

Obróbka laserowa powłok elektroiskrowych

NORBERT RADEK *

W pracy zajęto się określeniem wpływu obróbki laserowej na własności powłok nanoszonych elektroiskrowo. Ocenę własności powłok po naświetlaniu laserowym przeprowadzono na podstawie pomiarów mikrotwardości i naprężeń własnych oraz badań odporności na zacieranie. Badania przeprowadzono wykorzystując Mo i Ti jako materiały powłokowe (anody) nakładane elektroiskrowo na próbki ze stali C45 (katody), a następnie modyfikowane wiązką laserową. Do nanoszenia powłok elektroiskrowych użyto urządzenia produkcji bułgarskiej, model ELFA-541. Obróbkę laserową nałożonych powłok elektroiskrowych wykonano laserem Nd:YAG, model BSL 720.

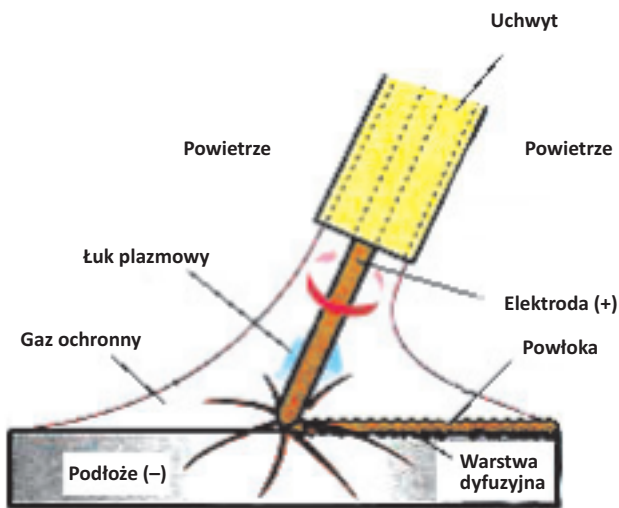
Wstęp

Obróbka elektroiskrowa wcześniej najszerzej stosowana była jako obróbka ubytkowa głównie do znakowania wyrobów metalowych oraz rzadziej do modyfikacji warstw wierzchnich. Uznane zalety tej metody kształtowania warstw powierzchniowych sprawiają, że obróbka ta zajmuje obecnie utrwaloną pozycję wśród obróbek powierzchniowych [1, 3, 7]. Najbardziej popularne są obecnie odmiany tej metody funkcjonujące pod nazwami ESD (*Electrospark Deposition*), ESA (*Electrospark Alloying*), PES (*Pulse Electrode Surfacing*) oraz EDM (*Electrodischarge Machining*). Wymienione technologie łączy wspólna podstawa działania opierająca się na wykorzystaniu zjawiska wyładowania elektrycznego wraz z towarzyszącymi mu procesami transportu masy i dyssypacji energii [4÷6].

Celem stosowania tych technologii jest ochrona przed korozją i agresywnością chemiczną otoczenia, zwiększanie odporności na zużywanie ekstremalnie obciążonych fragmentów części maszyn, przywracanie wymiarów przy regeneracji [8], a także nadawanie pewnych szczególnych cech powierzchniowych takich jak uaktywnienie fizykochemiczne powierzchni (wytworzenie założonego stanu naprężeń powierzchniowych, zintensyfikowanie wymiany ciepła) a także uaktywnienie biologiczne powierzchni stosowane, np. do implantów stomatologicznych. Dzięki możliwości subtelnego lokalnego oddziaływania jest to technologia z perspektywami wykorzystania w mikroobróbce materiałów. W samych Stanach Zjednoczonych badania nad tą technologią prowadzone są przez instytuty pracujące dla NASA, AIR FORCE, US NAVY.

Nanoszenie powłok elektroiskrowych zachodzi przy wyładowaniu krótkich impulsów prądu elektrycznego, podczas których następuje modyfikacja powierzchni poprzez przenoszenie materiału elektrody (anody) na materiał elementu pokrywającego (katody). Proces ten jest podobny do napawania elektrycznego przy bardzo małym impulsie cieplnym. Stąd też bywa nazywany mikrostopowaniem czy też mikronapawaniem. Przenoszony materiał anody stopuje katodę, jednocześnie oddziałując chemicznie z otoczeniem, a w szczególności z atomami azotu zawartymi w powietrzu, a także z węglem i innymi składnikami modyfikowanego materiału, tworzy na nim dyfuzyjną, odporną na zużywanie warstwę. Warstwa ta posiada specyficzną budowę, która jest rezultatem procesu. Mamy w nim do czynienia z impulsowym źródłem ciepła działającym na mikroobjętość znacznej części materiału pozostającego w temperaturze otoczenia, różnica mas obszaru ogrzewanego i odbierającego ciepło powoduje, że procesy zestalania roztopionego metalu zachodzą bardzo szybko czego rezultatem są drobnoziarniste nierównowagowe struktury o dużej gęstości. Struktury takie charakteryzują się dużą twardością i odpornością na zużywanie, zarówno tribologiczne jak i nietribologiczne. Warunkiem podstawowym, limitującym gamę materiałów powlekających, jest konieczna zdolność do przewodzenia

