

Joanna RADZIEJEWSKA¹
Norbert RADEK²

ODPORNOŚĆ NA ZUŻYCIĘ ŚCIERNIE WARSTW WYTWARZANYCH METODĄ LASEROWO-MECHANICZNĄ

W pracy przedstawiono wyniki badań mikrostruktury materiału i odporności na zużycie ściernie warstw Stellitu wytworzonych metodą: natrysku plazmowego, stopowania laserowego oraz poprzez obróbkę hybrydową łączącą proces stopowania laserowego z nagniataniem powierzchniowym. Obróbkę laserowo-mechaniczną przeprowadzono dla przypadku laserowego stopowania stali 0N18N9 Stelitem 6. Do procesu stopowania wykorzystano wiązkę laserową CO₂ o mocy 2kW, nagniatanie powierzchniowe – mikro-młoteczkowanie prowadzono jednocześnie z modyfikacją laserową w podwyższonej temperaturze. Mikrostrukturę materiału analizowano na mikroskopie optycznym oraz na SEM. Określono wielkość strefy przetopionej i stopień zgniotu powierzchniowego. Do badań odporności na zużycie ściernie wykorzystano tester tribologiczny T-01M typu trzpień-tarcza. Stwierdzono dobrą odporność na zużycie warstw po obróbce hybrydowej.

1. WSTĘP

Warstwy ze Stellitów stosowane są z powodzeniem w warunkach eksploatacyjnych wymagających podwyższonych własności [1]. Odporność tych materiałów na zużycie i erozję zapewnia im odpowiednio dobrany skład chemiczny: wysoka zawartość takich pierwiastków jak: Cr, Co, Ni, W. Mikrostruktura materiału składa się z plastycznej osnowy i drobnodispersyjnych faz umacniających w postaci bardzo twardych wydzieleni głównie węglików. Oprócz mikrostruktury materiału i składu chemicznego głównymi czynnikami decydującymi o odporności na zużycie i erozję jest twardość i jednorodność warstwy wierzchniej. Lokalne niejednorodności mikrostruktury takie jak pory, pęknięcia oraz twarde wtrącenia powodują koncentrację naprężeń i lokalne przekroczenie granicy plastyczności, co może prowadzić do powstawania mikropęknięć i wykruszeń fragmentów materiału w trakcie eksploatacji. Od wielu lat poszukiwane są nowe metody wytwarzania tych warstw, które spełnią te wymagania. Do najczęściej stosowanych metod wytwarzania warstw Stellitów należą natryskiwanie cieplne, plazmowe, detonacyjne, a także obróbka laserowa.

¹ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

² Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Kielce

Modyfikacja warstwy wierzchniej metali i stopów wiązką laserową wykorzystywana jest w szeregu obróbkach powierzchniowych: stopowaniu laserowym, natapianiu, hartowaniu przetopieniowym. W wyniku przetopienia uzyskuje się zwykle ujednorodnienie WW, rozdrobnienie ziarna, wzrost twardości. Obróbki laserowe związane z topieniem generalnie prowadzą do wzrostu chropowatości i powstawania naprężeń rozciągających, co związane jest z procesami nagrzewania i chłodzenia ulepszonej warstwy [2].

Występowanie naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej w przypadku materiałów o niskiej przewodności cieplnej, takie jak Stellite, prowadzi do powstawania pęknięć w warstwie wierzchniej i może mieć niekorzystny wpływ na niektóre własności eksploatacyjne [3]. W pracy przedstawiono wyniki badań nad zastosowaniem metody hybrydowej łączącej proces stopowania laserowego stali Stelitem, wspomaganą nagniataniem powierzchniowym do wytwarzania warstw wierzchniej. Proces wygładzania powierzchni prowadzony był poprzez plastyczne odkształcenia warstwy wierzchniej w wysokiej temperaturze, a zmniejszenie naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej osiągnięto poprzez obróbkę plastyczną w zakresie niskich temperatur [4]. Przedstawiono wyniki badań mikrostruktury materiału oraz odporności na zużycie ścierne warstw wytworzonych nową hybrydową metodą.

