



Modyfikacja powierzchni metalowych wysokonapięciową iskrą elektryczną

JAN KUBICKI, MIROSŁAW KWAŚNY, WOJCIECH NAPADŁEK¹

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, ¹Instytut Pojazdów,
01-489 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy przedstawiono oryginalną metodę modyfikacji powierzchni metalowych przy pomocy plazmy iskry elektrycznej. Przypomniano opis towarzyszących jej zjawisk fizycznych. Opisany został układ eksperymentalny do modyfikacji powierzchni z udziałem plazmy iskry elektrycznej wytwarzanej przy pomocy impulsów wysokonapięciowych otrzymywanych w wyniku załączenia przez iskiernik dwóch wysokonapięciowych kondensatorów niskoindukcyjnych. Pokazano wyniki wstępnych badań wybranych materiałów z powierzchnią zmodyfikowaną z zastosowaniem przedstawionej metody. Zaprezentowany został również układ badawczy i wstępne wyniki badań diagnostycznych plazmy oddziałującej z modyfikowaną powierzchnią. Wyciągnięto wnioski odnośnie do prowadzenia dalszych prac badawczych i budowy stanowiska technologicznego.

Słowa kluczowe: modyfikacja powierzchni, iskra elektryczna, transmisja plazmy

Symbolne UKD: 620.1

1. Wstęp

Powierzchniowa obróbka cieplna metali jest często stosowanym procesem w technologii wytwarzania części maszyn, pojazdów i innych urządzeń mechanicznych. Jest to szczególnie ważne wszędzie tam, gdzie należy sprostać wysokim wymaganiom dotyczącym trwałości i niezawodności elementów maszyn przy wykorzystaniu w miarę tanich materiałów konstrukcyjnych obrabianych powierzchniowo.

Obok konwencjonalnych sposobów modyfikacji warstw powierzchniowych pojawiają się zupełnie nowe metody ulepszania cieplnego tych warstw. Na szczególną uwagę zasługuje hartowanie laserowe wiązką lasera ciągłego — działania polegające na stosunkowo szybkim przesuwaniu się po powierzchni obrabianego

materiału wiązki laserowej o odpowiednio dużej mocy [1, 2]. Następuje wówczas silne rozgrzanie materiału na stosunkowo małej głębokości. Następnie w wyniku szybkiego odprowadzenia ciepła w głąb materiału poprzez przewodnictwo cieplne, warstwa wierzchnia zostaje gwałtownie schłodzona i zahartowana. Proces jest skuteczny jedynie wówczas, gdy moc lasera jest dostatecznie duża i duża jest szybkość przesuwania wiązki po powierzchni materiału, gdyż tylko wtedy może wystąpić silne rozgrzanie materiału na stosunkowo małej głębokości. Opisany efekt można uzyskać również bez szybkiego przesuwania wiązki laserowej, wykorzystując do nagrzewania modyfikowanej powierzchni laser impulsowy emitujący impulsy o dostatecznie dużej energii w odpowiednio krótkim czasie [3].

Przedstawione wyżej sposoby, aczkolwiek wygodne technologicznie, są jednak kosztowne w realizacji. W obydwu przypadkach mamy do czynienia ze stosunkowo małą sprawnością lasera oraz dużymi stratami na odbicie wiązki laserowej. Ponadto samo urządzenie laserowe jest na ogół złożone i drogie. Dlatego też do powierzchniowej obróbki cieplnej metali próbuje się wykorzystać alternatywne metody. Jedną z nich jest podgrzewanie powierzchni przy pomocy plazmy wyładowania elektrycznego pomiędzy tą powierzchnią a dodatkową elektrodą.

Znane w literaturze sposoby modyfikacji powierzchni przy pomocy tej metody polegają na wykorzystaniu ruchomej elektrody, która przesuwaną się po obrabianej powierzchni i odrywając się od niej, powodowała iskrzenie wywołujące określone zmiany na obrabianej powierzchni metalowej [4, 5].