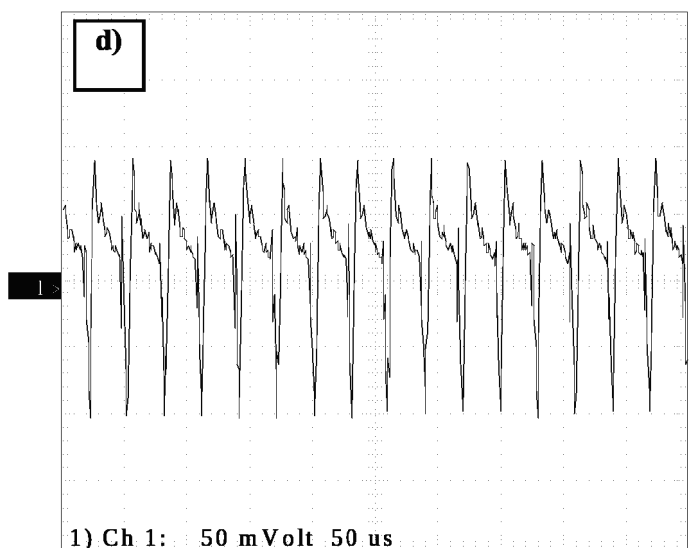
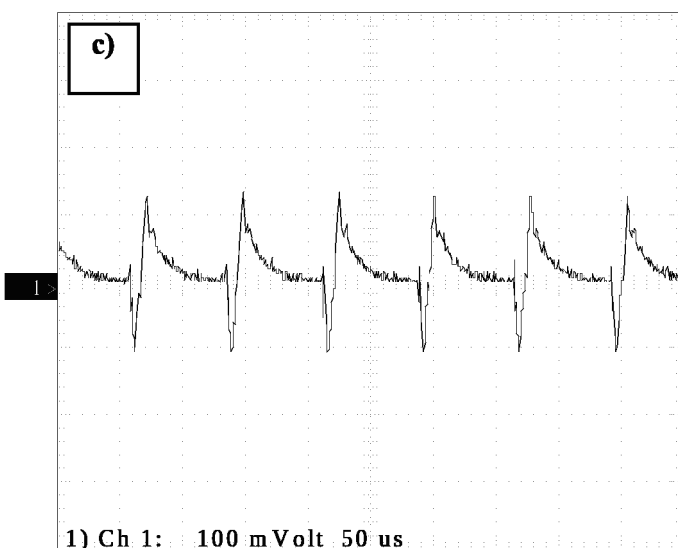
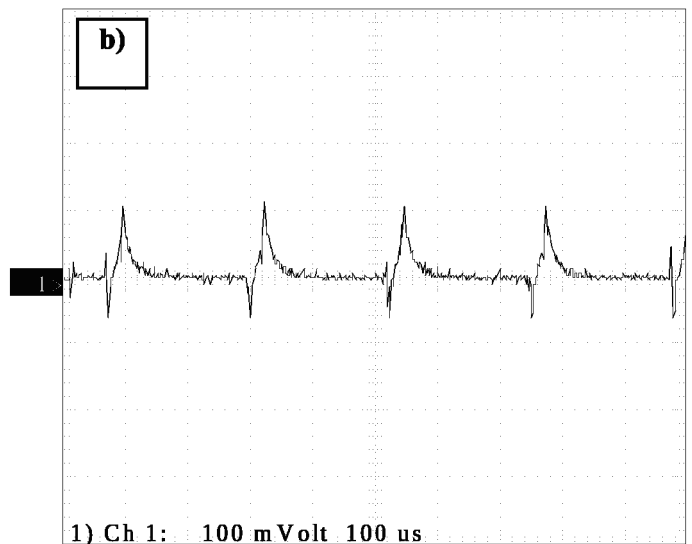
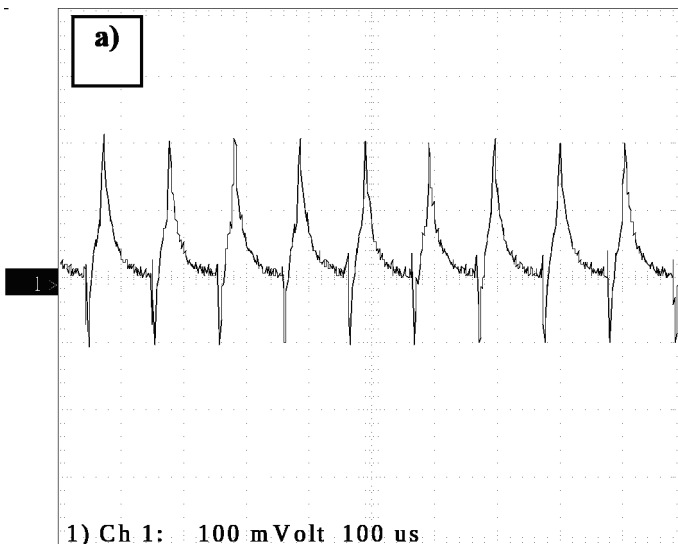
* Dr hab. inż. Norbert Radek, prof. PŚk, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Eksploatacji, Technologii Laserowych i Nanotechnologii, al. 1000-lecia PP 7, 25-314 Kielce.