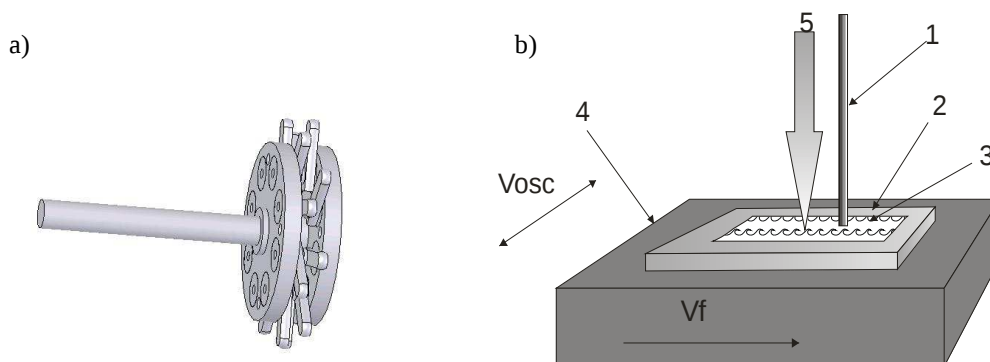
2. METODYKA BADAŃ

Hybrydową metodę obróbki laserowo-mechanicznej warstwy wierzchniej przeprowadzono dla przypadku laserowego stopowania stali 0N18N9 Stelitem 6. Warstwę Stellite 6 o grubości 0,25mm i składzie chemicznym: 45 % Co, 30% Cr, 13% W, 0,8% C naniesiono metodą natrysku plazmowego przed obróbką laserową. Określono optymalne parametry procesu laserowej obróbki, wykorzystując doświadczenia zebrane podczas wykonywania poprzednich prac [3],[5]. Badania wykonano wykorzystując laser CO₂ o mocy maksymalnej 2,5kW, generujący wiązkę osiowo-symetryczną o modzie bliskim TEM₁₀, która była ogniskowana soczewką ZnSe o ogniskowej 5". Dobierano układ parametrów obróbki: moc lasera, prędkość skanowania, średnicę zogniskowanej wiązki na powierzchni metalu, rodzaj gazu osłonowego i prędkość jego nadmuchu, zapewniając dostateczną gęstość mocy dla realizacji przetopienia i uzyskania optymalnych efektów.

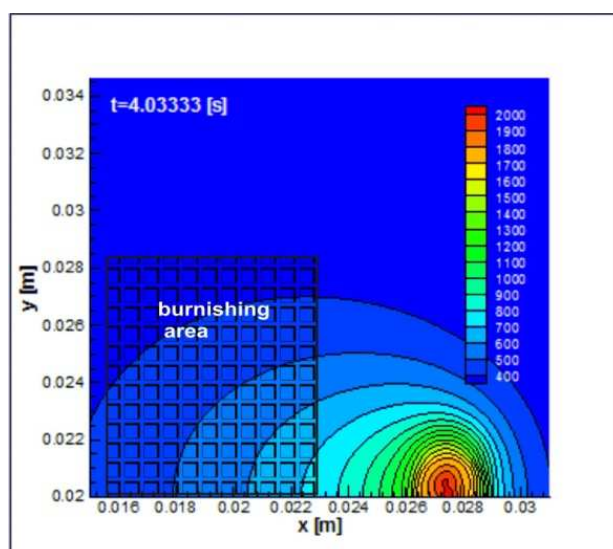
Powierzchniową obróbkę mechaniczną, prowadzono jednocześnie z laserowym przetapianiem, wykorzystując specjalnie skonstruowaną głowicę do mikro-młoteczkowania opisaną w pracy [4]. Jej konstrukcja, widoczna na rysunku 1a, umożliwia osiągnięcie korzystnej struktury geometrycznej powierzchni poprzez redukcję chropowatości i falistości oraz zmniejszenie naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej, występujących po przetopieniu WW [5]. Mikro-młoteczki rozmieszczono w dwóch rzędach tak, by pierwszy oddziaływał na warstwę pozostającą w wysokiej temperaturze i ją wygładzał, a drugi działając na warstwę o niższej temperaturze generował w niej naprężenia ściskające. Odległość elementu nagniatającego od osi wiązki laserowej wstępnie dobrano na podstawie obliczeń rozkładu temperatury na powierzchni materiału.

