



## **Zastosowanie lasera diodowego dużej mocy do stopowania warstw wierzchnich stali stopowej narzędziowej do pracy na gorąco**

M. Cimander<sup>a</sup>, E. Jonda<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny  
email : m.cimander@wp.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny,  
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów  
Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie  
email: ewa.jonda@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wpływ laserowej obróbki na strukturę i własności warstw wierzchnich stali X40CrMoV5-1 narzędziowej stopowej do pracy na gorąco przetapianej i stopowanej laserem diodowym dużej mocy (HPDL). Zmierzono twardość i chropowatość otrzymanych warstw wierzchnich, a także zbadano wpływ parametrów stopowania na własności uzyskanych warstw wierzchnich stali.

**Abstract:** This paper presents the results of laser treatment influence on structure and properties of the surface of the X40CrMoV5-1 hot work tool steel, using the high power diode laser (HPDL) for remelting and alloying. In this work structure changes as well as hardness and roughness are investigated. The goal of this work was also to determine technological conditions for remelting of surface layer with HPDL laser.

**Słowa kluczowe:** Stopowanie, obróbka cieplna, Stale narzędziowe stopowe do pracy na gorąco, Laser HPDL

### **1. WSTĘP**

Zróznicowane warunki pracy narzędzi powodują, że poszczególnym grupom stali narzędziowych stawiane są różne wymagania. Stale stopowe stanowią największą i najpowszechniej stosowaną grupę materiałów narzędziowych. Podstawowe wymagania stawiane tym stalom dotyczą zapewnienia stałości kształtu wykonanych z nich narzędzi, dlatego powinny one cechować się znaczną odpornością na przenoszenie obciążeń bez odkształceń plastycznych, a także odpornością na zużycie ściernie, które zależne jest zwykle od twardości stali. Trwałość eksploatacyjna narzędzi zależy od prawidłowego doboru materiału pod względem składu chemicznego i struktury oraz od poprawnej konstrukcji, właściwego wykonania i prawidłowej eksploatacji [1-5].

Stopowanie laserowe (Laser Surface Alloying- LSA) jest najnowocześniejszym procesem obróbki cieplno-chemicznej polegającym na wzbogacaniu warstw wierzchnich materiałów w

dotatki stopowe oraz zmianie ich struktury. Laserowe wzbogacanie warstw wierzchnich jest stosowane w celu poprawy twardości oraz odporności na ścieranie, głównie w wyniku wprowadzenia dodatków stopujących do osnowy materiału. Proces ten poprzez odpowiedni dobór pierwiastków stopowych oraz parametrów pozwala na uzyskiwanie warstw wierzchnich o strukturze i własnościach porównywalnych ze stalami wysokostopowymi. Warstwy wierzchnie uzyskane w takim procesie charakteryzują się niewielką grubością, dużą żaroodpornością, twardością i jednocześnie odpornością na ścieranie, erozję, korozję i działanie agresywnych środków chemicznych [6-10].

W pracy zbadano strukturę i własności stali stopowej narzędziowej do pracy na gorąco X40CrMoV5-1 wzbogacanej węglikiem wolframu przy użyciu lasera diodowego dużej mocy HPDL. Określono wpływ mocy lasera na głębokość przetopienia, głębokość strefy wpływu ciepła oraz na szerokość lica. Zmierzono i porównano twardość oraz chropowatość stali poddanej przetapianiu wg. różnych parametrów.

## 2. METODYKA BADAŃ

Badania wykonano na próbkach otrzymanych ze stali narzędziowej stopowej do pracy na gorąco X40CrMoV5-1 o składzie chemicznym przedstawionym w tablicy 1. Próbki do badań wykonano z zastosowaniem metod obróbki skrawaniem.

Tablica 1.

Skład chemiczny badanej stali narzędziowej stopowej do pracy na gorąco.

Znak stali	Średnia zawartość pierwiastków, %					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
X40CrMoV5-1	0,35÷0,42	0,80÷1,20	0,25÷0,50	4,80÷5,50	1,20÷1,50	0,85÷1,15

Następnie gotowe próbki poddano standardowej obróbce cieplnej, polegającej na hartowaniu i dwukrotnym odpuszczaniu. Austenitizowanie wykonano w piecu próżniowym w temperaturze 1020°C z wygrzewaniem przez 30 min. W czasie podgrzewania do temperatury austenitizowania zastosowano dwa przystanki izotermiczne przez 30 min., pierwszy w temperaturze 640°C, a następny w 840°C. Po hartowaniu próbki odpuszczano dwukrotnie, każdorazowo przez 2 h, w temperaturze 560 °C, a następnie w 510°C. Po obróbce cieplnej próbki piaskowano i poddano obróbce mechanicznej na szlifierce magnetycznej.