Rys. 1. Schemat nanoszenia powłoki obróbką elektroiskrową

prądu elektrycznego przez materiał katody i anody zarówno w stanie stałym jak i po roztopieniu. Z energetycznego punktu widzenia energia pojedynczego impulsu jest wyrażona iloczynem natężenia i napięcia prądu oraz czasu impulsu. Osiągane gęstości mocy w tym procesie sięgają rzędu $0,1 \text{ MW/cm}^2$. Samo wyładowanie ma charakter chaotyczny, a dostarczanie energii odbywa się impulsowo. Przekazywanie ciepła do katody następuje pośrednio poprzez padające roztopione krople materiału anody, jak również drogą promieniowania od łuku wyładowania elektrycznego. Schemat nanoszenia powłoki obróbką elektroiskrową przedstawiono na rysunku 1.

Szczególnie interesująco przedstawia się możliwość wykorzystania obróbki laserowej do polepszenia właściwości powłok otrzymanych elektroiskrowo. Wiązka laserowa może zostać wykorzystana do wygładzania, kształtowania geometrii powierzchni, uszczelniania, ujednorodnienia składu chemicznego itd. naniesionych powłok.



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki prądowe urządzenia ELFA-541 (podziałka 10 mV-1A): a) $I=16\text{A}$, $T_i=20 \mu\text{s}$, $C=0,47 \mu\text{F}$, $f=10 \text{ kHz}$; b) $I=8 \text{ A}$, $T_i=20 \mu\text{s}$, $C=0,47 \mu\text{F}$, $f=5 \text{ kHz}$; c) $I=16 \text{ A}$, $T_i=8 \mu\text{s}$, $C=0,47 \mu\text{F}$, $f=12,5 \text{ kHz}$; d) $I=16 \text{ A}$, $T_i=3 \mu\text{s}$, $C=0,47 \mu\text{F}$, $f=33,38 \text{ kHz}$

Przewiduje się, że zaletami obróbki laserowej powłok elektroiskrowych będzie:

- poprawa gładkości powierzchni powłoki,
- zmniejszenie porowatości powłoki,
- poprawa przyczepności powłoki do materiału podłoża,
- zwiększenie odporności na zużywanie oraz zatarcie,
- powstanie na powierzchni naprężeń ściskających, co spowoduje podwyższenie wytrzymałości zmęczeniowej.

Celem pracy było określenie wpływu obróbki laserowej na własności powłok Ti i Mo otrzymanych elektroiskrowo. Ocenę własności powłok po obróbce laserowej przeprowadzono na podstawie pomiarów mikrotwardości i naprężeń własnych oraz badań odporności na zacieranie.

Materiały i aparatura stosowana w badaniach

Przedmiotem badań były powłoki niejednorodne Ti i Mo nakładane elektrodą o średnicy $\varnothing = 1$ mm metodą elektroiskrową na próbki ze stali C45, a następnie modyfikowane wiązką laserową.

Do nanoszenia powłok elektroiskrowych użyto urządzenia produkcji bułgarskiej, model ELFA-541. Możliwości kształtowania impulsów wyładowań iskrowych na tym urządzeniu przedstawiono na rysunku 2.