Schematyczny rysunek obróbki hybrydowej przedstawiono na rysunku 1b. Na rys. 2 przedstawiono rozkład temperatury na powierzchni próbki w osi ścieżki laserowej,

w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu próbki X . Próbka przetapiana była przy następujących parametrach obróbki laserowej: moc wiązki 2kW, średnica $d = 2,5\text{mm}$, $v = 360\text{mm/min}$. Zaznaczono obszar oddziaływania narzędzia nagniatającego. Nagniatanie realizowano w dwóch zakresach temperatur, 600 i 950K, co miało zapewnić odkształcenia plastyczne nierówności powierzchni i WW oraz na zimno w temperaturze poniżej 600K w celu wprowadzenia ściskających naprężeń własnych.



Rys. 1. Mikro-młoteczkowanie: a) głowica do mikro-młoteczkowania, b) schemat obróbki hybrydowej: 1-wiązka laserowa, 2-próbka, 3-scieżka laserowa, 4-stolik oscylacyjny, 5-głowica do mikro-młoteczkowania
Fig. 1. Micro-hammering: a) the head for micro-hammering, b) the scheme of hybrid treatment – b: 1-laser beam, 2-sample, 3-laser path, 4-oscillation table, 5-the head for micro-hammering



Rys. 2. Rozkład temperatury na powierzchni przetapianej wiązką laserową z zaznaczonym obszarem mikro-młoteczkowania

Fig. 2. The temperature distribution on laser treated surface with marked burnishing area

W celu oceny zmian strukturalnych wywołanych promieniowaniem laserowym wykonano zglądy metalograficzne na przekrojach prostopadłych do kierunku skanowania wiązką laserową. Mikrostrukturę materiału analizowano na mikroskopie optycznym oraz na SEM. Na podstawie obserwacji mikroskopowych określono kształt strefy przetopionej, jej

maksymalną głębokość i szerokość, rozmiary strefy wpływu ciepła oraz wielkość ziaren, a także skład fazowy. Przeprowadzono pomiary mikrotwardości na podstawie, których oszacowano stopień zgniotu powierzchniowego.

Do badań odporności na zużycie ściernie wykorzystano tester tribologiczny T-01M typu trzpień-tarcza. Jako próbki stosowano trzpień o średnicy ϕ 4mm wykonane ze stali 0H18N9, na które naniesiono powłoki stelliteowe różnymi metodami. Przeciwpórką był pierścień wykonany ze stali 100Cr6. Badania na testerze przeprowadzono przy następujących parametrach tarcia: prędkość liniowa $V = 0,8\text{m/s}$, czas próby $t = 3600\text{s}$, obciążenie $Q = 9,8; 14,7; 19,6\text{N}$, prędkość obrotowa $n = 546\text{obr/min}$, liczba obrotów $i = 32\,740\text{obr}$, droga tarcia $S = 2880\text{m}$.

Badania przeprowadzono dla warstwy wierzchniej po obróbce hybrydowej, polegającej na stopowaniu laserowym stali 0H18N9 stellite 6 i mikro-młoteczkowaniu przy zastosowaniu oscylacji. Obróbka hybrydowa prowadzona była przy następujących parametrach: moc wiązki laserowej 2kW, średnica wiązki 2,5mm, prędkość posuwu 360 mm/min, amplituda oscylacji 2mm, prędkość oscylacji 950osc/min. Nagniatanie prowadzono równocześnie z procesem stopowania. Stosowano prędkość obrotową głowicy 5000obr/min, jej odległość od osi wiązki wynosiła 6mm. W wyniku procesu uzyskano ścieżki laserowe o szerokości około 5mm, z których zostały wykonane trzpień do badań tribologicznych. Część próbek przed testami była szlifowana. Badania przeprowadzono dla następujących warstw wierzchnich:

- warstwa Stellite 6 naniesiona na stal 0H18N9 metodą natrysku plazmowego,
- warstwa Stellite 6 naniesiona na stal 0H18N9 metodą natrysku plazmowego i stopowana laserowo, powierzchnia szlifowana,
- warstwa Stellite 6 naniesiona na stal 0H18N9 metodą natrysku plazmowego, stopowana laserowo i mikro-młoteczkowana, powierzchnia szlifowana,
- warstwa Stellite 6 naniesiona na stal 0H18N9 metodą natrysku plazmowego, stopowana laserowo i mikro-młoteczkowana, powierzchnia surowa.