Załączanie obwodu elektrycznego w tych układach następowało poprzez zwieranie elektrody z obrabianą powierzchnią. Narzucało to oczywiście wymagania odnośnie do stosowanego napięcia, które nie mogło w tym przypadku być zbyt duże. W związku z tym wykorzystywanie większych energii, było możliwe jedynie poprzez rozciągnięcie procesu w czasie, powodując tym samym przechodzenie iskry elektrycznej w wyładowanie łukowe. Bardzo istotnie musiała się obniżyć wówczas temperatura wyładowania. Materiał jest w takim przypadku rozgrzewany głęboko i szybkie schłodzenie go poprzez przewodnictwo cieplne jest wówczas utrudnione.

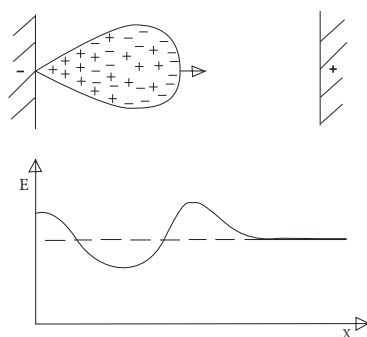
W niniejszej pracy zaprezentowano metodę powierzchniowej obróbki cieplnej metalu przy pomocy plazmy iskry elektrycznej uzyskanej w wyniku przykładania wysokonapięciowych impulsów elektrycznych ze stromym zboczem przednim do elektrody umieszczonej stosunkowo blisko modyfikowanej powierzchni [6].

2. Opis zjawisk zachodzących w wykorzystywanej plazmie iskry elektrycznej

Iskra elektryczna jest znanym zjawiskiem fizycznym powstającym w wyniku przebicia elektrycznego w gazie pod ciśnieniem atmosferycznym lub większym. Na ogół powstają wówczas zygzakowate, rozwidlające się kanały plazmowe, w których

silne elektronowe i jonowe lawiny powodują w stosunkowo krótkim czasie duży wzrost ciśnienia i temperatury. Towarzyszy temu fala akustyczna i silne świecenie kanałów plazmowych. Przepływ ładunków prowadzi do wyrównania się potencjałów i kończy wyładowanie [7, 8].

W różnych warunkach występuje wiele mechanizmów powstawania plazmy iskry elektrycznej. Koncentrując się jednak na plazmie iskry elektrycznej wytwarzanej przy pomocy wysokonapięciowych impulsów elektrycznych [6], mamy do czynienia z małą odległością między elektrodami i z bardzo dużym napięciem między nimi. Ponadto występujące pole elektryczne jest silnie niejednorodne, a proces zachodzi w stosunkowo krótkim czasie. Pełny opis zjawisk dla tego typu przypadku podali Loeb, Meek i Raether [9], formułując teorię mechanizmu kanałowego nazywaną często teorią strimerów. Według tej teorii, po osiągnięciu napięcia U_0 , przy katodzie rozpoczyna się lawina elektronowa, wydłużając się stosunkowo szybko w stronę anody. Wskutek dyfuzji tworzy się „kropłowaty” kształt lawiny, której czoło stanowią elektrony, a w ogonie pozostają znacznie mniej ruchliwe jony dodatnie (rys. 1).



Rys. 1. Zmiana rozkładu pola spowodowana przez lawinę [9]

Lawina odkształca pole, powodując wzrost jego natężenia przed i za sobą oraz osłabiając je wewnątrz zajmowanej przestrzeni.