Na podstawie analizy charakterystyk prądowych oraz zaleceń producenta urządzenia, przyjęto następujące parametry nanoszenia powłok elektroiskrowych:

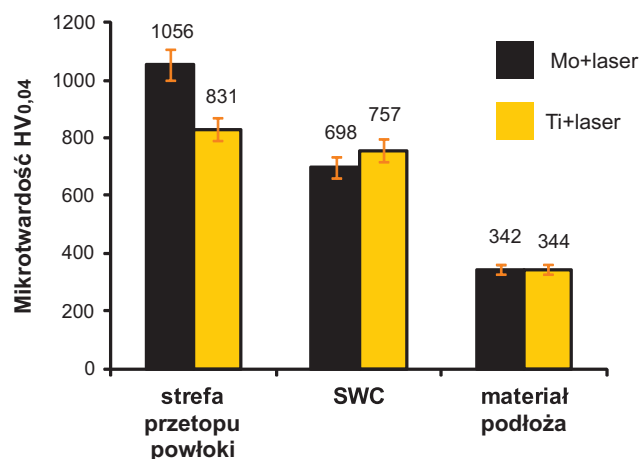
- natężenie prądu $I = 16$ A,
- prędkość przesuwu stołu $v = 0,7$ mm/s,
- prędkość głowicy wraz z elektrodą $n = 4200$ obr/min,
- liczba przejść powlekających $L = 2$,
- pojemność zespołu kondensatorów $C = 0,47$ μ F,
- czas impulsu $T_i = 8$ ms,
- czas przerwy między impulsami $T_p = 32$ μ s,
- częstotliwość $f = 25$ kHz.

Obróbkę laserową przeprowadzono laserem Nd:YAG (impulsowy tryb pracy), model BSL 720. W ramach badań wstępnych przyjęto następujące parametry obróbki:

- średnica plamki laserowej $d = 0,7$ mm;
- moc lasera $P = 20$ W;
- prędkość przemieszczania wiązki $v = 250$ mm/min;
- odległość od ogniska $\Delta h = 1$ mm;
- czas trwania impulsu $t_i = 0,4$ ms;
- częstotliwość powtarzania $f = 50$ Hz;
- przesuw wiązki $S = 0,4$ mm.

Pomiary mikrotwardości i naprężeń własnych

Pomiary mikrotwardości przeprowadzono metodą Vickersa, przy użyciu mikrotwardościomierza Hanemanna, stosując obciążenie 40 G. Odciski penetratorem wykonano w trzech strefach: strefie przetopu powłoki, strefie wpływu ciepła (SWC) oraz materiale rodzimym. Wyniki pomiarów mikrotwardości przedstawiono na wykresie (rys. 3).



