



Struktura i własności warstw wierzchnich stopu magnezu MCMgAl12Zn1 stopowanego laserowo cząstkami węgla krzemu”

M. Zdrojkowska^a, M. Basiński^b, S. Malara^c

^a Studentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
email: mzdrojowska@o2.pl

^b Doktorant Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny,
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów
Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
email: marcin.basinski@polsl.pl

^c Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny,
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów
Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
email: szymon.malara@polsl.pl

Streszczenie: Celem niniejszej pracy było scharakteryzowanie stopów magnezu oraz zbadanie wpływu stopowania laserowego na strukturę i własności mechaniczne stopu magnezu opierając się na dostępnych źródłach literatury. W części badawczej przeprowadzono szereg badań takich jak: pomiar twardości metodą Rockwella, mikrotwardość, obserwację mikrostruktury na mikroskopie świetlnym, dokonano ich analizy, w celu oceny wpływu tych parametrów na podstawowe własności mechaniczne, a także na strukturę badanego stopu magnezu –MCMgAl12Zn1.

Abstract: The value of this work is characterization magnesium alloys and study the influence of laser treatment on structure and mechanical properties of the magnesium alloy MCMgAl12Zn1 be supported on accessible sources literature. In the research part was carried series researches. The investigations included Rockwell hardness testing, microhardness, observation of the microstructure at optical microscope. Define optimal parameters heat treatment and shows an influence parameters this processing on primary mechanical properties and structure of the magnesium alloy MCMgAl12Zn1.

Słowa kluczowe: stopowanie laserowe, warstwy wierzchnie, stopy magnezu

1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój przemysłu i nanotechnologii spowodował wzrost wymagań stawianym obecnie konstrukcjom oraz elementom w stosunku do przewidywanych

warunków pracy jak również zaistniałych potrzeb, wspomagając i ukierunkowując tym samym postęp w dziedzinie inżynierii materiałowej.

Ciągły postęp w każdej z dziedzin życia oraz nieustająca rywalizacja przedsiębiorstw starających się sprostać wymogom rynku sprawiły, iż rośnie zapotrzebowanie na lekkie i niezawodne konstrukcje. Poszukiwane są materiały cechujące się lepszymi własnościami, spełniające te wymogi. Do grupy tych materiałów zalicza się magnez i jego stopy, ponieważ jest on najlżejszym wśród metali konstrukcyjnych, wytrzymałym i dobrze tłumiącym drgania metalem. Wzrost produkcji stopów magnezu wskazuje na wzmożoną potrzebę ich stosowania w światowym przemyśle konstrukcyjnym, a co za tym idzie stopy magnezu stają się jednym z najczęściej stosowanych materiałów konstrukcyjnych naszego stulecia, dlatego niezmiernie ważne jest utrzymanie wysokiego tempa badań nad problematyką stopów lekkich.

W celu podwyższenia własności magnezu i jego stopów, uszlachetnienia warstwy wierzchniej materiału oraz uzyskaniu jeszcze lepszych wyników stosuje się laserową obróbkę powierzchniową. Uzyskując w konsekwencji lepszą twardość warstwy wierzchniej oraz poprawę właściwości wytrzymałościowych tribologicznych i antykorozyjnych. Lasery są znane od ponad 30 lat i z powodzeniem wykorzystywane w medycynie, geodezji, kartografii, technice raketowej i kosmicznej, cywilnej i wojskowej. Zapotrzebowanie na innowacyjne technologie sprawiły, że lasery stały się jedną z pionierskich metod stosowanych w obróbce powierzchni.

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie ogólnej charakterystyki odlewniczych stopów magnezu oraz możliwości wzbogacenia magnezu, przy użyciu nowoczesnych technik, jakimi jest stopowanie laserem. W pracy scharakteryzowano również wpływ dodatków stopowych na własności stopów magnezu oraz możliwości ich zastosowania.

Głównym zamierzeniem pracy jest określenie wpływu stopowania laserowego cząstkami węgla krzemu na własności mechaniczne i strukturę odlewniczego stopu magnezu MCMgAl12Zn1.

2. Materiał do badań

Badania przeprowadzone zostały na próbkach ze stopu magnezu MCMgAl12Zn1, którego skład chemiczny przedstawiony został w tablicy 1.