Po dojściu czoła lawiny do anody elektrony ulegają przez nią wchłonięciu pozostawiając w przestrzeni stożek ładunków dodatnich. Stożek ten wytwarza silne pole dodatkowe przy jednoczesnym promieniowaniu atomów wzbudzonych, co wywołuje wtórne lawiny wokół stożka w pobliżu czoła lawiny, gdzie wzmocnienie pola głównego jest największe. Wtórne lawiny, dochodząc do stożka, oddają mu elektrony z czoła, natomiast ich jony dodatnie zwiększają ładunek przestrzenny lawiny pierwotnej. Od strony anody wytwarza się kanał plazmowy, zwany anodowym, a do katody przesuwa się obszar podwyższonego pola stożka, powodując powstanie nowych lawin wtórnych.

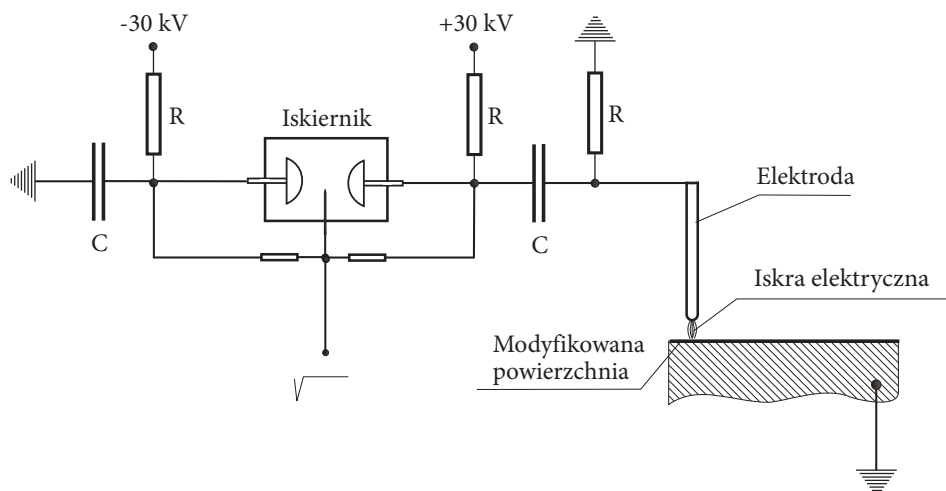
Mechanizm ten postępuje bardzo energicznie i kanał plazmowy szybko wydłuża się ku katodzie. Po osiągnięciu katody kanał tworzy iskrę o skończonej

średnicy, a pomiędzy elektrodami przepływa prąd elektryczny o stosunkowo dużym natężeniu.

Plazma iskry elektrycznej podobnie jak plazma indukowana laserem, należy do kategorii plazmy słabo zjonizowanej.

3. Eksperymentalne stanowisko do modyfikacji powierzchni przy pomocy plazmy iskry elektrycznej

Jak już wspomniano we wstępie, w niniejszej pracy impuls elektryczny jest formowany niezależnie od modyfikowanej powierzchni przy pomocy odpowiedniego generatora, którego podstawowymi elementami są dwa kondensatory o pojemności 100 nF każdy, naładowane przeciwnie do napięcia 30 kV i zwierane przy pomocy odpowiedniego iskiernika (rys. 2).

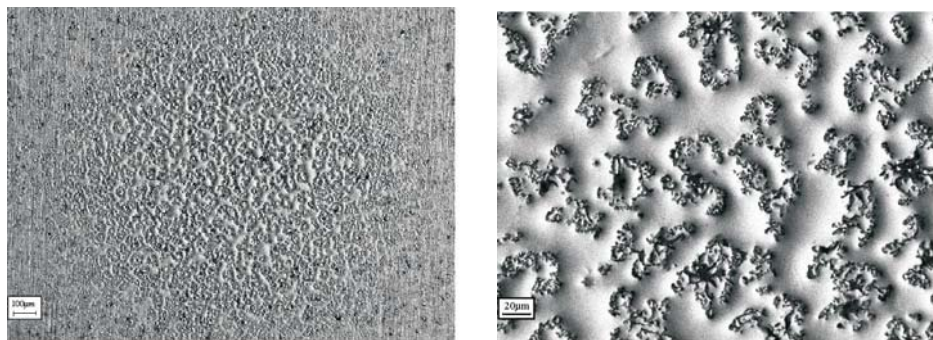


Rys. 2. Schemat układu eksperymentalnego do obróbki powierzchni metalowych iskłą elektryczną

