

Miesięcznik
Naukowo-Techniczny

Nr 10/2009

przeгляд **SPAWALNICTWA**

Rok założenia 1928

PL ISSN 0033-2364

Index 37125

Cena 16 zł

51. Krajowa Naukowo-Techniczna
Konferencja Spawalnicza

POSTĘP W SPAWALNICTWIE

Bezpieczeństwo Techniczne,

Materiały, Urządzenia, Technologie

Dębe k. Warszawy 22-24 października 2009



Badania wpływu parametrów obróbki hybrydowej na mikrostrukturę warstwy wierzchniej

Investigations of influence of hybrid machining parameters on microstructure of the surface layer

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań nad nową hybrydową obróbką łączącą proces stopowania laserowego i nagniatania powierzchniowego. Oba procesy były realizowane jednocześnie na stanowisku laserowym wyposażonym w laser CO₂ o mocy 2,5 kW i głowicę do nagniatania dynamicznego. Badania przeprowadzono dla przypadku stopowania stali nierdzewnej staliem 6. Analizowano wpływ najważniejszych parametrów obróbki laserowo-mechanicznej na mikrostrukturę i mikrotwardość warstwy wierzchniej. Uzyskano związki funkcyjne pomiędzy parametrami obróbki a grubością strefy zgniotu i przyrostem mikrotwardości warstwy wierzchniej.

Abstract

In this article results of investigations concerning the new hybrid machining which combines a process of laser alloying and surface burnishing was presented. Both processes were at the same time realized on a laser stand equipped with a laser CO₂ of power of 2.5 kW and a head for dynamic burnishing. Investigations were made for a case of alloying the stainless steel with stellite 6. Influence of the most important parameters of laser-mechanical working to microstructure and microhardness of the surface layer was analysed. Function dependencies between parameters of working and the thickness of the work-hardening zone and an increment of the surface layer microhardness were obtained.

Wstęp

Najczęściej stosowanymi sposobami modyfikacji warstwy wierzchniej metali wiązką laserową jest hartowanie i stopowanie. Zalety tych procesów są następujące: możliwość lokalnej obróbki, wysoka wydajność procesów, szerokie możliwości sterowania składem chemicznym, strukturą warstwy wierzchniej i właściwościami użytkowymi elementów maszyn [1, 2]. Po przetopieniu laserowym na ogół występują w warstwie wierzchniej duże naprężenia rozciągające, prowadzące w skrajnych przypadkach do powstawania mikropęknięć [3, 4]. Podczas tych obróbek występują również niekorzystne zmiany struktury geometrycznej powierzchni, tworzenie falistości i chropowatości powierzchni o stosunkowo dużych wysokościach nierówności [5, 6], co wiąże się z koniecznością stosowania dodatkowej obróbki mechanicznej w celu poprawy gładkości powierzchni. Najczęściej stosowanym zabiegiem po obróbce laserowej, zapewniającym wymaganą, niską chropowatość powierzchni i dokładność wymiarową jest szlifowanie, które w wielu przypadkach może dodatkowo oddziaływać niekorzystnie na stan warstwy wierzchniej. Operacja ta powoduje zmianę własności

mechanicznych warstwy wierzchniej (WW), a także usunięcie części zmodyfikowanej laserowo warstwy.

Analiza możliwości modyfikacji stanu WW po stopowaniu laserowym (SL) wykazała, że jedną z najbardziej efektywnych metod modyfikacji stanu WW po SL powinna być obróbka powierzchniowa zgniotem.

Proces mechanicznego kształtowania struktury geometrycznej powierzchni (SGP) obróbką powierzchniową zgniotem jest bardziej efektywny w wysokich temperaturach, gdy materiał jest plastyczny. Do tej pory brak jest publikacji o kształtowaniu struktury geometrycznej powierzchni hybrydową obróbką laserowo-mechaniczną (LM) (za pomocą odkształceń plastycznych na gorąco), jakkolwiek proces nagrzewania laserowego z powodzeniem stosowany jest do wspomagania obróbki skrawaniem materiałów trudno obrabialnych [7].

Z tego względu w IPPT PAN podjęto badania nad zastosowaniem hybrydowej metody łączącej proces przetapiania laserowego z procesem dynamicznego nagniatania powierzchniowego. Proces wygładzania powierzchni prowadzono przez plastyczne odkształcenia warstwy wierzchniej w wysokiej temperaturze, a proces transformacji naprężeń WW z rozciągających w ściskające również za pomocą obróbki plastycznej w zakresie niskich temperatur.

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących nowej hybrydowej metody laserowego stopowania powierzchni w połączeniu z dynamiczną obróbką powierzchniową zgniotem – mikromłoteczkowaniem.

Dr inż. Joanna Radziejewska, dr inż. Wojciech Kalita – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN Warszawa.

Opis eksperymentu

Celem badań było znalezienie optymalnych parametrów obróbki laserowo-mechanicznej pozwalających na uzyskanie korzystnej mikrostruktury materiału warstwy wierzchniej oraz wprowadzenie umocnienia i naprężeń ściskających przy równoczesnym zmniejszeniu wysokości chropowatości powierzchni.

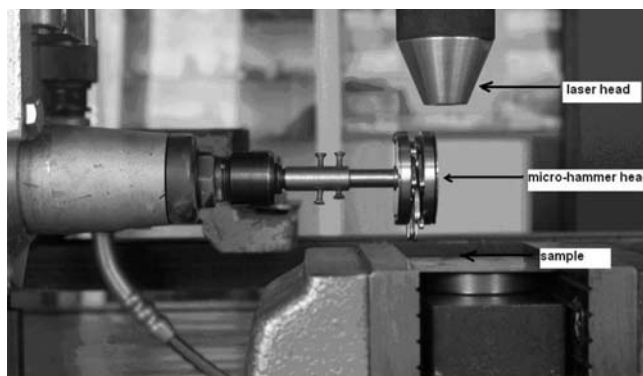
W pierwszym etapie badań określono optymalne zakresy parametrów procesu obróbki laserowej, wykorzystując wcześniejsze doświadczenia [2, 3]. Kryteriami optymalizacji były: głębokość przetopienia, chropowatość powierzchni i wynikowa twardość warstwy wierzchniej. Badania wykonano, wykorzystując laser CO₂ o mocy maksymalnej 2,5 kW generujący wiązkę osiowoosymetryczną 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, zapewniające dostateczną gęstość mocy do realizacji przetopienia i uzyskania optymalnych efektów. Powierzchnię metalu pokrywano cienką warstwą absorbera.