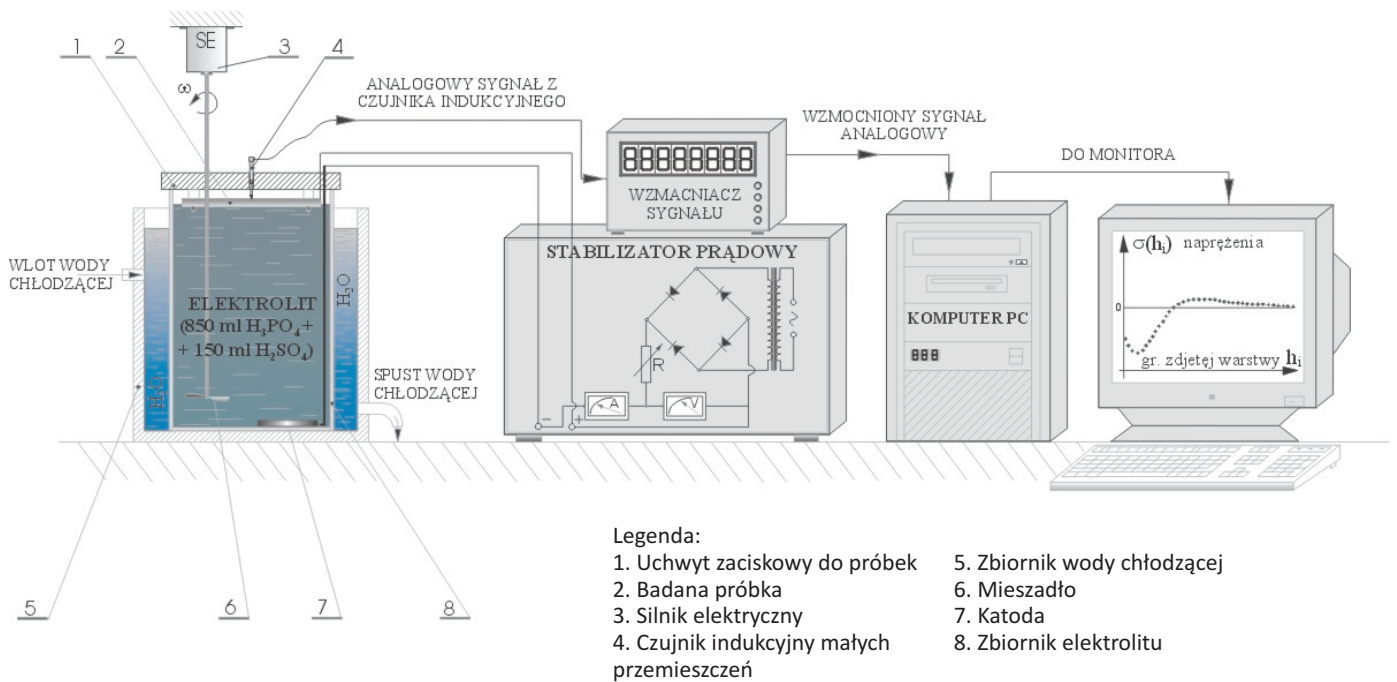
Rys. 3. Wyniki pomiarów mikrotwardości

Grubość przetopu powłok Mo i Ti wynosiła 15 ± 20 μ m, natomiast zasięg strefy wpływu ciepła w głąb materiału podłoża wyniósł od 30 do 40 μ m. Powłoki Mo i Ti nałożone elektroiskrowo posiadały grubość 8 ± 10 μ m, a SWC miała zasięg do około 30 μ m.

Modyfikacja powłok obróbką laserową spowodowała wzrost mikrotwardości w strefie przetopu i SWC w stosunku do powłok bez tej obróbki. Umocnienie obszaru w miejscach oddziaływania wiązki laserowej oraz w strefie wpływu ciepła było wynikiem przemian fazowych, które zachodzą w materiale nagrzanym podczas szybkiego nagrzewania, a następnie szybkiego chłodzenia.

Mikrotwardość materiału podłoża (stal C45) zarówno przed jak i po obróbce laserowej wynosiła średnio około 343 HV_{0,04}, natomiast powłoki Ti około 636 HV_{0,04} oraz powłoki Mo około 784 HV_{0,04}. W wyniku obróbki laserowej powłoki Mo uzyskano wzrost mikrotwardości do około 1056 HV_{0,04} (nastąpił wzrost mikrotwardości średnio o 35 % w stosunku do mikrotwardości powłoki Mo bez obróbki laserowej) oraz powłoki Ti do około 831 HV_{0,04} (nastąpił wzrost mikrotwardości średnio o 30% w stosunku do mikrotwardości powłoki Ti bez obróbki laserowej). Zastosowanie obróbki laserowej wpłynęło więc korzystnie na zmiany mikrotwardości powłok elektroiskrowych.

W dalszym etapie badań dokonano pomiarów naprężeń własnych powłok Mo i Ti po obróbce laserowej. Pomiary naprężeń własnych w/w powłok wykonano metodą Waismana-Phillipsa, która polega na usuwaniu kolejnych warstw materiału podczas trawienia elektrochemicznego. Jako elektrolit stosowano kompozycję stężonych kwasów (w odniesieniu do jednego dcm³), która składała się z 850 cm³ H₃PO₄ i 150 cm³ H₂SO₄, a gęstość prądu na trawionej próbce



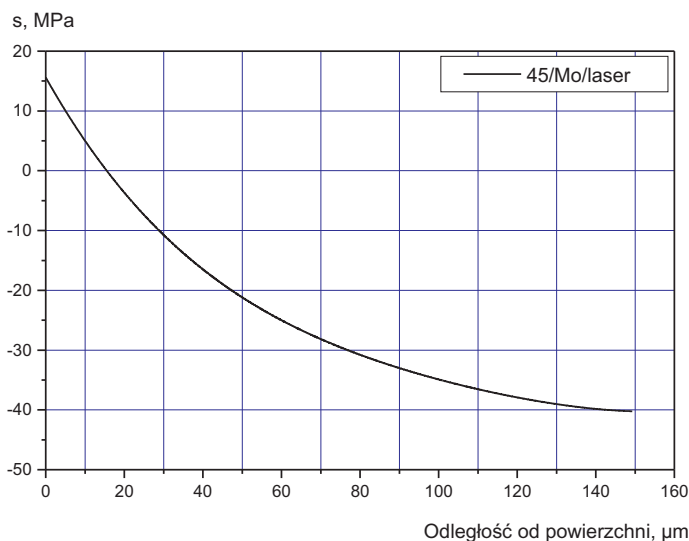
Rys. 4. Schemat stanowiska do pomiaru naprężeń własnych metodą Weismanna-Phillipsa

wynosiła około 1 A/cm². Schemat stanowiska do pomiaru naprężeń własnych przedstawiono na rysunku 4.