Uzyskiwany z układu wysokonapięciowy impuls elektryczny był podawany na elektrodę w postaci miedzianego pręta o średnicy 1,5 mm zakończoną sferą o promieniu 0,75 mm. Ostatecznie więc powstawał zamknięty obwód elektryczny, w którym głównymi odbiornikami energii zgromadzonej w kondensatorach był iskiernik i wykorzystywana iskra elektryczna. W wyniku oddziaływania tej iskry w stosunkowo krótkim czasie z modyfikowaną powierzchnią, następowało bardzo szybkie nagrzewanie tej powierzchni i topnienie warstwy wierzchniej, a następnie w wyniku odprowadzenia ciepła poprzez przewodnictwo w głąb materiału, również szybki proces przechodzenia w stan stały, niekiedy amorficzny.

Zależnie od składu chemicznego np. dla stopów Fe-C, można wykonać struktury martenzytowe, martenzytyczno-bainityczne, a dla żeliwa — ledeburyt (żeliwo białe).

W wyniku obróbki powierzchni żeliwa eutektycznego, uzyskano strukturę powierzchni pokazaną na zdjęciach przedstawionych na rysunku (rys. 3).



Rys. 3. Zdjęcie struktury powierzchni żeliwa eutektycznego po obróbce iskrą elektryczną

Efektom obróbki jest znaczny wzrost twardości materiału na jego powierzchni.

4. Wstępne badania plazmy iskry elektrycznej

Do ostatecznego wdrożenia przedstawionej metody niezbędne są prace badawcze zarówno zjawisk fizycznych występujących w plazmie iskry elektrycznej, jak i efektów końcowych w postaci jakości otrzymanej warstwy powierzchniowej.

Wiadomo, że jednym z podstawowych parametrów plazmy jest koncentracja w niej swobodnych elektronów n_0 .

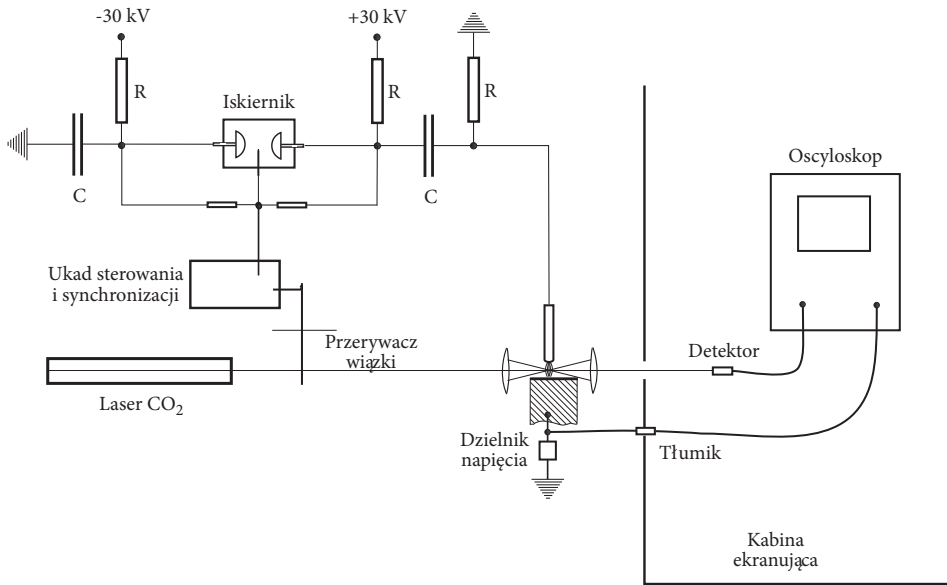
Jest ona ściśle związana z tzw. częstością plazmową wzorem [10]:

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi e^2 n_0}{m_e},$$

gdzie: e — ładunek elektronu;

m_e — jego masa.