Proces stopowania realizowano dla stali 0H18N9 na powierzchni, której przed obróbką została nałożona warstwa stellite kobaltowego o grubości ok. 200 μm metodą natryskiwania plazmowego. Badania wstępne wykazały, że proces stopowania w tym przypadku przebiega najkorzystniej przy następujących parametrach: moc lasera 2 kW, średnica wiązki laserowej 3 mm, prędkość posuwu próbki względem wiązki laserowej w zakresie 150÷900 mm/min. Proces nagniatania był realizowany na stanowisku laserowym jednocześnie z procesem stopowania. Zastosowano proces nagniatania dynamicznego mikromłoteczkami. Technologia mikromłoteczkowania została oparta na dynamicznym nagniataniu odśrodkowym. Opracowano wysokoobrotową głowicę do mikromłoteczkowania, zapewniającą możliwość obróbki bezpośrednio na stanowisku do obróbki laserowej. Obróbka tą głowicą polega na cyklicznym uderzaniu w obrabianą powierzchnię przez elementy nagniatające. Podstawowymi elementami głowicy są:

- korpus w postaci podwójnej tarczy z trzpieniem mocującym głowicę w uchwycie szlifierki,
- mikromłoteczki zamocowane obrotowo na osiach usytuowanych w odległości r od osi obrotu głowicy,
- osie mikromłoteczek wykonane z igieł łożyskowych, mocowane w elastycznych wkładkach,
- tarcze chroniące głowicę przed oddziaływaniem termicznym,
- elementy zderzakowe wykonane z elastycznego materiału.

Mikromłoteczki wykonane są ze stali ŁH15, a ich część robocza w zależności od wariantu ma promień zaokrąglenia $r = 1,0 \div 1,5$ mm. Rozłożone są one równomiernie pomiędzy tarczami korpusu głowicy i zamocowane obrotowo na osiach, co umożliwia ich ruch wahadłowy względem głowicy oraz obrotowy wraz z głowicą. Dzięki niewielkim rozmiarom głowicy (o średnicy 30 mm) umożliwia ona obróbkę powierzchni płaskich oraz krzywoliniowych o niewielkich rozmiarach. Głowica została zaprojektowana z przeznaczeniem do obróbki gładkościowej i umacniającej części przetapianych laserowo. Szczegółowy opis głowicy oraz opis wyników badań dla hartowania przetopieniowego stali przedstawiono w pracy [8].

W celu uzyskania bardziej równomiernego zgniotu powierzchniowego zastosowano ruch oscylacyjny próbki w kie-



Rys. 1. Stanowisko do laserowo-mechanicznej obróbki hybrydowej
Fig. 1. Stand for laser-mechanical hybrid machining

runku prostopałym do kierunku posuwu, który realizowano za pomocą stolika oscylacyjnego. Pozwoliło to również na uniknięcie powstawania niekorzystnej struktury geometrycznej powierzchni, w postaci rowków, która występowała podczas obróbki bez ruchu oscylacyjnego w wyniku wielokrotnego oddziaływania najdłuższych mikromłoteczek z tym samym fragmentem obrabianej powierzchni [8].

Głowica do mikromłoteczkowania została zamontowana w uchwycie szlifierki, która wraz zespołem do regulacji położenia głowicy połączona jest ze stanowiskiem do obróbki laserowej (rys. 1).

Stanowisko umożliwia sterowanie w szerokim zakresie następujących parametrów obróbki mechanicznej:

- siły oddziaływania narzędzia na powierzchnię przez regulację prędkości obrotowej głowicy i jej odległości od obrabianej powierzchni,
- temperatury obróbki mechanicznej przez zmianę odległości miejsca oddziaływania mikromłoteczek od osi wiązki laserowej,
- intensywności obróbki powierzchniowej zgniotem przez regulację prędkości posuwu próbki – v_f oraz prędkości obrotowej mikromłoteczek – v_{obr} .

Przed badaniami zasadniczymi przeprowadzono próby wyznaczenia optymalnych ustawień narzędzia w stosunku do powierzchni obrabianej.

Metodyka badań

Badania stanu WW są bardzo pracochłonne i z tego względu określenie wpływu warunków obróbki na stan WW przeprowadzono w oparciu o teorię eksperymentu planowanego, która umożliwia minimalizację liczby doświadczeń [9]. W badaniach przeprowadzono eksperyment planowany w oparciu o program statyczny, zdeteminowany, wieloczynnikowy, rotatabilny z powtórzeniami PS/DS-λ.

Wyboru wielkości wykonywano oraz przedziałów ich zmienności dokonano na podstawie wyników badań wstępnych procesu obróbki laserowo-mechanicznej, przyjmując za dodatkowe kryterium ich przydatność do sterowania LM obróbką hybrydową.

Jako zmienne wejściowe, mierzalne i sterowalne, charakteryzujące model matematyczny obiektu badań, przyjęto następujące wielkości:

- prędkość obrotową głowicy nagniatającej – v_{obr} ,
- prędkość posuwu próbki – v_f ,
- odległość głowicy nagniatającej od osi wiązki laserowej – X .

Jako czynniki wyjściowe charakteryzujące stan warstwy wierzchniej oraz efekty obróbki hybrydowej przyjęto:

- zmianę mikrotwardości WW w stosunku do mikrotwardości WW po stopowaniu laserowym,
- grubość strefy zgniotu,
- stosunek grubości strefy zgniotu do grubości strefy przetopienia.