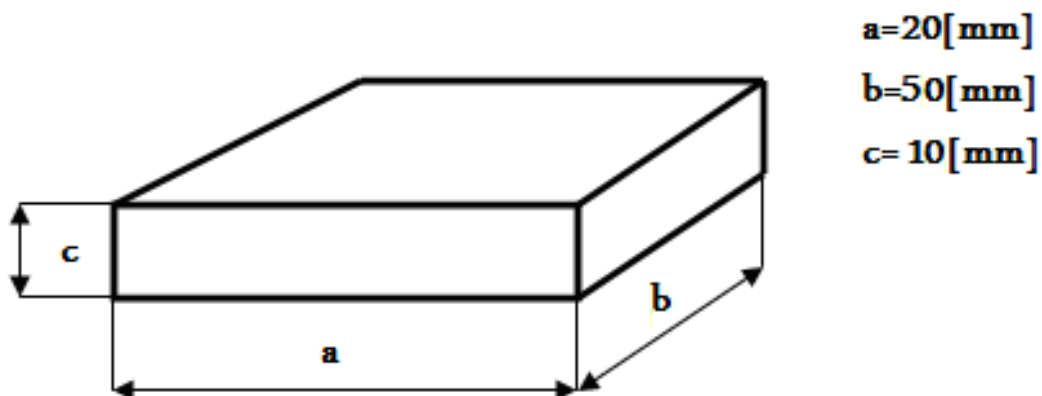
Tablica 1.

Skład chemiczny MCMgAl12Zn1

	Skład chemiczny, %						
	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Mg	Reszta
MCMgAl12Zn1	2,96	0,23	0,09	0,006	0,029	96,65	0,0361

Metodami obróbki skrawaniem wykonano próbki ze stopu MCMgAl12Zn1 o wymiarach: 50 x 20 x 10 mm (5ys. 1).

Próbki przed wykonaniem obróbki laserowej szlifowano na papierze ściernym SiC o ziarnistości 1200 w celu uzyskania gładkiej powierzchni, a następnie odtłuszczano.



Rysunek 1. Próbką stopu MCMgAl12Zn1

Do stopowania laserowego węglikiem krzemu odlewniczego stopu magnezu MCMgAl12Zn1 użyto lasera diodowego dużej mocy HPDL Rofin DL 020, którego dane techniczne podano w tablicy 2.

Laser ten charakteryzuje prostokątny lub liniowy kształt ogniska. Stopowanie warstw wierzchnich wykonano z wykorzystaniem proszku SiC, którego wybrane własności podano w tablicy 3, w zakresie mocy lasera od 0,5 do 2,0 kW. Na każdej z próbek wykonano jedną ścieżkę przetopienia o długości 45 mm. Wymiary prostokątnej wiązki lasera zogniskowanej na powierzchni próbki wynoszą 1,8 x 6,8 mm. Długość ogniskowa wynosi 82 mm. Przetapianie zrealizowano przy wielomodowym rozkładzie energii, co zapewnia uzyskanie szerokiego lica ściegu. Przetapianie wykonano w osłonie gazu ochronnego argonu w celu ochrony jeziora przetopionego metalu przed utlenianiem.

Stopowanie laserowe zostało przeprowadzone jako proces jednoetapowy – materiał dodatkowy w postaci proszku został podawany w strumieniu gazu ochronnego argonu do obszaru jeziora przetopienia utworzonego na stopowanej powierzchni, w obszarze plamki ogniska wiązki laserowej, gdzie ulegał wtopieniu (rys. 2).

Tablica 2.