Na odtłuszczone powierzchnie próbek nałożono proszkowe powłoki o grubości 0,05 oraz 0,10 mm w postaci pasty zawierającej węglík wolframu (WC) związany lepiszczem nieorganicznym w postaci krzemowego szkła wodnego o składzie  $\text{Na}_4\text{SiO}_4 + \text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ . Do stopowania laserowego stali X40CrMoV5-1 węglikiem wolframu użyto lasera diodowego dużej mocy (HPDL) ROFIN SINAR DL 020. Schemat stanowiska do obróbki laserowej przedstawiono na rysunku 1.

Konstituowanie warstwy wierzchniej próbek zrealizowano stosując dwa rodzaje procesów, w obu przypadkach długość ściegów przetopienia na powierzchni próbki wynosiła 25 mm. Wykonano cztery procesy stopowania zmieniając odpowiednio moc lasera oraz kolejność zastosowanych procesów, dokładny opis przeprowadzonego stopowania przedstawiono w tablicach 2 i 3.

Tablica 2.

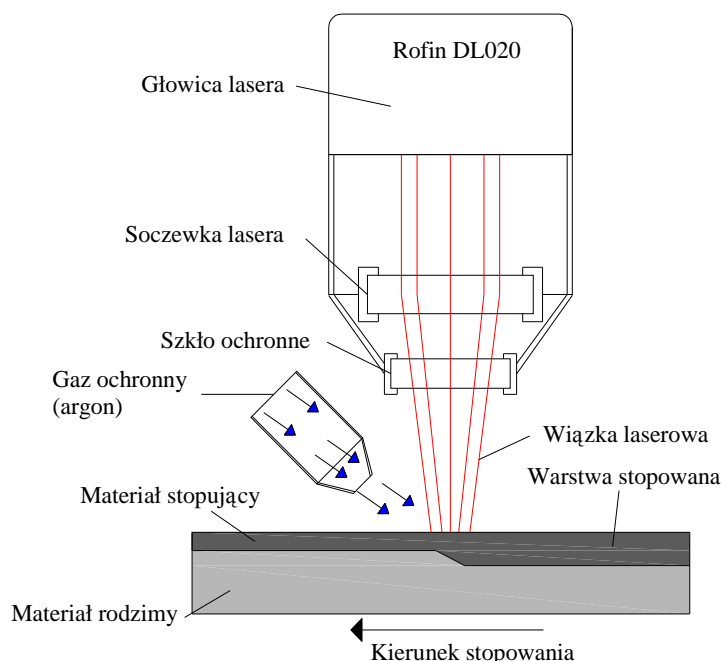
Stopowanie przeprowadzone dla grubości powłoki proszku stopującego wynoszącej 0,05 mm.

<i>PROCES A</i>							
L.p.	Moc lasera użyta do stopowania próbki, kW	Liczba próbek	Grubość naniesionej powłoki z WC, mm	Oznaczenie procesu			
1 proces	2,3	1	0,05	A1			
	2,0						
2 proces	2,0	1		0,05	A2		
	1,6						
3 proces	1,6	1			0,05	A3	
	1,2						
4 proces	2,3	1				0,05	A4
	1,2						

Tablica 3.

Stopowanie przeprowadzone dla grubości powłoki proszku stopującego wynoszącej 0,10 mm.

<i>PROCES B</i>							
L.p.	Moc lasera użyta do stopowania próbki, kW	Liczba próbek	Grubość naniesionej powłoki z WC, mm	Oznaczenie procesu			
1 proces	2,3	1	0,10	B1			
	2,0						
2 proces	2,0	1		0,10	B2		
	1,6						
3 proces	1,6	1			0,10	B3	
	1,2						
4 proces	2,3	1				0,10	B4
	1,2						