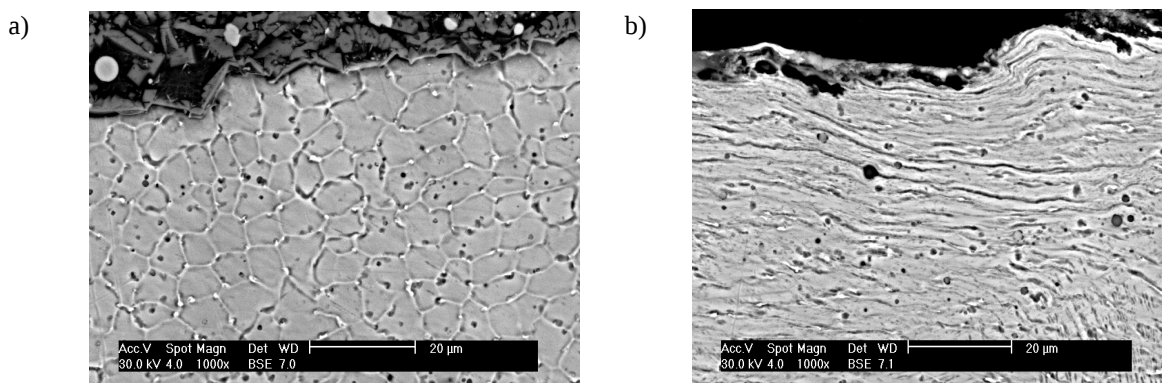
Dla wszystkich próbek zostały wykonane próby przy trzech obciążeniach 9,8; 14,7; 19,6N i identycznych czasach 3600s. Rejestrowano przebieg zmian siły tarcia oraz ubytku liniowego w czasie procesu. Na podstawie danych z pomiarów obliczono przebieg zmian współczynnika tarcia, jego wartość średnią oraz ubytek liniowy materiału.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. MIKROSTUKRURA MATERIAŁU

Rysunek 3a przedstawia mikrostrukturę stali 0H18N9 po stopowaniu laserowym Stellite 6 z oscylacjami, a rysunek 3b po stopowaniu przy identycznych parametrach i mikro-młoteczkowaniu. Zgniot powierzchniowy spowodował całkowitą przebudowę mikrostruktury materiału przy powierzchni. Ziarna materiału uległy deformacji plastycznej. Można zaobserwować silne spłaszczenie ziaren w kierunku działania siły nagniatającej. Nie występują pęknięcia ani wykruszenia. Stopień deformacji ziaren zmienia się wraz

z odległością od powierzchni. Największa deformacja występuje przy powierzchni, w odległości około $150\mu\text{m}$ od powierzchni materiału ziarno nie wykazuje już zmian kształtu w stosunku do materiału tylko stopowanego. W strefie środkowej przetopu mikrostruktura materiału jest analogiczna jak po stopowaniu laserowym. Występują ziarna dendrytyczne, drobne węgliki na granicach ziaren, oraz ciemne drobne wydzielenia. Strefa wtopienia jest analogiczna jak w przypadku wcześniej analizowanych próbek. Nie stwierdzono pęknięć oraz innych wad materiału świadczących o przekroczeniu zgniotu krytycznego.



Rys. 3. Mikrostruktura materiału warstwy wierzchniej: a) po stopowaniu, b) po obróbce hybrydowej
Fig. 3. The surface layer microstructure: a) after laser alloying, b) hybrid treatment

Mikrotwardość warstwy po stopowaniu laserowym połączonym z mikromłoteczkowaniem wynosi około 640HV przy powierzchni materiału i około 400HV przy dnie przetopu. Grubość strefy umocnienia mierzona przyrostem mikrotwardości wynosi około 0,5mm, a więc jest mniejsza od całkowitej grubości strefy przetopionej, która wynosi 0,62mm. Stopień zgniotu powierzchniowego określony na podstawie przyrostu mikrotwardości po nagniataniu w stosunku do materiału tylko stopowanego laserowego wynosi około 75%.