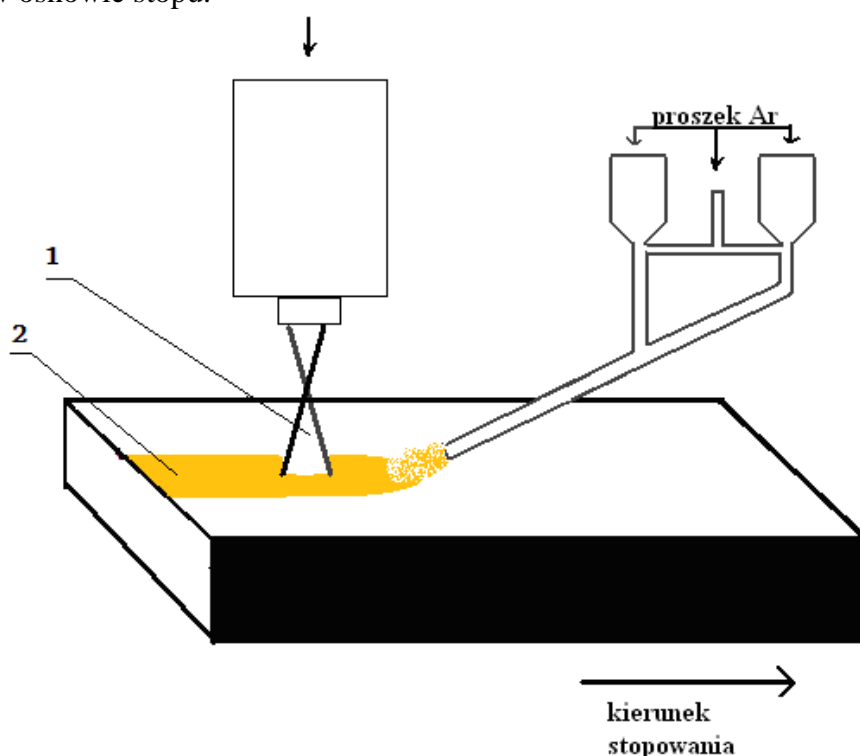
Dane techniczne lasera diodowego HPDL Rofin DL 020

Długość fali promieniowania laserowego, mm	808±5
Moc wyjściowa wiązki laserowej (promieniowanie ciągłe), W	2300
Zakres mocy, W	100-2300
Długość ogniskowa wiązki laserowej, mm	82 / 32
Wymiary ogniska wiązki laserowej, mm	1,8x6,8 / 1,8x3,8
Zakres gęstości mocy w płaszczyźnie ogniska wiązki laserowej, kW/cm ²	0,8-36,5

Tablica 3.
Wybrane własności proszku węgliku krzemu.

Proszek	Średnia wielkość ziarna, μm	Temperatura topnienia, $^{\circ}\text{C}$	Gęstość, g/cm^3	Twardość, HV
Węglik krzemu	<75	1900	3,44	1600

Zastosowanie zbyt wysokiej mocy lasera (lub za niskiej prędkości stopowania) prowadzi do parowania powierzchni i tworzenia się kraterów, natomiast zastosowanie zbyt małej mocy (lub zbyt dużej prędkości stopowania) może być przyczyną braku przetopienia powierzchni materiału oraz mieszania prowadzącego do niejednorodnego rozmieszczenia cząstek stopujących w osnowie stopu.



Rysunek 2. Schemat ideowy pokazujący nakładanie powłok i ich laserowego stopowania, realizowany w badaniach opisanych poniżej: 1- wiązka lasera; 2- ścieżka laserowa.

3. PRZEBIEG BADAŃ

W celu określenia wpływu obróbki laserowej na strukturę i własności mechaniczne odlewniczego stopu magnezu MCMgAl12Zn1 wykonano następujące badania:

- badania metalograficzne;
- pomiar chropowatości powierzchni;
- pomiar twardości;
- odporność na zużycie ściernie.

3.1. Badania metalograficzne

Próby wykonano dla trzech prędkości stopowania: 0,5 m/min, 0,75 m/min oraz 1,0 m/min, a także zmieniając moc wiązki laserowej w zakresie od 1,2 do 2,0 kW co 0,4 kW.

W celu oceny struktury próbek oraz przeanalizowania efektów obróbki laserowej wykonano szereg metalograficznych badań mikroskopowych. Badania zostały wykonane na mikroskopie świetlnym firmy Leica (rys. 3) z zainstalowanym modulem do wykonywania zdjęć cyfrowych, a zastosowane powiększenia wynosiły odpowiednio 200x, 500x, 1000x.