Na podstawie badań wstępnych wyznaczono obszary zmienności parametrów obróbki i określono przedziały zmienności wielkości wejściowych, dla których przyjęto oznaczenia:

$$x_k; \quad k = 1, 2, \dots, i;$$

$$x_k \in [x_{k \min}, x_{k \max}]$$

gdzie: x_k – wielkość wejściowa, i – liczba wielkości wejściowych, $i = 3$.

Oznaczenia i wartości przedziałów zmienności wartości wejściowych dla eksperymentu przy hybrydowej obróbce stopowaniem stali stellite 6 zawiera tablica I.

Tablica I. Zakres zmienności parametrów obróbki laserowo-mechanicznej przy stopowaniu stali 0H18N9 stellite 6

Table I. Range of parameters variation of laser-mechanical working when alloying the 0H18N9 steel with stellite 6

i	Wielkość wejściowa	Oznaczenie zmiennej	Przedział zmienności		Jednostki
			$X_{k \min}$	$X_{k \max}$	
1	V_{obr}	X1	3500	7100	obr /min
2	V_f	X2	150	900	mm/min
3	X	X3	5	10	mm

Przyjęto pięciopozomowy program badań i przedział normowania $[-\alpha, \alpha]$; $\alpha = 2$, odpowiadający ramionom gwiazdnym planu PS/DS- λ oraz następujące oznaczenia wielkości kodowych zmiennych niezależnych:

$$x_k \equiv X_k \equiv Xk; \quad x_k \equiv Xk \in [-\alpha, \alpha]$$

Obliczono odpowiadające im wartości parametrów wejściowych dla poszczególnych układów czynników według następujących zależności:

$$x_k = \exp \left[\frac{\ln x_{k \min} + \ln x_{k \max}}{2} + \frac{\ln x_{k \max} - \ln x_{k \min}}{2\alpha} \alpha_k \right]$$

gdzie: $\alpha_k = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$ oznacza promień aktualnego ramienia przestrzeni badanej – wartość kodu, α – promień ramienia gwiazdnego dla eksperymentu 3-czynnikowego $\alpha = 2$.

Tablica II. Wartości zmiennych wejściowych eksperymentu obróbki hybrydowej stali stopowanej stellite 6

Table II. Values of input variables of the experiment of hybrid machining of steel alloyed with stellite 6

	-2	-1	0	1	2
X1	3500	4200	5000	5950	7100
X2	150	235	367	574	900
X3	5	6	7	8,5	10

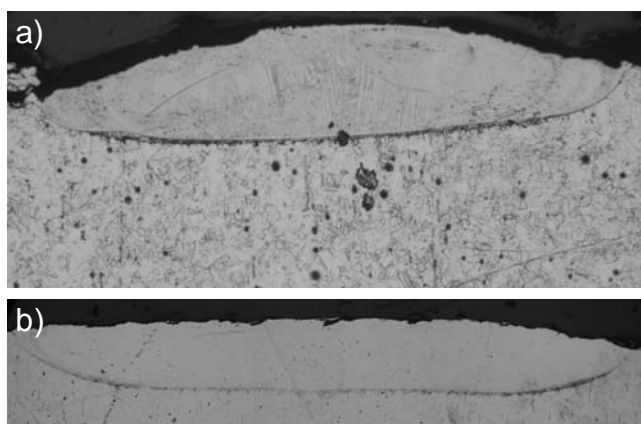
Wyniki badań

Mikrostruktura i wielkość strefy stopowej

Analizę mikrostruktury oraz pomiary wielkości strefy przetopionej wykonano na mikroskopie optycznym przy po-

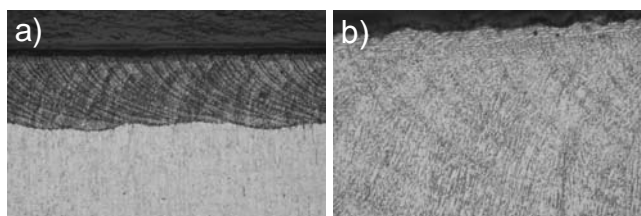
większeniach od 50 do 1000x. W tym celu wszystkie próbki po obróbce laserowej oraz laserowo-mechanicznej zostały przecięte prostopadle do powierzchni obrabianej i wykonano zgłady metalograficzne w kierunku prostopadłym do kierunku posuwu, a dla wybranych próbek również w kierunku równoległym do posuwu próbki.

Badania mikrostruktury wykazały, że zarówno po stopowaniu, jak i obróbce hybrydowej warstwa wierzchnia jest jednorodna, wolna od porów i mikropęknięć. Występuje bardzo drobna struktura dendrytyczna, ukierunkowana zgodnie z kierunkiem odprowadzenia ciepła. Wprowadzenie oscylacji spowodowało wzrost szerokości strefy przetopionej w stosunku do próbek stopowanych bez oscylacji o wartość amplitudy oscylacji. Na rysunku 2a widoczna jest WW po stopowaniu z prędkością 900 mm/s, a na rysunku 2b przy tych



Rys. 2. a – warstwa wierzchnia po stopowaniu laserowym stali 0H18N9 stellite 6 przy parametrach obróbki: P = 2 kW, d = 3 mm, v = 900 mm/min. Powiększenie 50X; b – warstwa wierzchnia po stopowaniu laserowym stali 0H18N9 stellite 6 przy parametrach obróbki: P = 2 kW, d = 3 mm, v = 900 mm/min z zastosowaniem oscylacji w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu. Powiększenie 50x

Fig. 2. a – surface layer after the laser alloying of the steel 0H18N9 with stellite 6 at the following working parameters: P = 2 kW, d = 3 mm, v = 900 mm/min. Magnification amounts to 50X; b – surface layer after the laser alloying of the steel 0H18N9 with stellite 6 at the following working parameters: P = 2 kW, d = 3 mm, v = 900 mm/min with use of oscillations perpendicular to the movement direction. Magnification amounts to 50x

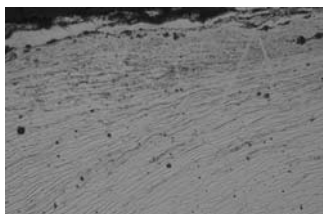


Rys. 3. Warstwa wierzchnia po stopowaniu laserowym stali 0H18N9 stellite 6 przy parametrach obróbki: P = 2 kW, d = 3 mm, v = 150 mm/min z zastosowaniem oscylacji. Przekrój równoległy do kierunku ruchu próbki: a – powiększenie 50X; b – powiększenie 200X.

