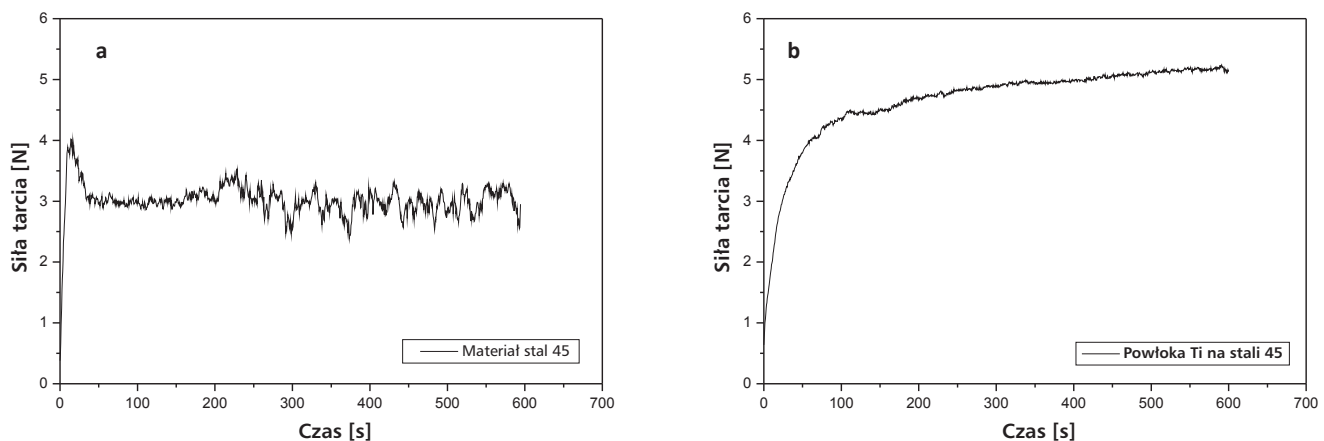
Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w pracy rozważania dotyczące obróbki elektroiskrowej, stanowią omówienie jednego z licznych jej możliwych zastosowań, zawężone do zagadnień tribologicznych związanych z modyfikowaniem cech WW – przede wszystkim w aspekcie tworzenia warstw

wierzchnich o charakterze przeciwzużyciowym. Klasyczny model obróbki elektroiskrowej, rozszerzony w niniejszej pracy o nowe elementy uwzględniające najnowsze osiągnięcia fizykochemii powierzchni, pozwala lepiej poznać mechanizm przekazywania energii dostarczonej w impulsie do obszarów bezpośrednio uczestniczących w procesie wyładowania (elektrodom, cieczy dielektrycznej lub gazom).

Wyniki przeprowadzonych analiz i doświadczeń umożliwiają sformułowanie poniższych spostrzeżeń i wniosków:

1. Powłoki Ti naniesione elektroiskrowo charakteryzowały się większą chropowatością R_a (ok. $2\times$) niż chropowatość podłoża. Duże wartości parametrów chropowatości nie zawsze są czynnikiem negatywnym, w pewnych przypadkach struktura powierzchni o dużej chropowatości ze względów tribologicznych może być korzystna gdyż zagłębienia mogą być wykorzystywane jako zasobniki smaru i przyczyniać się do intensyfikacji wymiany ciepła oraz katalizy wynikającej, np. z oddziaływań dodatków smarowych.
2. Podczas badań tarciovych zarejestrowana średnia siła tarcia między kulką a próbką wykonaną ze stali 45 była około 30% mniejsza od średniej siły tarcia dla skojarzenia z próbką z powłoką Ti.
3. Celowym byłoby przeprowadzenie badań dotyczących porowatości i przyczepności powłoki oraz pomiary naprężeń własnych powłok otrzymanych elektroiskrowo. Są to cechy użytkowe, które determinują intensywność procesu zużywania powierzchni elementów maszyn współpracujących tarcio.



Rys. 4. Zmienność siły tarcia w czasie: a) próbka bez powłoki (materiał podłoża: stal 45), b) próbka z powłoką Ti (obciążenie: $Q=10$ N)

W badaniach tych należałoby także sprawdzić wpływ rodzaju i stanu materiału podłoża na trwałość jego połączenia z powłoką.

Proponowane metody są tańsze i bardziej funkcjonalne od innych znanych metod modyfikowania WW na roboczych powierzchniach części maszyn. Ponadto, stopowanie jako obróbka o charakterze przyrostowym może być ona wykorzystywane w procesach regeneracji różnych elementów.

Literatura

- [1] Antoszewski B., Radek N.: Elektroiskrowo nanoszone powłoki tytanowe i molibdenowe. Przegląd Spawalnictwa nr 8-10/2002, s. 134÷135.
- [2] Burakowski T., Roliński E., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1992.
- [3] Kaczmarek J.: O wpływie obróbki ściernej i niektórych innych technologii na magazynowanie energii w materiale obrobionym. Postępy Technologii, z. 22, 1998, s. 35÷52.
- [4] Kotarska A.: Laser surface alloying of ductile cast iron with Ti+5%W mixture. Welding Technology Review, No. 5/2019, p. 19-25.
- [5] Kotkowiak M., Piasecki A., Kulka M.: Laser alloying of bearing steel with boron and self-lubricating addition. Archives of Mechanical Technology and Materials, vol. 36, 2016, p.7-11
- [6] Nowicki B., Pierzynowski R., Spadło S.: Elektroerozyjne wytwarzanie warstw stopowych na powierzchniach krzywoliniowych. Materiały V konferencji EM'97 (Electromachining). Bydgoszcz – Golub-Dobrzyń 1997, s. 261÷268.
- [7] Ozimina D., Radek N., Styp-Rekowski M.: Modyfikowanie cech warstwy wierzchniej za pomocą obróbki elektro-iskrowej. Materiały II Międzynarodowej Konferencji MANUFACTURING'04. Poznań 2004. S. 204-215.
- [8] Petrov J.V. (ed.): Elektroiskrove legirovanije metalliëskich powierzchnostoj. Kišiniev 1985.
- [9] Singer I. L.: Dissipative Processes in Tribology. in: Dowson D (ed.), Elsevier Science B. U. 1994, pp. 286÷306.
- [10] Styp-Rekowski M., Matuszewski M., Oborski I.L.: Badanie powłok jako czynnika determinującego funkcjonalność maszyny. Obróbka Metalu nr 1/2019, s. 10-16
- [11] Tarelnik V.B.: Kombinirovannyje technologii elektroerozionnogo legirovanija. Izd. Technika, Kijev 1997.
- [12] Tschernov A.E., Tarelnik V.B., Marzinkovskij V.S., Gromyko B.M.: Die Ausarbeitung der Methoden des Elektroabtragenden legierens der Kontaktflächen von Impulsgleitringdichtungen. Internationale Dichtungskolloquium Untersuchung und Anwendung von Dichtelementen, Steinfurt, 1997, pp. 1÷16.
- [13] Witkiewicz Z.: Podstawy chromatografii, WNT, Warszawa 1995.
- [14] Wojtczak L., Castillo-Alvarado F.L., Rutkowski J. H.: Topnienie powierzchniowe na przykładzie krystalicznego aluminium. Tribologia nr 4/1996, s. 445÷461. ■