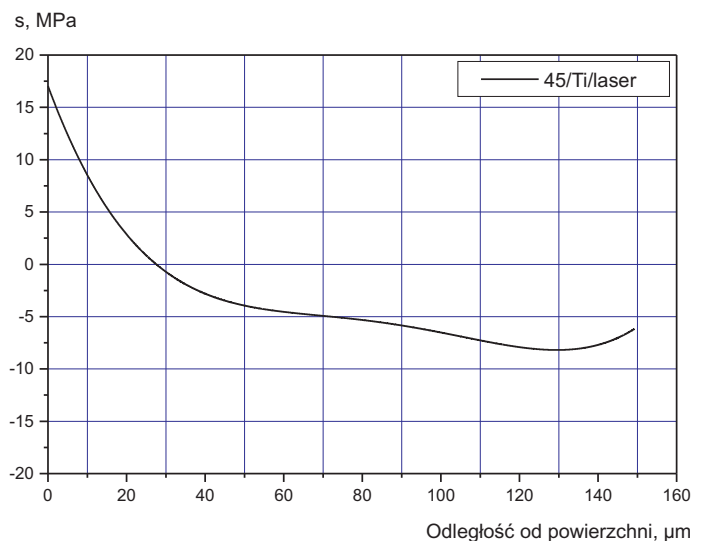
Obróbka laserowa powłok Mo i Ti spowodowała początkowo powstanie w warstwie wierzchniej (WW) naprężeń rozciągających, które łagodnie zmniejszają się w miarę zwiększania odległości od powierzchni i przechodzą w pewnym momencie w naprężenia ściskające. Początkowy stan naprężeń rozciągających w WW jest niekorzystny, ponieważ powoduje zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej materiału [2, 9]. Wystąpienie naprężeń rozciągających mogło być spowodowane przetopieniem powierzchni w/w powłok, natomiast naprężenia ściskające powstały na skutek zajścia przemiany martenzytycznej i mają związek z zastosowanym ma-

teriałem podłoża. Wyniki zmierzonych naprężeń własnych przedstawiono na przykładowych wykresach (rys. 5 i rys. 6).

Na otrzymanych przebiegach (rys. 5 i rys. 6) można zauważyć zmniejszenie wartości mierzonych naprężeń w głąb materiału. Na wykresie dotyczącym powłoki Mo po obróbce laserowej w odległości około 18 μm od powierzchni pojawiają się naprężenia ściskające, które osiągają maksymalną wartość – 40 MPa – na głębokości 150 μm. Inny przebieg mają naprężenia własne dotyczące powłoki Ti przetopionej laserowo, ponieważ dopiero na głębokości około 28 μm występują naprężenia ściskające i osiągają maksymalną wartość – 8 MPa w odległości od powierzchni około 130 μm.



Rys. 5. Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej powłoki Mo po obróbce laserowej



Rys. 6. Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej powłoki Ti po obróbce laserowej

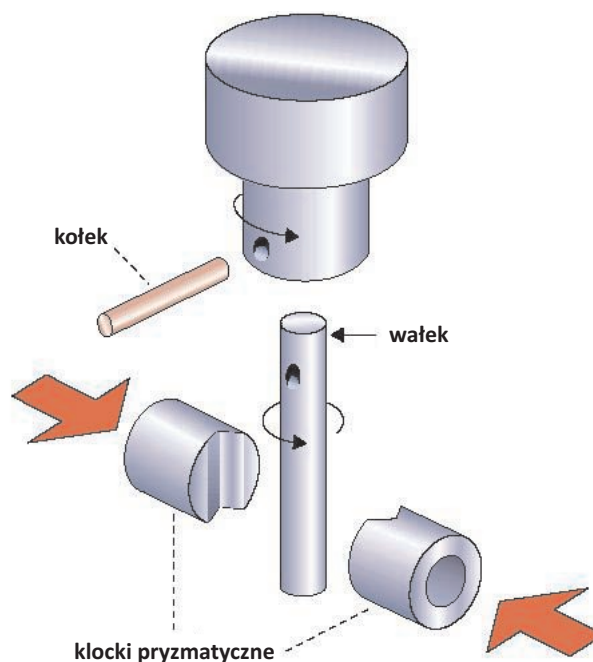
Maksymalne naprężenia rozciągające w WW przetopionych laserowo powłok Mo i Ti są porównywalne i wynoszą +16 MPa (powłoka Mo) oraz +14 MPa (powłoka Ti).