Fig. 3. Surface layer after the laser alloying of the steel 0H18N9 with stellite 6 at the following working parameters: P = 2 kW, d = 3 mm, v = 150 mm/min with use of oscillation. Section is parallel to direction of travelling of a sample: a – magnification amounts to 50X; b – magnification amounts to 200X

samych parametrach obróbki z oscylacjami. Zastosowanie oscylacji spowodowało również, że WW ma bardziej jednorodną grubość. Analiza zglądów metalograficznych wykonanych równolegle do kierunku posuwu wykazała, że grubość strefy przetopienia jest stała i tylko w przypadku obróbki przy najniższych prędkościach – 150 mm/min można zaobserwować niewielkie zmiany grubości przetopu związane z zafalowaniami dna strefy przetopienia (rys. 3).

Proces mikromłoteczkowania spowodował pojawienie się przy powierzchni strefy stekstrowanej, a przy powierzchni widoczne są zgniecione ziarna materiału (rys. 4). Stopień zgniotu jest największy przy powierzchni i wraz ze wzrostem odległości maleje. W zależności od parametrów procesu na-



Rys. 4. Warstwa wierzchnia po obróbce hybrydowej stali 0H18 N9 stellite 6 przy parametrach obróbki: P = 2 kW, d = 3 mm, v = 230 mm/min z zastosowaniem oscylacji i nagniatanej dynamicznie. Przekrój prostopadły do kierunku posuwu próbki. Powiększenie 400x

Fig. 4. Surface layer after the laser alloying of the steel 0H18N9 with stellite 6 at the following working parameters: P = 2 kW, d = 3 mm, v = 230 mm/min with use of oscillation and dynamically burnished. Section is perpendicular to direction of travelling of a sample. Magnification amounts to 400x

Tablica III. Parametry obróbki laserowo-mechanicznej oraz wymiary warstwy wierzchniej

Table III. Parameters of laser-mechanical working and dimensions of the surface layer

Nr	Parametry obróbki			Wymiary warstwy stopowej		Grubość strefy zgniotu
	v _{obr} obr/min	v _f mm/min	X mm	grubość mm	szerokość mm	
1	4200	230	6	0,73	4,51	0,58
2	5950	230	6	0,74	4,56	0,85
3	4200	570	6	0,46	4,05	0,55
4	5950	570	6	0,45	3,87	0,7
5	4200	230	8,5	0,65	4,34	0,36
6	5950	230	8,5	0,65	4,28	0,5
7	4200	570	8,5	0,53	4,1	0,36
8	5950	570	8,5	0,5	4,02	0,7
9	3500	360	7	0,53	4,27	0,4
10	7100	360	7	0,55	4,17	0,74
11	5000	150	7	0,87	4,6	0,8
12	5000	900	7	0,43	3,68	0,38
13	5000	360	5	0,65	4,17	0,65
14	5000	360	10	0,58	4,25	0,25
15	5000	360	7	0,57	4,32	0,4
16	5000	360	7	0,6	4,22	0,38
17	5000	360	7	0,69	4,33	0,43
18	5000	360	7	0,61	4,23	0,37
19	5000	360	7	0,59	4,32	0,41
20	5000	360	7	0,68	4,31	0,43

gniatania, tj. prędkości obrotowej głowicy oraz temperatury obróbki stwierdzono zróżnicowaną grubość strefy zgniotu.

Dla wszystkich próbek po obróbce hybrydowej zmierzono grubość strefy przetopionej i jej szerokość na zglądach prostopadłych do powierzchni. Grubość strefy przetopionej mierzona była w środku strefy przetopienia, natomiast jej szerokość na powierzchni materiału. W tablicy III podano rzeczywiste wartości parametrów obróbki hybrydowej oraz wymiary utworzonej warstwy wierzchniej.

Pomiary wielkości strefy stopowej wykazały, że grubość strefy przetopionej wynosi 0,43÷0,87 mm, a jej szerokość 3,68÷4,6 mm. Wielkość strefy stopowej zależy od parametrów obróbki laserowej, tj. gęstości mocy promieniowania, która była jednakowa dla wszystkich próbek oraz prędkości posuwu próbki względem padającej wiązki. Największą wielkość strefy przetopionej stwierdzono dla najniższej prędkości posuwu 150 mm/min – im większa prędkość, tym grubość i szerokość strefy przetopienia mniejsza.

Obróbka mechaniczna – mikromłoteczkowanie nie spowodowało istotnych zmian wielkości strefy przetopionej w stosunku do stopowania laserowego z oscylacjami.

Ruch oscylacyjny spowodował zwiększenie szerokości strefy przetopionej o wartość amplitudy oscylacji, tj. 1 mm w stosunku do stopowania laserowego bez oscylacji oraz zmiany kształtu strefy przetopienia.