W wyniku obróbki hybrydowej następuje przebudowa struktury geometrycznej powierzchni. Proces ten wywołują dwa czynniki: pierwszy związany z wprowadzeniem oscylacji w trakcie krzepnięcia materiału, drugi z odkształceniem plastycznym warstwy wierzchniej i przebudową jej SGP w trakcie nagniatania w podwyższonych temperaturach. Po stopowaniu laserowym z oscylacjami parametr R_a wyniósł $4,3\mu\text{m}$ po obróbce hybrydowej $2\mu\text{m}$. Szczegółowe wyniki badań mikrostruktury materiału po obróbce hybrydowej zostały przedstawione w pracy [6].

3.2. BADANIA ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIE ŚCIERNE

W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów średnich wartości współczynników tarcia oraz ubytki wagowe materiału po czasie 3600s oraz ubytki liniowe po czasie 1500s dla różnych obciążeń. Zmiany współczynnika tarcia pomiędzy poszczególnymi próbami dla

danego obciążenia są niewielkie, jego wartość jest stabilna. Dla ubytków materiału zarówno wagowych jak i liniowych można stwierdzić duże różnice zmierzonych wartości dla siły 9,8N. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykładowe przebiegi zmian współczynnika tarcia oraz ubytków liniowych w trakcie pierwszej fazy (1000s) procesu dla obciążenia 19,6N. Moment stabilizacji procesu występuje po około 200 sekundach.

Analogicznie zostały przeprowadzone badania dla dwóch obciążeń 14,7 i 19,6N w warunkach tarcia technicznie suchego dla warstw Stellitu 6 naniesionego na stal 0H18N9 metodą natrysku plazmowego i stopowanego laserowo, z równoczesnym mikromłoteczkowaniem. W celach porównawczych wykonano identyczne badania dla warstwy Stellitu 6 naniesionego metodą natrysku plazmowego. W tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiarów średnich wartości współczynników tarcia oraz ubytki materiału po czasie 3600s.

Tabela 1. Współczynniki tarcia oraz ubytek materiału dla warstwy stali 0H18N9 stopowanej laserowo Stelitem 6, $P=2\text{kW}$, $d=3\text{mm}$, $V_f=360\text{mm/min}$, po próbach zużycia przy różnych obciążeniach

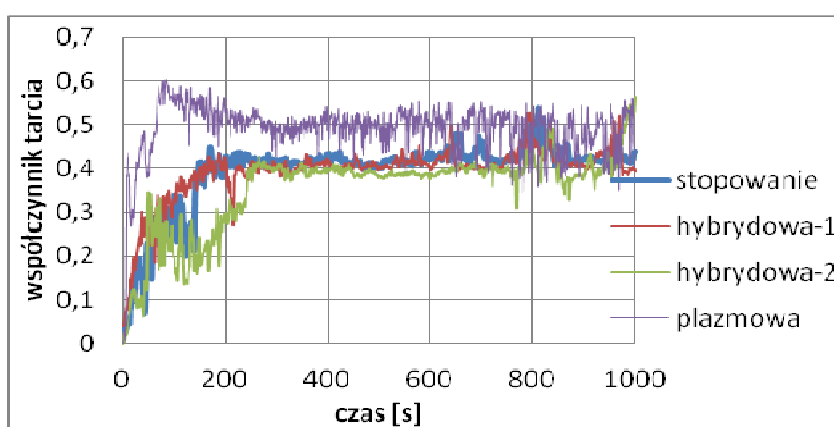
Table 1. Friction coefficient and material loss for surface layer of steel 304 alloyed with Stellite 6 after pin on disk test at different load, $P=2\text{kW}$, $d=3\text{ mm}$, $V_f=360\text{mm/min}$

Materiał	Obróbka	Nazwa próbki	Obciążenie [N]	Współczynnik tarcia	Ubytek materiału [g]	Ubytek
						Liniowy po 1500 s [μm]
0H19N9+Stellit6	stopowanie laserowe	SMN21a-1	9,8	0,713	0,006	31
		SMN21b-1		0,602	0,002	9
		SMN21c-1		0,503	0,007	60,7
		SMN21d-1		0,672	0,007	40,5
		SMN21śr-1		0,6225	0,0055	35,3
0H19N9+Stellit6	stopowanie laserowe	SMN21a-1.5	14,7	0,459	0,023	31
		SMN21b-1.5		0,456	0,025	181
		SMN21c-1.5		0,597	0,032	141
		SMN21d-1.5		0,57	0,004	
		SMN21śr-1.5		0,5205	0,021	118
0H19N9+Stellit6	stopowanie laserowe	SMN21a-2	19,6	0,408	0,072	503
		SMN21b-2		0,441	0,082	498
		SMN21c-2		0,432	0,067	393
		SMN21d-2		0,431	0,076	432
		SMN21śr-2		0,428	0,074	456