Rysunek 3. Mikroskop świetlny firmy Leica

3.2. Pomiar chropowatości

Badania chropowatości powierzchni R_a warstw wierzchnich stopowanych laserowo odlewniczych stopów magnezu wykonano przy użyciu urządzenia Surtronic 3+ firmy Taylor Hobson Precision. Urządzenie charakteryzuje się rozdzielczością pomiaru $0,2 \mu\text{m}$ oraz maksymalną wartością pomiaru $150 \mu\text{m}$. Pomiary chropowatości powierzchni dokonano na odległości pomiarowej $0,8 \text{ mm}$.

3.3. Pomiar twardości

Ocenę twardości stopu w stanie odlanym jak i po obróbce cieplnej dokonano na podstawie pomiarów metodą Rockwella z wgłębniakiem w postaci kulki stalowej o średnicy $\frac{1}{16}$ ''.

Metoda Rockwella pomiaru twardości (wg PN-91/H-04355) polega na dwustopniowym wciskaniu w badany materiał wgłębniaka oraz pomiarze trwałego przyrostu głębokości odcisku po odciążeniu.

Badanie twardości próbek z odlewniczego stopu magnezu MCMgAl12Zn1 przeprowadzone zostało na twardościomierzu Rockwella firmy ZWICK/ZHR 4150 (rys. 4).

Badanie mikrotwardości wykonano metodą Vickersa przy obciążeniu 100 g ($\text{HV}_{0,1}$) na przekroju poprzecznym przy użyciu automatycznego systemu do pomiaru mikrotwardości FM-ARS9000 firmy FutureTech.



Rysunek 4. Twardościomierz ZHR4150 firmy Zwick.

3.4. Odporność na zużycie ścierne

Pomiary odporności na zużycie ścierne próbki stopu magnezu $Mg_{12}Zn_1$ polegały na ważeniu badanej próbki przed i po próbie. Różnica masy próbki, odniesiona do drogi tarcia, pracy tarcia albo czasu pracy skojarzenia, przedstawia średnią intensywność zużywania materiałów współpracujących. Próba polegała na ścieraniu powierzchni próbki przy użyciu przeciwpróbki, którą stanowiła kulka o średnicy 13,57 mm wykonana ze stali łożyskowej. Kulka zamocowana w uchwycie wykonuje 5000 cykli. W obszarze styku kulki z badanym materiałem powstaje tarcie. Badania wykonane zostały na maszynie przedstawionej na rysunku 5.



Rysunek 5. Urządzenie do pomiaru zużycia ściernego

4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

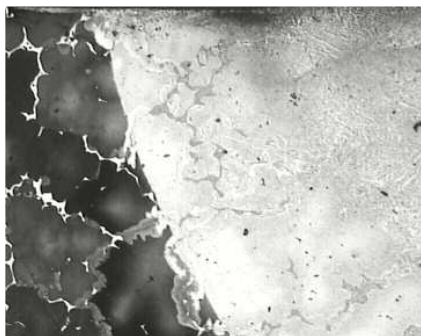
4.1 Badania metalograficzne

Obserwacje metalograficzne prowadzono na zglądach wytrawionych. Badania metalograficzne prowadzone na mikroskopie świetlnym pozwoliły na obserwację zmian strukturalnych w analizowanym odlewniczym stopie magnezie MCMgAl12Zn1.

Dla parametrów, gdzie moc lasera wynosi 1,2 kW przy prędkości stopowania 0,5 m/min oraz mocy lasera 2,0 kW i 1,6 kW oraz prędkościach stopowania: 0,5 m/min i 0,75m/min nie doszło do przetopienia powierzchni stopu magnezu.

Granica między zmodyfikowanym obszarem po laserowej obróbce powierzchni a materiałem rodzimym jest wolna od defektów. Widoczny jest obszar strefy wpływu ciepła.

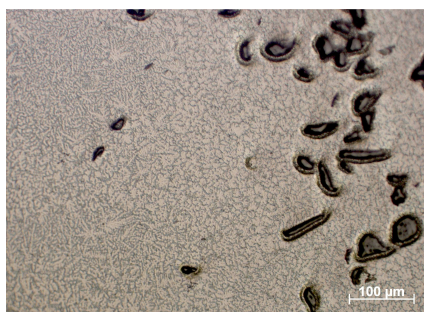
W wyniku stopowania laserowego powstaje struktura wolna od defektów z wyraźnym rozdrobnieniem ziarna. Mikrostruktura warstwy zmodyfikowanej laserowo zawiera głównie nierozpuszczone dyspersyjne cząstki SiC w osnowie stopu Mg-Al-Zn. Przykładowe obrazy mikrostruktury przedstawiono na rysunkach 6 - 8.