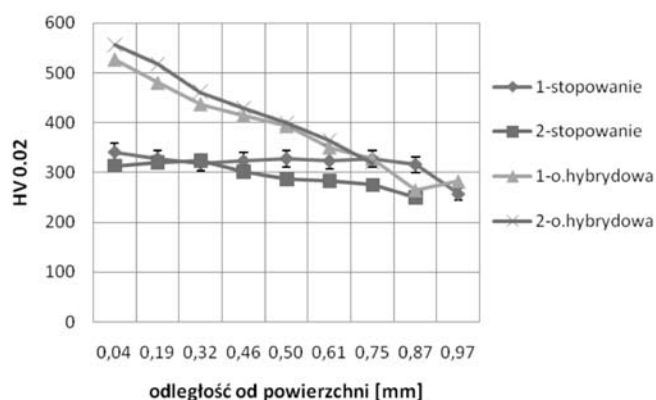
Wyniki pomiarów mikrotwardości i wielkości strefy zgniotu

Pomiary mikrotwardości przeprowadzono w środkowej strefie przetopienia zarówno dla próbek po obróbce laserowo-mechanicznej z oscylacjami, jak i po stopowaniu z oscylacjami. Podawany wynik pomiarów mikrotwardości jest wartością średnią z 5 pomiarów. Pomiary wykonano na przystawce Hannemana przy obciążeniu 20 g. W tablicy IV podano wartości mikrotwardości dla 5 odległości: 0,02; 0,2; 0,3; 0,4 i 0,6 mm od powierzchni.

Pomiary mikrotwardości warstwy wierzchniej wykazały, że mikrotwardość materiału po stopowaniu laserowym wynosi 300÷420 μHV. W większości przypadków stopowania można stwierdzić wyższą mikrotwardość przy powierzchni materiału niż przy dnie przetopu. Związane jest to z występowaniem drobniejszego ziarna w strefie przypowierzchniowej. Stosunkowo duże różnice mikrotwardości WW obserwowane dla tej samej grubości strefy przetopienia wiążą się z różną grubością i porowatością warstwy stellite naniesionego przed procesem obróbki laserowo-mechanicznej, która determinuje skład chemiczny i fazowy warstwy stopowanej. W celu wyeliminowania tych zakłóceń wszystkie obliczenia związane z oceną zgniotu powierzchniowego oraz grubością strefy umocnienia zostały przeprowadzone na jednej „ścieżce” laserowej, w której występowała strefa tylko stopowana laserowo oraz stopowana i mikromłoteczkowana.

Mikrotwardość warstwy po stopowaniu laserowym połączonym z mikromłoteczkowaniem wynosi 530÷670 μHV_{0,02} przy powierzchni materiału i ok. 400 μHV przy dnie przetopu. Wyniki pomiarów zamieszczono w tablicy IV. Dla wszystkich badanych próbek można zaobserwować wzrost mikrotwardości przy powierzchni materiału związany z procesem nagniatania. Grubość strefy umocnienia jest różna w zależności od parametrów obróbki laserowo-mechanicznej i we wszystkich przypadkach jest większa niż obserwowana na zglądach metalograficznych strefa zdeformowanych ziaren.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe rozkłady mikrotwardości materiału po stopowaniu oraz stopowaniu z mikrotłoteczkowaniem dla próbek 1 i 2, w których proces obróbki realizowany był przy tej samej prędkości posuwu $v_f = 230$ mm/s. Widoczny jest wyraźny wzrost mikrotwardości materiału po obróbce hybrydowej w stosunku do materiału tylko stopowanego. Umocnienie materiału jest większe dla



Rys. 5. Mikrotwardość WW po stopowaniu laserowym (1, 2 – stopowanie) i stopowaniu z mikrotłoteczkowaniem (1, 2 – o. hybrydowa)

Fig. 5. Microhardness WW after laser alloying (1, 2 – alloying) and alloying with microhammered (1, 2 – hybrid machining)

Tablica IV. Wartości mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni próbek ze stali 0H18N9 stopowanych stellite 6 i mikrotłoteczkowanych przy zmiennych parametrach obróbki hybrydowej

Table IV. Values of microhardness versus a distance from the surface of samples of the 0H18N9 steel alloyed with stellite 6 and hammered at variable parameters of hybrid machining

Nr	Parametry obróbki			Mikrotwardość po obróbce laserowo-mechanicznej				
	v_{obr} obr/min	v_f mm/min	X mm	HV 0,02	HV 0,2	HV 0,3	HV 0,4	HV 0,6
1	4200	230	6	527	480	430	410	350
2	5950	230	6	530	520	460	430	400
3	4200	570	6	540	430	380	360	290
4	5950	570	6	610	550	480	450	370
5	4200	230	8,5	640	520	440	420	290
6	5950	230	8,5	700	570	490	440	360
7	4200	570	8,5	580	550	510	440	350
8	5950	570	8,5	630	600	540	440	400
9	3500	360	7	630	500	560	520	410
10	7100	360	7	680	570	460	410	310
11	5000	150	7	660	480	450	410	400
12	5000	900	7	570	430	410	370	270
13	5000	360	5	540	460	420	380	290
14	5000	360	10	500	450	420	410	280
15	5000	360	7	610	480	430	410	280
16	5000	360	7	670	570	380	410	280
17	5000	360	7	630	490	490	420	380
18	5000	360	7	640	480	430	410	290
19	5000	360	7	620	530	450	400	350
20	5000	360	7	610	510	440	420	290

próbki 2 mikrotłoteczkowanej przy większej prędkości obrotowej głowicy nagniatącej. Jednocześnie wykres przedstawia różnice mikrotwardości warstw tylko po stopowaniu przy tych samych warunkach obróbki.

Na podstawie wyników pomiarów mikrotwardości wyznaczono względny procentowy przyrost mikrotwardości wywołany zgniotem powierzchniowym dla każdej z próbek oraz oszacowano grubości warstw zgniecionych. Przyjęto, że jest to warstwa, w której wystąpił przyrost mikrotwardości o minimum 10%.