Częstość plazmowa charakteryzuje się m. in. tym, że promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości mniejszej od niej nie jest przez plazmę przepuszczane. Wykorzystując tę własność, przeprowadzono eksperyment, w którym prześwietlano obszar iskry elektrycznej przerywaną wiązką lasera CO₂ (10,6 μm). Schemat układu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat układu do pomiaru transmisji plazmy iskry elektrycznej

W układzie wykorzystano dwukanałowy oscyloskop, do którego doprowadzone były sygnały z detektora promieniowania wiązki sondującej i z dzielnika napięciowego impulsu prądowego iskry. Oscyloskop wraz z detektorem były umieszczone w kabinie ekranującej chroniącej je przed zakłóceniami.

Na podstawie obserwowanych oscylogramów wykonano rysunek przedstawiający transmisję plazmy i odpowiadającą jej wartość prądu w iskrze elektrycznej w funkcji czasu (rys. 5).

Na podstawie tego rysunku widać, że przez czas $\sim 1 \mu\text{s}$ plazma nie jest przezroczysta dla promieniowania $10,6 \mu\text{m}$.

Dla promieniowania laserowego o częstotliwości kołowej ω_L musi więc w tym czasie zachodzić relacja:

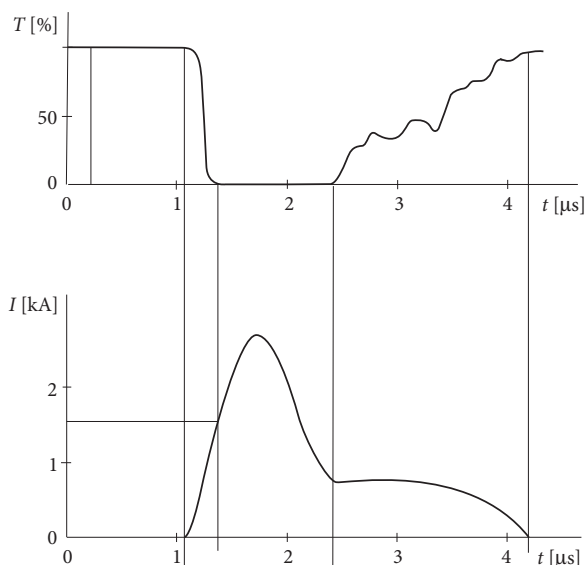
$$\omega_L^2 < \omega_p^2 = \frac{4\pi e^2 n_0}{m_e}$$

Po podstawieniu:

$$\omega_L = 2\pi \frac{c}{\lambda_L} = 6\pi \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{s}},$$

$$e^2 = 2,3 \cdot 10^{-28} \text{ N}\cdot\text{m}^2,$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg},$$



Rys. 5. Transmisja plazmy dla promieniowania $10,6 \mu\text{m}$ i odpowiadająca jej wartość prądu w iskrze elektrycznej

możemy stwierdzić, że we wspomnianym czasie gęstość elektronów w plazmie jest większa od $1,12 \times 10^{19} \text{1/cm}^3$.

Z przedstawionego rysunku widać również, że wartość prądu w iskrze przekracza wówczas 1 kA.

5. Podsumowanie

Przedstawione prace są wstępnym etapem szerszego zakresu prac nad modyfikacją powierzchni metalowych przy pomocy iskry elektrycznej. W wyniku doprowadzenia do modyfikowanej powierzchni stosunkowo dużej energii w krótkim czasie proces mógł zachodzić na niewielkiej głębokości. Konsekwencją tego było szybkie schłodzenie modyfikowanej powierzchni poprzez odprowadzenie ciepła w głąb materiału.