Rysunek 6. Brzeg przetopienia warstwy wierzchniej stopu magnezu MgAl12Zn1 po stopowaniu proszkiem SiC, moc lasera 1,2 kW; prędkość stopowania 0,5 m/min. Powiększenie 50x.



Rysunek 7. Warstwa wierzchnia stopu magnezu MgAl12Zn1 po stopowaniu proszkiem SiC, moc lasera 1,2 kW; prędkości stopowania 0,5 m/min. Powiększenie 50x.



Rysunek 8. Strefa centralna warstwy wierzchniej stopu magnezu MgAl12Zn1 po stopowaniu proszkiem SiC, moc lasera 1,2kW; prędkości stopowania 0,5m/min.

Wyniki pomiaru wielkości ziarna wskazują duże rozdrobnienie mikrostruktury w strefie przetopienia. W tabelicy 4 przedstawiono wyniki pomiarów wielkości ziarna dla próbki stopowanej z mocą lasera 1,2 kW. Średnia wielkość ziarna w materiale rodzimym wynosi od 659 do 805 μm , natomiast w strefie przetopienia średnia wielkość ziarna wynosi od 8 do 13,99 μm .

Tabela 4.

Wielkość ziarna przy wartościach mocy lasera 1,2 kW i prędkości stopowania 0,5 m/min

	Długość, μm		Liczba ziaren		Wielkość ziarna, μm	
	Materiał rodzimy	Strefa przetopienia	Materiał rodzimy	Strefa przetopienia	Materiał rodzimy	Strefa przetopienia
L1	4212,98	272,71	6	18	702,16	15,15
L2	3891,02	183,23	4	15	972,76	12,22
L3	3045,1	212,12	5	13	609,02	16,32
L4	2213,4	184,11	5	15	442,68	12,27
SUMA	13362,5	852,17	20	61		
Średnia wielkość ziarna					681,66	13,99

4.2 Pomiar chropowatości

Przeprowadzone badania chropowatości powierzchni R_a warstw wierzchnich stopowanych laserowo odlewniczych stopów magnezu, wskazują na wzrost wartości chropowatości R_a . Chropowatość powierzchni dla prędkości stopowania 0,75 m/min oraz 0,5 m/min przy mocy lasera 2,0 kW i 1,6 kW oraz dla 0,5 m/min przy mocy 1,2 kW nie została zmierzona, ponieważ była ona poza zakresem pomiarowym urządzenia. Przed stopowaniem chropowatość stopu MCMgAl12Zn1 wynosiła 0,3 μm . Wyniki uzyskanej średniej chropowatości z 5 pomiarów zostały przedstawione w tabelicy 5.

Tabela 5.

Wartość chropowatości po stopowaniu laserowym przy różnej mocy lasera (1,2÷2,0) i prędkości stopowania (0,5÷1,0)

Moc lasera, kW	Prędkość stopowania, m/min	$R_{a_{sr}}$, μm	Odchylenie standardowe	Błąd pomiarowy, %
2,0	1	20,2	4,02	1,8
1,6	1	16,98	4,16	1,859
1,2	0,75	26,58	6,73	3,01
	1	13,24	10,7	4,771

Badania wykazały, że największą chropowatością powierzchni 26,58 μm charakteryzuje się stop MCMgAl12Zn1 po stopowaniu z mocą lasera 1,2 kW i prędkością stopowania 0,75 m/min. Najmniejszą chropowatością powierzchni 13,24 μm charakteryzuje się stop po laserowym stopowaniu z prędkością 1,0 m/min i mocą lasera 1,2 kW.

4.3 Pomiar twardości

Wyniki uzyskane w próbie twardości dla odlewniczego stopu magnezu MCMgAl12Zn1 zarówno w stanie odlanym jak i po obróbce cieplnej zestawiono w tablicy 6. Przedział ufności, dla wartości średniej wyników pomiarów dla poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Pomiary twardości wykonano metoda Rockwella w skali C w stanie wyjściowym oraz po stopowaniu laserowym za pomocą lasera diodowego przy różnych mocach lasera, wykonując dla każdego stanu po 5 pomiarów oraz obliczono ich wartość średnią.