Wszystkie powierzchnie po stopowaniu laserowym i obróbce hybrydowej wykazują mniejsze współczynniki tarcia w zakresie badanych obciążeń 9,8; 14,7; 19,6N w stosunku do powierzchni z warstwą Stellitu natryskiwaną plazmowo. Po stopowaniu laserowym wartość współczynnika tarcia wynosi 0,4-0,6, podobnie jak dla powierzchni po obróbce hybrydowej. Dla warstwy Stellitu 6 natryskiwanej plazmowo współczynnika tarcia wynosi około 0,7. Różnice w przebiegu procesu zużycia i średnimi wartościami współczynników tarcia dla powierzchni po stopowaniu laserowym i obróbce hybrydowej są niewielkie.

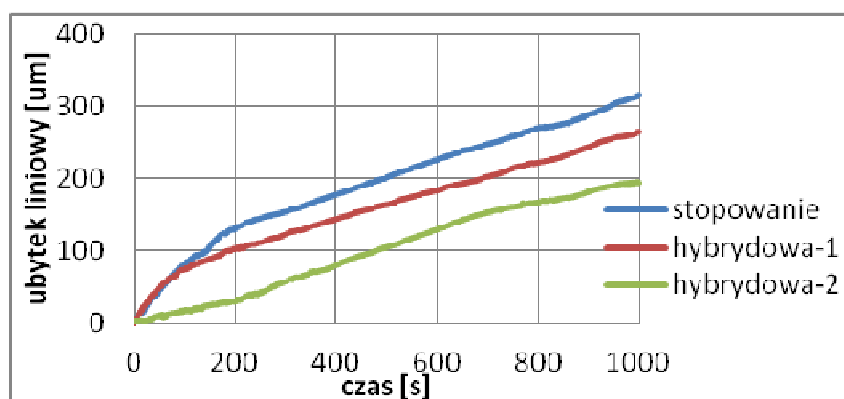
Tabela 2. Współczynniki tarcia oraz ubytek materiału warstw Stellitu 6 stopowanego laserowo i mikro-młoteczkowanego oraz natryskiwanego plazmowo w próbach zużyciowych przy różnych obciążeniach
 Table 2. Friction coefficient and material loss for surface layer of steel 304 alloyed with Stellite 6 and micro-hammering and plasma sprayed Stellite 6 layer after pin on disk test at different load

Materiał	Obróbka	Obciążenie [N]	Współczynnik tarcia	Ubytek materiału [g]	Ubytek liniowy [μm]
OH19N9+Stellit 6	Hybrydowa powierzchnia szlifowana	9,8	0,66	0,012	64
		14,7	0,61	0,009	167
		19,6	0,49	0,013	360
	Hybrydowa	14,7	0,58	0,01	57
		19,6	0,47	0,044	209
	Natrysk plazmowy	9,8	0,71	0,011	95
		14,7	0,67	0,016	62
		19,6	0,68	0,022	176



Rys. 4. Zmiany współczynnika tarcia w trakcie próby zużyciowej przy obciążeniu 19,6N: dla powierzchni: po stopowaniu laserowym, po obróbce hybrydowej powierzchnia szlifowana - 1, tylko po obróbce hybrydowej - 2, po natrysku plazmowym

Fig. 4. The friction coefficient changes during wear testing by load of 19,N: for a surface after laser alloyed, for hybrid machining of grinding surface – 1, for hybrid machining only - 2, plasma sprayed



Rys. 5. Przebieg zmian przemieszczenia w trakcie próby zużyciowej przy obciążeniu 19,6N: dla powierzchni: po stopowaniu laserowym, po obróbce hybrydowej powierzchnia szlifowana - 1, po obróbce hybrydowej - 2

Fig. 5. Changes of displacement during wear test by load of 19,6N: for a surface after laser alloyed, for hybrid machining of grinding surface – 1, for hybrid machining only - 2,