Badania odporności na zacieranie

Badania tribologiczne przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 377:2017-09/Ap1:2019-10. Zacieranie powierzchni trących w tego typu badaniach jest definiowane jako określenie maksymalnej siły nacisku działającej na obracającą się przeciwpróbkę w kształcie walca, ścisnącą przez dwie próbki pryzmatyczne (rys. 7), aż do chwili zniszczenia jednego z elementów (ścięcia kołka mocującego przeciwpróbkę lub zerwania przeciwpróbki). Do badań użyto tester T-09 typu wałek-pryzmy. Jako próbki stosowano pryzmy z naniesionymi powłokami Mo i Ti (nieobrobionymi i obrobionymi laserem), natomiast przeciwpróbką był wałek o średnicy $\varnothing = 6,3$ mm wykonany z hartowanej stali węglowej. Podczas testu stosowano smarowanie zanurzeniowe w oleju parafinowym.

Na przykładowych wykresach (rys. 8 i rys. 9) przedstawiono zarejestrowaną podczas testów zależność wartości siły obciążającej oraz siły tarcia w funkcji czasu. Przebiegi te są typowe dla próby zacierania na testerze T-09. Wzrostowi siły obciążającej towarzyszy odpowiedni wzrost siły tarcia.

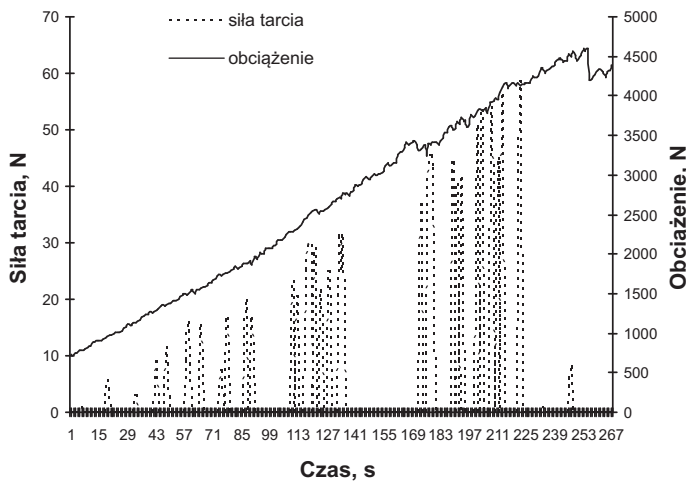
Zwiększanie wartości siły obciążającej parę ślizgową prowadzi w rezultacie do takiego wzrostu siły tarcia, która powoduje zerwanie kołka miedzianego i przerwanie próby.



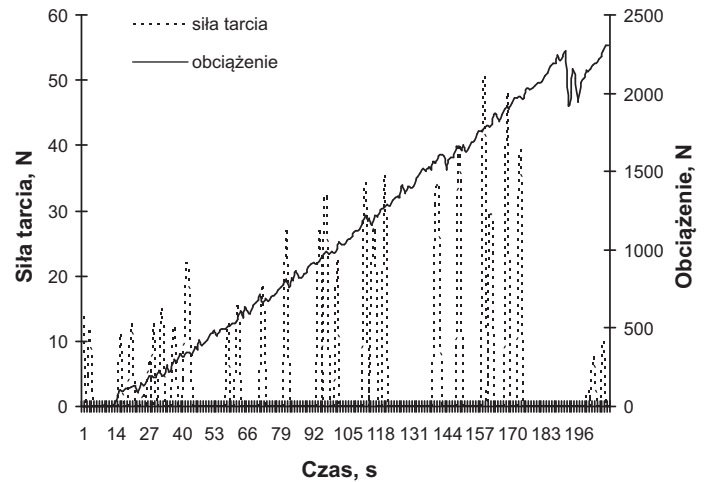
Rys. 7. Zasada działania testera T-09

Z zarejestrowanych wykresów można odczytać maksymalną wartość siły obciążającej, przy której następuje zatarcie oraz czas od początku próby.