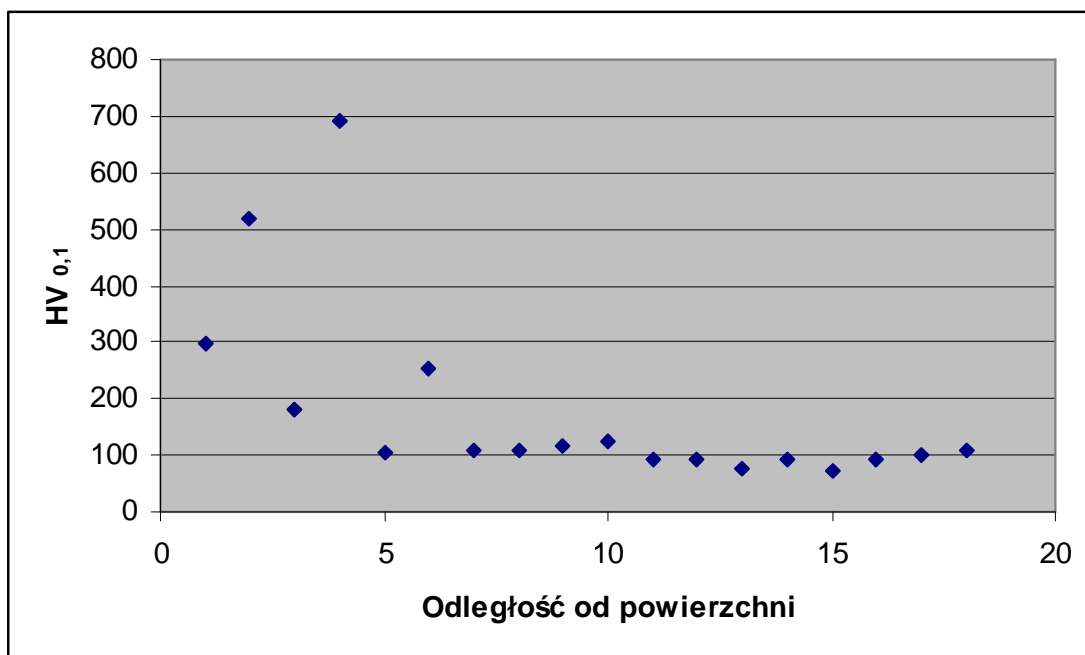
Tablica 6.

Wyniki pomiaru twardości przed i po laserowym stopowaniu stopu magnezu MCMgAl12Zn1

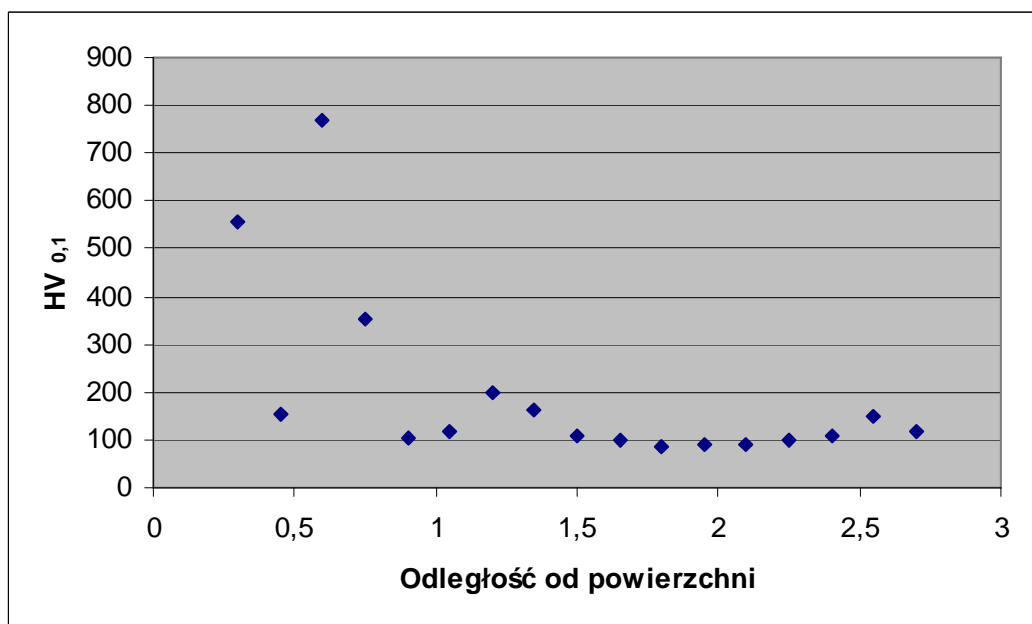
Moc lasera, kW	Prędkość stopowania, m/min	Twardość, HRF _{sr}	Odchylenie standardowe
Przed stopowaniem		92,8	0,64
1,2	0,5	77,2	44,2
	0,75	79,8	7,85
1,6	0,5	92,7	24
	0,75	51,7	47,3
	1	55,9	51
2	0,5	73,9	41,7
	0,75	77,1	8,8
	1	98,1	6,09