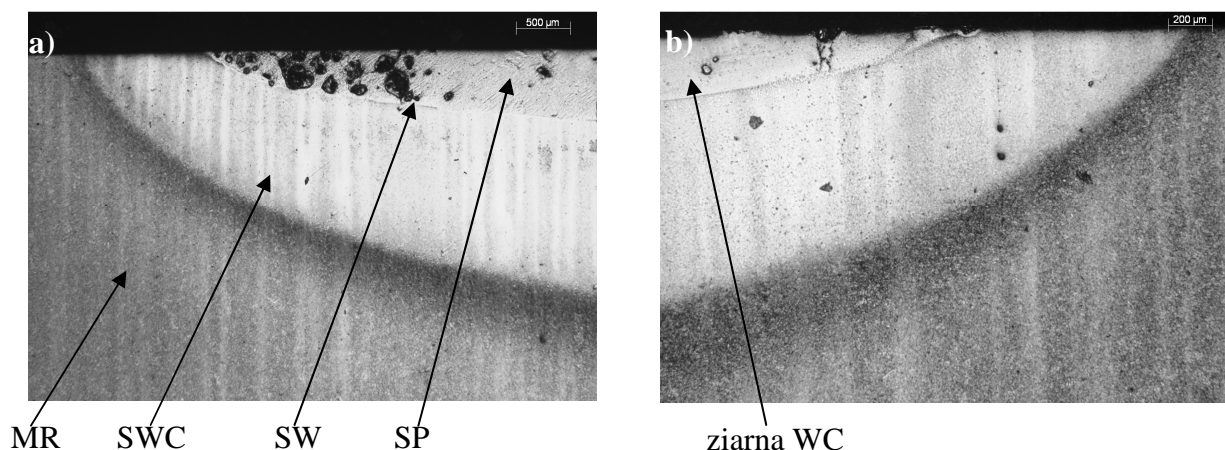
Rysunek 1. Schemat stanowiska do obróbki laserowej.

Obserwację struktur badanej stali na mikroskopie świetlnym Leica MEF4A wykonano przy powiększeniach: 50-1000 x. Na oczyszczonych mechanicznie powierzchniach czołowych próbek wykonano pomiary twardości przy użyciu twardościomierza firmy Zwick ZHR 4150TK z zamontowanym elektronicznym czujnikiem umożliwiającym bezpośredni odczyt twardości metodą Rockwella zgodnie z normą [11]. Badania wykonano dla wszystkich laserowo stopowanych próbek, a także dla próbki wykonanej z badanej stali, poddanej konwencjonalnej obróbce cieplnej. Pomiar chropowatości wykonano za pomocą profilometru stykowego Surtronic 3+ firmy Taylor - Hobson. Powierzchnie próbek oczyszczono acetonem, a następnie zmierzono średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ].

### 3. WYNIKI BADAŃ

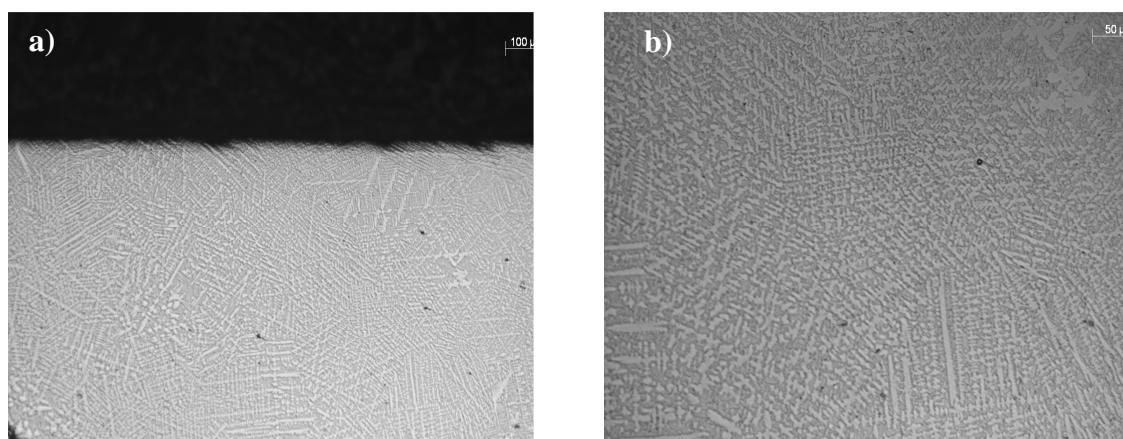
Na podstawie wykonanych badań metalograficznych stwierdzono, że struktura stali X40CrMoV5-1 krzepnącej po stopowaniu węglikiem wolframu charakteryzuje się występowaniem obszarów o zróżnicowanej budowie morfologicznej, co związane jest z krystalizacją stali. Gwałtowne krzepnięcie materiału powoduje „zamrożenie” struktury, co w efekcie prowadzi do występowania kilku wyraźnych stref w przetapianym laserowo materiale (rys. 2 a, b), których grubość i szerokość, jest zależna od parametrów zastosowanej obróbki laserowej. W warstwie wierzchniej można wyróżnić:

- strefę przetopioną, gwałtownie zakrzepniętą i wzbogaconą węglikiem wolframu (SP),
- strefę przejściową strefy przetopionej i strefy wpływu ciepła (SW),
- strefę wpływu ciepła (SWC),
- materiał rodzimy (MR).



Rysunek 2. Struktura stali X40CrMoV5-1 stopowanej laserowo proszkiem WC, a) moc lasera 2,3/2,0 kW, grubość warstwy WC 0,10 mm, pow. 50x, b) moc lasera 1,6/1,2 kW, grubość warstwy WC 0,05 mm, pow. 100x; MR - materiał rodzimy, SWC - strefa wpływu ciepła, SW - strefa przejściowa, SP - strefa przetopiona.

Obszar przetopiony wiązką lasera posiada komórkowo dendrytyczną strukturę ziarn (rys. 3 a, b), co związane jest z dużym gradientem temperatury i wywołanym przez to szybkim i kierunkowym odprowadzaniem ciepła ze strefy przetopionej. W górnej części strefy przetopionej występują długie i grube dendryty, a ich kierunki są równoległe do kierunku odprowadzania ciepła, lecz cechuje je częsta zmiana kierunku. Gałęzie mikrodendrytów ułożone są pod kątem 90° do osi głównej. Przestrzeń pomiędzy kryształami wypełnia eutektyka z węglkami.

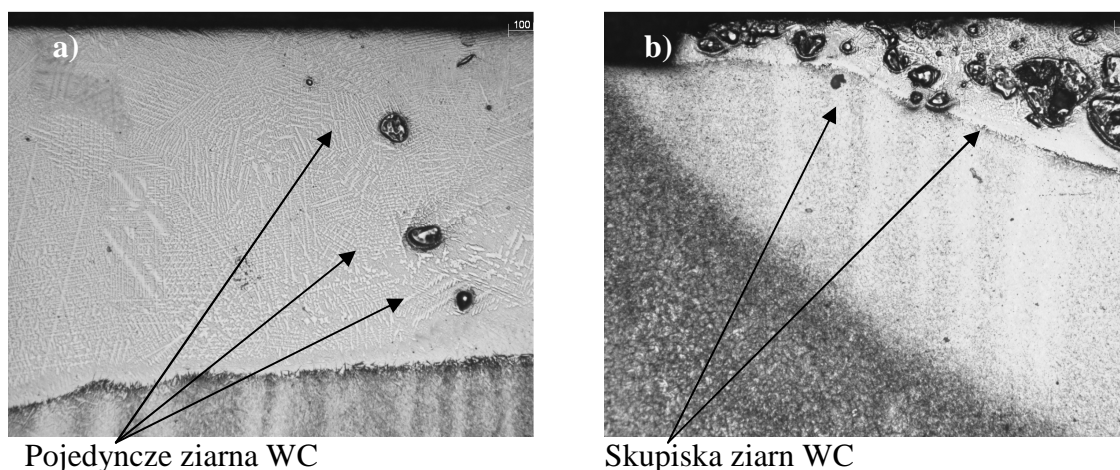


Rysunek 3. Struktura stali X40CrMoV5-1 stopowanej laserowo proszkiem WC, moc lasera 2,3/2,0 kW, grubość warstwy WC 0,10 mm, a) pow. 200x, b) pow. 500x.

Przy dnie przetopienia stwierdzono występowanie drobnych kryształów, w wyniku inicjacji krzepnięcia na nierozpuszczonych węglkach i ziarnach osnowy. We wszystkich wariantach obróbki laserowej strukturę strefy przetopionej stanowią kryształy dendrytyczne, o kierunku wzrostu zgodnym z kierunkiem odprowadzania ciepła. W wyniku przetopienia

powierzchni stali, wraz z powłoką węgla wolframu, w strefie przetopionej obserwuje się znaczne rozdrobnienie struktury.