Mikrotłoteczkowanie spowodowało względny wzrost mikrotwardości WW o 24÷47% (przy powierzchni) w stosunku do mikrotwardości WW po stopowaniu laserowym. Efekt ten wywołany jest zgniotem powierzchniowym. Najmniejszy przyrost mikrotwardości – 24% przy powierzchni materiału stwierdzono dla próbki nagniatanej w najniższej temperaturze; odległość młoteczków od osi wiązki wynosiła 10 mm. W tym przypadku stwierdzono również najmniejszą głębokość strefy umocnionej. Przyrost mikrotwardości powyżej 40% stwierdzono dla próbek: 2, 4, 5, 6, 10, 11, 15÷20, które były nagniatane przy dużych prędkościach obrotowych głowicy

Tablica V. Procentowe wartości zmian mikrotwardości materiału dla różnych odległości od powierzchni próbek ze stali 0H18 N9 stopowanych stellite 6 przy zastosowaniu oscylacji w stosunku do próbek mikronagniatanych oraz grubość strefy zgniotu

Table V. Percentage values of changes of material microhardness at different distances from surfaces of samples of the 0H18N9 steel alloyed with stellite 6 using oscillations in relation to samples microburnished and the thickness of the work-hardening zone

Nr	Parametry obróbki			Przyrost mikrotwardości %					y mm	Gz/ Gp
	v_{obr} obr/min	v_f mm/min	X mm	HV 0,02	HV 0,2	HV 0,3	HV 0,4	HV 0,6		
1	4200	230	6	31	32	27	22	8	0,58	0,79
2	5950	230	6	41	38	30	30	22	0,85	1,15
3	4200	570	6	36	24	22	17	8	0,55	1,20
4	5950	570	6	43	27	26	26	17	0,7	1,56
5	4200	230	8,5	45	21	13	11	0	0,36	0,55
6	5950	230	8,5	47	27	24	15	0	0,5	0,77
7	4200	570	8,5	24	29	25	8	0	0,36	0,68
8	5950	570	8,5	33	31	27	24	16	0,7	1,40
9	3500	360	7	36	31	30	11	0	0,4	0,75
10	7100	360	7	41	39	35	25	13	0,74	1,35
11	5000	150	7	47	35	34	26	23	0,8	0,92
12	5000	900	7	40	28	20	11	8	0,38	0,88
13	5000	360	5	35	31	27	22	18	0,65	1,00
14	5000	360	10	24	16	4	0	0	0,25	0,43
15	5000	360	7	44	29	19	24	0	0,4	0,70
16	5000	360	7	47	25	21	8	0	0,38	0,63
17	5000	360	7	41	22	25	15	0	0,43	0,62
18	5000	360	7	44	24	20	13	6	0,41	0,61
19	5000	360	7	41	23	21	18	0	0,42	0,69
20	5000	360	7	46	24	21	14	0	0,4	0,63

powyżej 5000 obr/min i środkowym zakresie zastosowanych temperatur obróbki. Dla próbek 1, 13 nagniatanych w wysokich temperaturach umocnienie materiału jest mniejsze, ok. 30%, co może być związane z częściową rekryształizacją materiału w podwyższonej temperaturze. Grubość strefy umocnionej wynosi $0,25 \pm 0,8$ mm. Można stwierdzić, że dla stosowanych parametrów rośnie ona wraz ze wzrostem prędkości obrotowej i temperatury obróbki. Przyrosty twardości i grubość strefy zgniotu są różne w zależności od parametrów obróbki laserowo-mechanicznej (OLM).

Analiza wyników

Analiza wyników badań wpływu parametrów obróbki laserowo-mechanicznej na stan warstwy wierzchniej obejmowała badania korelacji z:

- grubością strefy zgniotu,
- względnym przyrostem mikrotwardości w odległości 0,2 mm od powierzchni nagniatanej,
- stosunkiem grubości strefy zgniotu do grubości strefy stopowej.

Analiza statystyczna wyników badań eksperymentalnych obejmowała dobór funkcji regresji, statystyczną weryfikację adekwatności funkcji aproksymującej oraz statystyczną weryfikację istotności współczynników funkcji aproksymującej. Przeprowadzono próby aproksymacji za pomocą funkcji potęgowej oraz wielomianu pierwszego stopnia. Ocenę korelacji i istotności uzyskanych zależności wyznaczano na podstawie kryteriów I.P. Guilforda. Opracowane wyniki zamieszczono w tablicach, które zawierają:

- funkcję aproksymującą,
- wartość współczynnika korelacji wielokrotnej R,
- wartość liczby Fiszera F,
- współczynniki T – studenta określające istotność kolejnych zmiennych niezależnych T1, T2, T3.

Przyjęto poziom ufności $\alpha = 0,05$ lub 0,1.

Wiarygodność wyznaczonych równań oceniano w oparciu o następujące kryteria: krytyczną wartość statystyki F, która dla wyznaczonych równań wynosi $F_{kr} = 2,71$; krytyczną wartość współczynników T – studenta, która dla wyznaczonych równań wynosi $T_{kr} = 2,1$ dla $\alpha = 0,05$.

W tablicy VI przedstawiono wyniki obliczeń dla analizy wpływu parametrów obróbki hybrydowej na grubość strefy zgniotu powierzchniowego.

Współczynniki korelacji wielokrotnej obu równań są wysokie, a zależność pomiędzy badanymi własnościami znaczna. Dla obu równań $F > F_{kr}$. Dla równania pierwszego i drugiego współczynniki T1 i T3 równania są istotne $t > T_{kr}$ na poziomie ufności $\alpha = 0,05$.

Nieznacznie lepsze dopasowanie wykazuje funkcja potęgowa. Na poziomie ufności 0,1 wszystkie współczynniki równania są istotne, wartość T_{kr} wynosi wówczas $T_{kr} = 1,41$.