Wyniki pomiarów twardości stopu magnezu MCMgAl12Zn1 przed i po stopowaniu laserowym wykazują, iż stopowanie laserowe powoduje spadek ich twardości. Najniższą twardość uzyskano w stopie magnezu poddanemu stopowaniu laserowemu z mocą 1,6 kW i prędkością stopowania 0,75m/min i wyniosła 51,7 HRF. Najwyższą wartość twardości odnotowano po stopowaniu laserem o mocy 2 kW z prędkością stopowania 1,0 m/min i wynosiła 98,1 HRF, co znacznie przewyższa wartość twardości stopu przed laserową obróbką.

Pomiary mikrotwardości metodą Vickersa przy obciążeniu 100 g ($HV_{0,1}$) na przekroju poprzeczny po stopowaniu laserowym przedstawiono na rysunkach 9 i 10. W materiale rodzimym wartość mikrotwardości wynosi 100-200 $HV_{0,1}$, co jest porównywalne z wartościami poza strefą przetopienia. W strefie przetopienia mikrotwardość wzrasta i wynosi około 600-800 $HV_{0,1}$. W miejscach gdzie mikrotwardość wzrasta do około 1600-2000 $HV_{0,1}$ natrafiono na cząsteczki węgla SiC. Różnice pomiędzy wynikami pomiarów twardości i mikrotwardości wynikają z wielkości obszaru badanego.



Rysunek 9. Zmiana mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni dla stopu magnezu przy prędkości stopowania 0,5 m/min i mocy lasera 1,2 kW



Rysunek 10. Zmiana mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni dla stopu magnezu przy prędkości stopowania 1,0 m/min i mocy lasera 2,0 kW

4.4 Odporność na zużycie ścierne

Pomiar zużycia ściernego stopu magnezu polegał na ważeniu próbki przed i po wykonaniu badania. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabelicy 7.

Tablica 7.

Wartość parametrów dla zużycia ściernego przy różnej mocy lasera i prędkości stopowania

Moc lasera, kW	Prędkość stopowania, m/min	Waga przed badaniem, g	Waga po badaniu, g	Ubytek masy, g
Przed stopowaniem		5,2372	5,2365	0,0007
1,2	0,5	6,5699	6,5664	0,0019
1,6	1	6,1361	6,134	0,0009
2	1	6,1483	6,1478	0,0003

W wyniku przeprowadzanych prób odporności na zużycie ściernie zaobserwowano niższy ubytek masy próbek ze stopu MCMgAl12Zn1 po obróbce laserowej. Największy ubytek masy 0,0019 g zmierzono dla próbki po stopowaniu z mocą lasera 1,2 kW i prędkością 0,5 m/min. Najmniejszy ubytek masy zmierzono dla próbki po stopowaniu z mocą lasera 2,0 kW i prędkością 1,0 m/min.