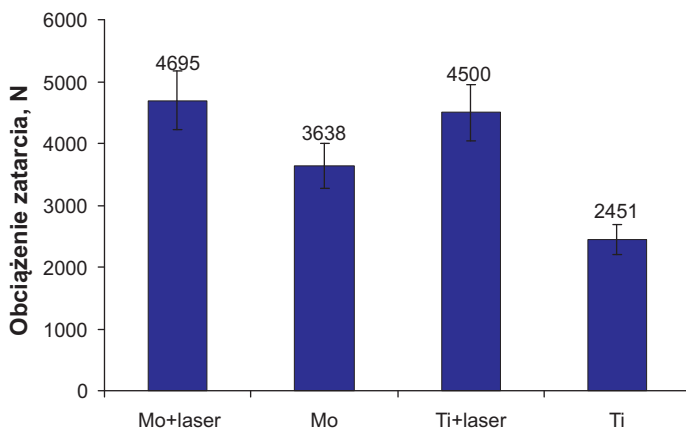
Na rys. 10 przedstawiono zbiorczą informację o średnich wartościach obciążenia zatarcia dla próbek przed i po



Rys. 9. Zależność siły tarcia i obciążenia w funkcji czasu powłoki Ti po obróbce laserowej



Rys. 8. Zależność siły tarcia i obciążenia w funkcji czasu powłoki Ti przed obróbką laserową



Rys. 10. Średnie wartości obciążenia zatarcia powłok Mo i Ti przed i po obróbce laserowej

naświetlaniu laserowym. Wynika z nich, że zastosowanie obróbki laserowej dla nałożonych elektroiskrowo powłok spowodowało zwiększenie siły obciążającej, powodującej zatarcie.

Wnioski

W wyniku analizy rezultatów przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- zastosowanie obróbki laserowej spowodowało zwiększenie mikrotwardości powłok elektroiskrowych. Dla powłoki Ti obrobionej laserem stwierdzono wzrost o 30%, natomiast dla próbek z powłoką Mo stwierdzono zwiększenie mikrotwardości o 35%, w porównaniu do próbek nie naświetlanych laserowo;
- naprężenia własne w warstwie wierzchniej próbek po obróbce laserowej początkowo są rozciągające, a w miarę zwiększania odległości od powierzchni przechodzą w ściskające. Należy poszukać optymalnych parametrów obróbki laserowej zapewniających powstanie naprężeń ściskających na całej głębokości WW, co spowoduje zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej;

– obróbka laserowa spowodowała wzrost siły obciążającej powodującej zatarcie badanych materiałów. Dla powłoki Mo obrobionej laserem stwierdzono wzrost o 29%, natomiast powłok Ti – o 83%, w stosunku do próbek z powłokami bez obróbki laserowej;

– w dalszym etapie celowym byłoby wykonanie badań składu fazowego oraz porowatości powłok elektroiskrowych przed i po obróbce laserowej.

Literatura

1. Antoszewski B., Radek N.: Elektroiskrowo nanoszone powłoki tytanowe i molibdenowe. Przegląd Spawalnictwa 8-10/2002.
2. Bogdanowicz Z.: Trwałość zmęczeniowa, przebieg pęknięcia i zużycie laserowo hartowanych elementów maszyn. Wojskowa Akademia Techniczna – Rozprawy – nr 2572, Warszawa 1999.
3. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
4. Galinov I.V., Luban R.B.: Mass transfer trends during electrospark alloying. Surface and Coatings Technology 79(1996), pp. 9-18.
5. Ozimina D., Scholl H., Styp-Rekowski M.: Model formowania przeciwzużyciowych warstw wierzchnich za pomocą obróbki elektroiskrowej. VII Konferencja Naukowo-Techniczna EM'03, Bydgoszcz-Rydzyna, 2003.
6. Petrow J. (red.): Elektroiskrowe legiowanie metalicznych powierzchni. Kiszyniew, 1985.
7. Radek N., Ozimina D., Antoszewski B.: Ocena własności eksploatacyjnych powłok elektroiskrowych. Przegląd Spawalnictwa, nr 11/2003.
8. Tarelnik W.: Technologia elektroiskrowego napawania. Technika, Kijów, 1997.
9. Waligóra W.: Odporność na zmęczenie powierzchniowe stali żelazowej poddanej obróbce laserowej. Politechnika Poznańska – Rozprawy – nr 302, Poznań 1994. ■