Wraz ze wzrostem mocy wiązki laserowej użytej do stopowania zwiększa się grubość warstwy przetopionej, a także głębokość strefy wpływu ciepła. Zmniejszenie mocy wiązki laserowej powoduje występowanie w strukturze większej ilości nieprzetopionych ziarn węgla wolframu o nieregularnych kształtach i różnej wielkości (rys. 4 a, b). Ziarna te umieszczone w jeziorunku ciekłego metalu stają się zarodkami nowo krzepnącej fazy. Linia przetopienia nie jest płaska, stwierdzono występowanie wypłytki materiału w kierunku powierzchni (rys. 4 b).



Rysunek 4. Struktura stali X40CrMoV5-1 stopowanej laserowo proszkiem WC, a) moc lasera 2,3/2,0 kW, grubość warstwy WC 0,15 mm, pow. 200x, b) moc lasera 1,6/1,2 kW, grubość warstwy WC 0,15 mm, pow. 200x

Występowanie nieprzetopionych węglików jest spowodowane tym, że temperatura topnienia węgla wolframu wynosząca około 2500°C, jest mniejsza od temperatury topnienia stali, a czas skanowania wiązką lasera powierzchni materiału był zbyt krótki, aby wytworzyć temperaturę, w której węgliki wolframu mogłyby zostać przetopione. Występowanie nieprzetopionych węglików powoduje podniesienie twardości warstwy wierzchniej przetopionej stali. W próbkach, o grubości wstępnie naniesionej powłoki z węgla wolframu wynoszącej 0,05 mm, występują w strukturze nieliczne, pojedyncze węgliki, co można tłumaczyć tym, iż czas skanowania oraz energia dostarczona do powierzchni próbki była wystarczająca, aby przetopić proszek WC znajdujący się na powierzchni próbki i wprowadzić go dyfuzyjnie do struktury stali.

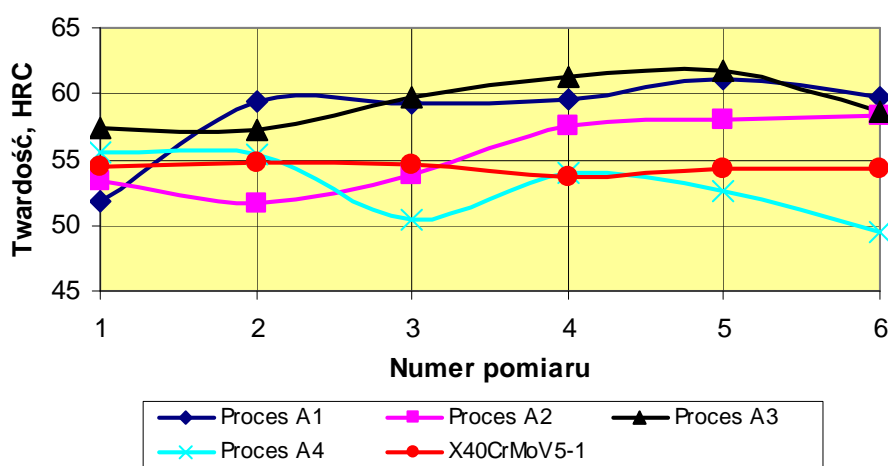
Parametry obróbki laserowej takie jak: moc wiązki lasera i czas interakcji wiązki laserowej z materiałem podłoża mają wpływ na głębokość przetopienia, a także na głębokość strefy wpływu ciepła w stali stopowej narzędziowej X40CrMoV5-1 (tab. 4). Im większa jest moc lasera wykorzystana do stopowania, tym głębokość przetopienia jest większa, a tym samym większa jest strefa wpływu ciepła. Jeśli do stopowania wykorzystano mniejsze moce wiązki laserowej, wówczas linie przetopienia mają regularny, półkolisty kształt o równomiernej głębokości przetopienia. W efekcie zwiększenia mocy wiązki laserowej linie przetopienia stają się faliste o zmiennej głębokości, co spowodowane jest intensywnymi ruchami konwekcyjnymi w jeziorunku ciekłego metalu.

Tablica 4.