5. Podsumowanie

Współczesne materiały powinny posiadać wysokie własności mechaniczne, fizyczne, chemiczne, jak i technologiczne, mające na celu zapewnienie długiego użytkowania. Magnez i jego stopy, ze względu na niską masę właściwą, dobrą obrabialność, leżność i zdolność do nadawania kształtu oraz możliwość pełnego recyklingu, nabierają coraz większego znaczenia dzięki wymaganiom stawianym między innymi przez przemysł motoryzacyjny czy lotniczy. Dzięki technologiom obróbki laserem możemy dokonać zmiany własności warstwy wierzchniej materiałów, poprawić własności mechaniczne i trybologiczne stopów magnezu. Stopy magnezu znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach życia i techniki. Używa się ich przede wszystkim w inżynierii powierzchni, a także w medycynie i wielu innych. Sumując wszystkie zalety stopów magnezu można stwierdzić, iż jest to materiał przyszłościowy.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że wykonalne jest stopowanie wierzchnich warstw stopu MgAl12Zn1 za pomocą lasera diodowego dużej mocy HPDL z mocą wiązki 1,2-2,0 kW oraz z prędkością stopowania 0,5-1,0 m/min. Grubość strefy przetopienia i strefy wpływu ciepła zależna jest od zastosowanej mocy lasera. Wyższa moc odpowiada zwiększonej grubości uzyskanej warstwy wierzchniej. Mikrostruktura stopowanej powierzchni charakteryzuje się rozdrobnieniem ziarna. Laserowe stopowanie powierzchni poprawia mikrotwardość strefy przetopionej w stosunku do twardości podłoża. Spowodowane to jest rozdrobnieniem ziarna, a także występowaniem twardych cząstek węgla krzemu.

Przeprowadzone badania chropowatości, zużycia ściernego i twardości pozwalają stwierdzić, iż właściwy dobór parametrów obróbki laserem zapewnia wyższe własności w porównaniu do stopów tylko po stopowaniu laserowym.

LITERATURA

1. K. Przybyłowicz: Podręczniki Akademickie, Mechanika, „Metaloznawstwo”, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2007.
2. S. Prowans: „Materiałoznawstwo”, Poznań 1977.

3. E. Krzemień: „Materiałoznawstwo”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
4. L.A. Dobrzański: „Metaloznawstwo i obróbka cieplna stopów metali”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1993.
5. K. Wesołowski: „Metaloznawstwo i obróbka cieplna”, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1972.
6. M. Głowacka: „Metaloznawstwo”, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1996.
7. M. Szweyger, D. Nagolska: „Metalurgia i odlewnictwo”, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2002.
8. Z. Górny, J. Sobczak: „Nowoczesne tworzywa odlewnicze na bazie metali nieżelaznych”, Kraków 2005.
9. B. Balcerowska: „Ćwiczenia laboratoryjne z metaloznawstwa metali nieżelaznych”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Nr 1835, Gliwice 1994.
10. A. Białoźbrzeski: „Odlewy ze stopów aluminium i magnezu w zastosowaniu do budowy nowoczesnych maszyn”. Przegląd Mechaniczny, zeszyt nr 22, 1998.
11. F. Binczyk: „Konstrukcyjne stopy odlewnicze”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
12. J. Adamczyk: „Inżynieria materiałów metalowych”, część 2, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
13. L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 2006.
14. K. Sękowski, J. Pieskowski, Z. Wojtowicz: „Atlas struktur znormalizowanych stopów odlewniczych”, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1972.
15. T. Burakowski, T. Wierzchom: „Inżynieria powierzchni metali”: Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1995.
16. B. Ziętek: „Lasery”, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń 2008.
17. D. Panek, M. Bonek: Obróbka laserowa warstwy wierzchniej stali austenitycznej, Prace Studenckich Kół Naukowych, Kongres Studenckich Kół Naukowych CO-KÓŁ, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, z. 13, 2007, s. 53-60
18. A. Młynarczyk, J. Jakubowski: „Obróbka powierzchni i powłoki ochronne”, Poznań 1998.
19. J. Kusiński: „Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej”, Wydawnictwo naukowe Akapit, Kraków 2000.
20. B. Major: “Laser Technology in generating microstructure of functionally gradient materials”.
21. A.H. Wang, H.B. Xia, W.Y. Wang, Z.K. Bai, X.C. Zhu, C.S. Xie: “YAG laser cladding of homogenous coating onto magnesium alloy”, 2005.