Przebieg zmian współczynnika tarcia wskazuje, że w trakcie procesu występuje zużycie adhezyjne dla wszystkich badanych powierzchni. Najniższa wartość współczynnika tarcia występuje dla powierzchni po obróbce hybrydowej nieszlifowanej. Powierzchnia ta wykazuje również mniejsze zużycie liniowe. Powierzchnie szlifowane po stopowaniu i obróbce hybrydowej wykazują zbliżone wartości współczynników tarcia i ubytki liniowe, co jest związane z usunięciem części warstwy stekstrowanej o najwyższej twardości w trakcie szlifowania.

4. WNIOSKI

Analiza wyników badań wskazuje, że w wyniku obróbki laserowej wspomaganą mikro-młoteczkowaniem występuje niewielki wzrost odporności na zużycie ścierne w stosunku do warstw Stellite tylko stopowanych oraz natryskiwanych plazmowo. W warunkach tarcia technicznie suchego jest to zjawisko dosyć rzadkie, gdyż w wielu przypadkach stwierdzano spadek odporności na zużycie ścierne po nagniataniu powierzchniowym ze względu na silne zużycie adhezyjne [7]. W przypadku powierzchni po obróbce hybrydowej można zaobserwować występowanie tego zjawiska przy dłuższym czasie trwania procesu. Różnice wartości współczynnika tarcia pomiędzy powierzchniami stopowanymi laserowo i po obróbce hybrydowej są niewielkie. Analiza wyników w początkowym etapie eksperymentu wskazuje na niekorzystny wpływ procesu szlifowania na przebieg zużycia. W początkowym stadium najmniejsze ubytki stwierdza się dla warstwy po obróbce hybrydowej nie poddanej szlifowaniu, pomimo wyższych wysokości nierówności w stosunku do powierzchni szlifowanej.

LITERATURA

- [1] ABBAS G., WEST D.R., 1991, *Laser Surface Cladding of Stellite and Stellite-SiC Composite Deposits for Enhanced Hardness and Wear*, Wear, 143, 239-246.
- [2] YAO M.X. WU J.B.J., XIE Y., 2005, *Wear, corrosion and cracking resistance of some W-or Mo containing alloys*, Materials Science and Engineering, A 407, 234-244.
- [3] GRIPENBERG H., et al., 2004, *Prediction and Measurement of Residual Stresses in Cladded Steel*, Materials Science Forum, 404-407, 861-866.
- [4] RADZIEJEWSKA J., KALITA W., BARTOSZEWICZ A., 2005, *Modification of surface layer properties by laser alloying combined with burnishing*, Proc. of Int. Conference on "Laser Technologies in Welding and Material Processing", Katsiveli, Ukraine, May 23-27, 214-217.
- [5] RADZIEJEWSKA J., SKRZYPEK, S., 2009, *Microstructure and residual stresses in surface layer of simultaneously laser alloyed and burnished steel*, J of Materials Processing Technology, 209, 456-463.
- [6] RADZIEJEWSKA J., KALITA W., 2009, *Badanie wpływu parametrów obróbki hybrydowej na mikrostrukturę warstwy wierzchniej*, Przegląd Spawalnictwa, 10, 43-49.
- [7] PRZYBYLSKI W., 1987, *Technologia obróbki nagniataniem*, WNT, Warszawa.

WEAR RESISTANCE OF SURFACE LAYER AFTER LASER-MECHANICAL TREATMENT

The paper presents study of microstructure and siding wear test of Stellite layers produced by plasma sprayed, laser alloying and new hybrid laser-mechanical method. The combining the laser alloying with the burnishing process, both

performed at the laser set up, was proposed in order to reduce surface roughness, being formed during the laser treatment, and to reduce residual stresses. The experiments were done on stainless steel, alloyed with Stellite 6, and simultaneously burnished in hot and cold conditions in one operation. The alloying process was performed with continuous CO₂ laser at power 2kW. The micro-hammering process reconstructed the surface topography and caused plastic deformation of surface layer. The study of material microstructure and wear test pin on disk method were done. The study showed that laser-mechanical treatment improves wear resistance compared to laser alloyed and thermal sprayed Stellite 6 layers.