Na rysunku 6 przedstawiono interpretację graficzną zależności z tablicy VI według funkcji potęgowej opisującej zależność grubości strefy zgniotu od prędkości obrotowej głowicy nagniatającej oraz odległości narzędzia od osi wiązki laserowej dla ustalonej prędkości posuwu $v_f = 360$ mm/s. Zależność grubości strefy zgniotu rośnie prawie liniowo wraz ze wzrostem prędkości obrotowej oraz maleje wraz ze wzrostem odległości głowicy nagniatającej od osi wiązki laserowej. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej głowicy rośnie intensywność procesu nagniatania oraz sił oddziaływania mikromłoteczków z obrabianą powierzchnią, powoduje to wzrost głęboko-

Tablica VI. Zestawienie wyników analizy funkcji regresji dla grubości strefy zgniotu stali po obróbce hybrydowej

Table VI. List of results of the regression function analysis for the thickness of steel work-hardening zone after hybrid machining

Nr	Postać równania regresji	R	F	T1	T2	T3
1	$0.0026 V_o^{1.01} V_f^{-0.19} X^{-1.16}$	0,78	8,4	3,15	1,5	3,59
2	$0.53 + 0.00011 V_o - 0.00019 V_f - 0.074 X$	0,76	7,5	3,39	1,19	3,08

Tablica VII. Zestawienie wyników analizy funkcji regresji dla przyrostu twardości na głębokości 0,2 mm od powierzchni w strefie zgniotu

Table VII. List of results of the regression function analysis for the thickness increment on the depth of 0,2 mm from the surface in the work-hardening zone

Nr	Postać równania regresji	R	F	T1	T2	T3
1	$0.53 V_o^{0.66} V_f^{-0.082} X^{-0.61}$	0,68	4,6	2,65	0,85	2,45
2	$24.3 + 0.0039 V_o - 0.0035 V_f - 2.14 X$	0,7	5,0	3,01	0,58	2,34

Tablica VIII. Zestawienie wyników analizy funkcji regresji dla stosunku grubości strefy zgniotu do grubości strefy stopowej

Table VIII. List of results of the regression function analysis for the work-hardening zone thickness to alloy zone thickness ratio

Nr	Postać równania regresji	R	F	T1	T2	T3
1	$0.00035 V_o^{1.02} V_f^{0.2} X^{-1.09}$	0.74	6.3	2.81	1.46	2.97
2	$0.38 + 0.0021 V_o - 0.0056 V_f - 0.11 X$	0.77	7.6	3.49	1.91	2.62

ści odkształceń plastycznych materiału. Wzrost odległości narzędzia nagniatającego od osi wiązki laserowej powoduje spadek temperatury w strefie obróbki mechanicznej, co wiąże się również ze spadkiem własności plastycznych materiału i zmniejszeniem strefy odkształceń plastycznych. Tablica VII zawiera wyniki obliczeń dla wpływu parametrów obróbki hybrydowej na przyrost mikrotwardości na głębokości 0,2 mm od powierzchni, a rysunek 7 ich interpretację graficzną.

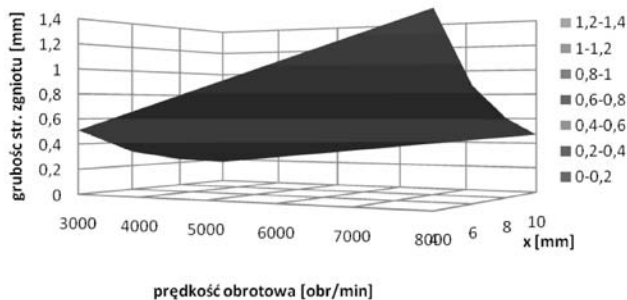
Współczynniki korelacji wielokrotnej obu równań są wysokie, a zależność pomiędzy badanymi własnościami znaczna. Dla obu równań spełniony jest warunek $F > F_{kr}$. Dla równania pierwszego i drugiego współczynniki T1 i T3 są istotne, a dla równania są istotne $t > T_{kr}$ na poziomie ufności $\alpha = 0,05$. Nieznacznie lepsze dopasowanie wykazuje funkcja wielomianowa. Przyrost mikrotwardości zależy głównie od prędkości obrotowej głowicy oraz temperatury strefy obróbki mechanicznej, która z kolei zależy od odległości narzędzia nagniatającego od osi wiązki.

Analiza statystyczna uzyskanych wyników obejmowała również wpływ parametrów obróbki na stosunek grubości strefy zgniotu do strefy przetopienia. Parametr ten może decydować w wielu przypadkach o trwałości elementów maszyn i urządzeń, gdyż zniszczenie często przebiega na granicy strefy przetopionej i materiału rdzenia, gdzie występuje lokalny skok własności i duża koncentracja naprężeń. W związku z tym korzystne jest wytworzenie naprężeń ściskających w WW, której grubość jest większa od strefy stopowej. Należy tu zwrócić uwagę na to, że głębokość strefy naprężeń po obróbce powierzchniowej zgniotem jest $40 \pm 60\%$ większa od grubości strefy zgniotu [10].

W tablicy VIII przedstawiono wyniki obliczeń wpływu parametrów obróbki hybrydowej na wartość tego parametru.

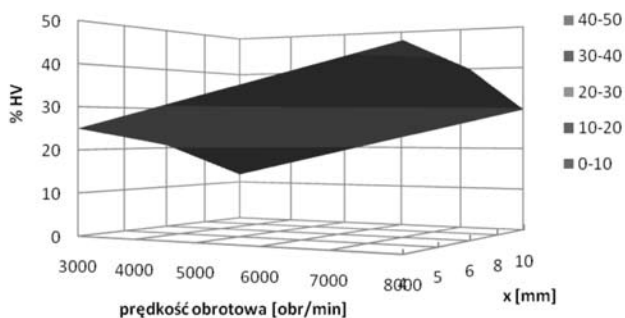
Współczynniki korelacji wielokrotnej obu równań są wysokie, a zależność pomiędzy badanymi własnościami znaczna. Dla obu równań spełniony jest warunek $F > F_{kr}$. Dla równania pierwszego i drugiego wszystkie współczynniki są istotne $t > T_{kr}$ na poziomie ufności $\alpha = 0,1$. Nieznacznie lepiej dopasowanie wykazuje funkcja wielomianowa.