Przedstawiona metoda jest szczególnie korzystna przy wykorzystaniu jej do obróbki części maszyn. Do jej wdrożenia niezbędne jest jednak przeprowadzenie wielu badań zarówno o charakterze podstawowym, pozwalającym dokładniej poznać zachodzące zjawiska fizyczne, jak i badań optymalizacyjnych, z których będzie można wyciągnąć odpowiednie wnioski i otrzymać wskazówki odnośnie do budowy stanowiska technologicznego.

Na podstawie przeprowadzonych badań diagnostycznych plazmy iskry elektrycznej można m.in. wyciągnąć podstawowy wniosek odnośnie do wpływu wiel-

kości natężenia prądu na koncentrację swobodnych elektronów w plazmie. Dzięki temu dalsze badania można uprościć, rejestrując jedynie przebiegi elektryczne impulsów prądowych.

Zmieniając kształt i materiał elektrody, odstęp między elektrodą i modyfikowaną powierzchnią oraz pojemność i napięcie ładowania kondensatorów, będzie można w przyszłości w prosty sposób optymalizować parametry układu ze względu na jakość modyfikowanej powierzchni.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.10.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w marcu 2009 r.

LITERATURA

- [1] M. BONEK, L. DOBRZAŃSKI, E. HAJDUCZEK, *Mechanizm tworzenia laserowo modyfikowanej warstwy wierzchniej stali narzędziowej*, Inżynieria Materiałowa, nr 3, 151, 27, 2006, 346-351.
- [2] W. S. KOWALIENKO, *K woprosu miechanizma uproczenia materiała pri wozdiejstwiu nieprierywnogo łazjernogo izłuczzenia*, Eliktronnaja obrabotka mietalłow, 1, 1980, 35-39.
- [3] W. S. KOWALIENKO, *Obrabotka materiałow impulsnym izłuczieniem łazjerow*, Kijew, Wysszaja szkoła, 1977.
- [4] D. OZIMINA, N. RADEK, J. SENATORSKI, *Wybrane właściwości warstw powierzchniowych otrzymanych elektroiskrowo*, Inżynieria Materiałowa, 5, 2005, 701-703.
- [5] B. ANTOSZEWSKI, N. RADEK, W. TARELNIK, *Testing the resistance to seizure of electro spark deposited coating*, Problems of Tribology, Ukraina, 1, 2004, 8-13.
- [6] T. BURAKOWSKI, J. KUBICKI, M. KWAŚNY, W. NAPADŁEK, *Sposób i urządzenie do modyfikacji powierzchni metalowych wysokonapięciową iskrą elektryczną*, Patent RP nr P382978.
- [7] S. SZPOR i in., *Technika wysokich napięć*, Warszawa, PWN, 1978.
- [8] Z. KOSZALUK i in., *Technika badań wysokonapięciowych*, Warszawa, WNT, 1985.
- [9] L. B. LOEB, J. M. MEEK, *The mechanism of the electric spark and its possible role in tapping Radiant Energy*, Stanford Univ. Press., Helpful in understanding electric "avalanche" found in Ed Gray circuits, 1941.
- [10] R. R. FEYNMAN, R. B. LEIGHTON, *Feynmana wykłady z fizyki*, t. II, cz. 1, Warszawa, PWN, 1970.

J. KUBICKI, M. KWAŚNY, W. NAPADŁEK

Modification of metallic surface via high voltage electric spark

Abstract. Original method of modification of metallic surface via electric spark plasma is presented in the paper. Physical phenomena present in the process are mentioned. Experimental set-up for surface modification using electric spark plasma generated by high voltage pulses is described. The HV pulses are generated after discharging two high-voltage low inductance capacitors connected by a spark gap. Preliminary measurement results of selected materials with modified surface are presented.

Also it is shown the experimental system and first diagnostic results of plasma interacting with a surface under modification. Conclusions related to further research works and to development of a technology stand are drawn.

Keywords: surface modification, electric spark, plasma transmission

Universal Decimal Classification: 620.1