Na rysunku 8 przedstawiono wpływ prędkości obrotowej głowicy nagniatającej i odległości narzędzia przy ustalonej prędkości posuwu $v_f = 360$ mm/min na grubość strefy zgniotu powierzchniowego przy ustalonej prędkości posuwu $v_f = 360$ mm/min. Widoczne jest, że przy największych prędkościach obrotowych głowicy i odległościach narzędzia poniżej 9 mm stosunek ten jest więk-



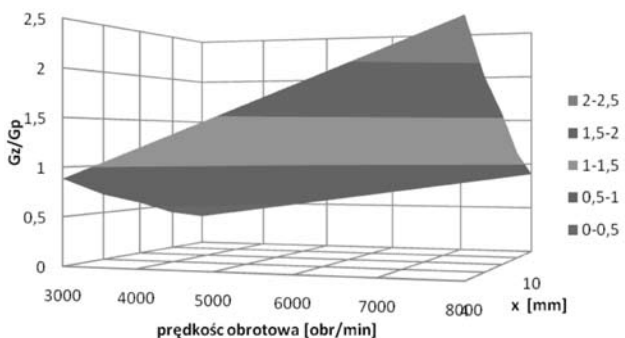
Rys. 6. Wpływ prędkości obrotowej głowicy i odległości narzędzia na grubość strefy zgniotu powierzchniowego przy ustalonej prędkości posuwu $v_f = 360$ mm/min

Fig. 6. Influence of the head rotational speed and a distance of the tool on the thickness of the surface work-hardening zone at the travelling speed settled to $v_f = 360$ mm/min



Rys. 7. Przyrost mikrotwardości na głębokości 0,2 mm w funkcji prędkości obrotowej głowicy i odległości narzędzia od osi wiązki laserowej X dla stałej prędkości posuwu 360 mm/min według zależności 2; wielomian pierwszego stopnia

Fig. 7. Increment of microhardness at the depth of 0,2 mm as a function of the head rotational speed and a distance of the tool from the laser beam axis X at the constant travelling speed 360 mm/min according to dependence 2; polynomial of the first degree



Rys. 8. Wpływ prędkości obrotowej oraz odległości narzędzia od osi wiązki na stosunek grubości strefy zgniotu do grubości strefy stopowej przy stałej prędkości posuwu $v_f = 360$ mm/min, zależność potęgowa

Fig. 8. Influence of the head rotational speed and a distance of the tool from the laser beam axis on the thickness of the surface work-hardening zone to the thickness of the alloy zone ratio at the constant travelling speed $v_f = 360$ mm/min, power dependence

szy od 1. Przy prędkościach poniżej 4000 obr/min i odległości poniżej 8 mm grubość strefy zgniotu w stosunku do grubości warstwy stopowej jest mniejsza niż 0,5, co nie gwarantuje obecności naprężeń ściskających w całej strefie stopowej.

Wnioski

Mikromłoteczkowanie powoduje wzrost mikrotwardości materiału stopowanego o 24÷47% przy powierzchni w stosunku do stopowania laserowego. Efekt ten wywołany jest zgniotem powierzchniowym. Stopień zgniotu zależy głównie od prędkości obrotowej głowicy nagniatającej oraz odległości narzędzia nagniatającego od osi wiązki.

Grubość strefy umocnionej wynosi $0,25 \pm 0,8$ mm. Grubość strefy umocnionej zależy od parametrów obróbki LM. Najmniejszą grubość stwierdzono dla próbek nagniatanych w najniższej temperaturze przy niskich prędkościach obrotowych. Przy zastosowaniu prędkości obrotowych powyżej $n > 5000$ obr/min, odległości $X \leq 7$ mm i prędkościach posuwu nie większych niż 360 mm/min głębokość zgniotu jest co najmniej równa głębokości strefy przetopienia, co zapewnia korzystne cechy eksploatacyjne obrabianych elementów.

Analiza zależności statystycznych wpływu parametrów obróbki laserowo-mechanicznej na stan warstwy wierzchniej oraz badania korelacji parametrów obróbki z: grubością strefy zgniotu, względnym przyrostem mikrotwardości w odległości 0,2 mm od powierzchni nagniatanej oraz stosunkiem grubości strefy zgniotu do grubości strefy stopowej wykazała że uzyskane zależności pomiędzy badanymi własnościami są istotne. Wyznaczone zależności funkcyjne pozwalają na sterowanie procesem hybrydowej obróbki LM.

Literatura

1. Grigorijanc A.G., Safonov A.H.: Metody powierzchniowej lasernej obróbki. Lazerna Technika i Technologia, 1989.
2. Ignatiev M., Kovalev E., Melekhin I., Sumurov I., Surluse S.: Investigation of the hardening of titanium alloy by laser nitriding. Wear, vol. 166, 1993.
3. Abbas G., West D.R.: Laser Surface Cladding of Stellite and Stellite-SiC Composite Deposits for Enhanced Hardness and Wear. Wear, vol. 143, 1991.
4. Grum J., Sturm R.: A new experimental technique for measuring strain and residual stresses during a laser remelting process, J. of Materials Processing Technology vol. 147, 2004.
5. Radziejewska J., Surface layer morphology due to laser alloying process, Journal of Engineering Manufacture Part B, Proc. IMechE. vol. 220, 2006.
6. Anthony T.R., Cline H.E.: Surface Rippling Induced by Surface-Tension Gradients During Laser Surface Melting and Alloying. J. Appl. Phys., vol. 48, No. 9, 1977.
7. Kawalec M., Jankowiak M.: Kształtowanie struktury stereometrycznej powierzchni w procesie hartowania laserowego stali na tokarce. Wybrane Zagadnienia Obróbek Skoncentrowaną Wiązką Energii (Konferencja EM 2003), Bydgoszcz 2003.
8. Radziejewska J., Nowicki B., Kalita W.: Laser burnishing method for surface laser modification J. of Engineering Manufacture Proceedings of the IMechE Part B., vol. 222, No. B7, 2008.
9. Filipowski R.: Application of matrix calculus for determining the coefficients of the linear regression for varying degree of a matrix describing the set of normal equations, Archiwum Budowy Maszyn, Vol. XLIII, 1996, Zeszyt 1.
10. Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem. WNT, Warszawa 1986.