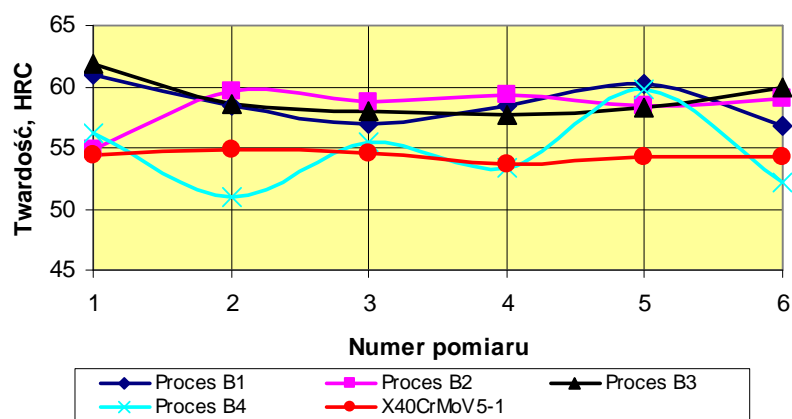
Głębokość przetopienia, strefy wpływu ciepła oraz szerokość lica próbek poddanych laserowemu stopowaniu z wykorzystaniem różnych mocy lasera w zakresie 1,2÷2,3 kW.

Oznaczenie procesu	Moc lasera, kW	Głębokość przetopienia, mm	Głębokość SWC, mm	Głębokość przetopienia + głębokość SWC, mm	Szerokość lica, mm
A1	2,3/2,0	0,816	1,779	2,595	9,24
A2	2,0/1,6	0,645	1,685	2,33	9,11
A3	1,6/1,2	0,347	1,183	1,53	7,69
A4	2,3/1,2	0,791	1,812	2,603	8,21
B1	2,3/2,0	0,946	1,616	2,562	8,76
B2	2,0/1,6	0,575	1,590	2,165	8,52
B3	1,6/1,2	0,636	1,208	1,844	7,97
B4	2,3/1,2	0,951	1,811	2,762	8,71

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że na twardość stali X40CrMoV5-1 poddanej stopowaniu laserowemu wpływa zarówno moc lasera użyta do stopowania, jak również grubość powłoki węgla wolframu naniesiona na powierzchnię próbki (rys. 5 i 6). Wraz ze wzrostem grubości warstwy węgla wolframu rośnie twardość, a zależność jest w tym przypadku liniowa. Wynika to z tego, że im więcej nieroztopionych twardych ziarn węgla wolframu znajduje się w warstwie wierzchniej stali tym większa jest jej twardość (tab. 5 i 6).



Rysunek 5. Porównanie twardości warstwy wierzchniej stali uzyskanej w wyniku stopowania laserowego o grubości naniesionej powłoki WC równej 0,05 mm, w stosunku do twardości stali X40CrMoV5-1 po konwencjonalnej obróbce cieplnej.



Rysunek 6. Porównanie twardości warstwy wierzchniej stali uzyskanej w wyniku stopowania laserowego o grubości naniesionej powłoki WC równej 0,10 mm, w stosunku do twardości stali X40CrMoV5-1 po konwencjonalnej obróbce cieplnej.

Tablica 5.

Twardość powierzchni próbek uzyskanych w wyniku stopowania laserowego, grubość naniesionej powłoki 0,05 mm.

	X40CrMoV5-1	A1	A2	A3	A4
	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC
Średnia	54,4	58,5	55,5	59,4	52,9
Odch. stand.	0,4	3,4	2,8	1,9	2,5
Błąd 5%	2,7	2,9	2,8	3,0	2,6

Tablica 6.

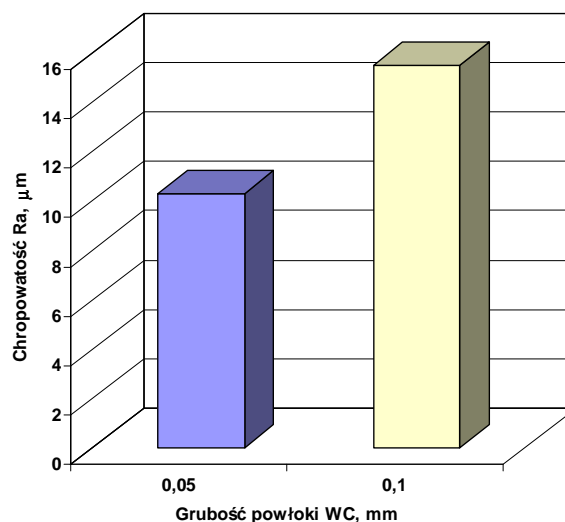
Twardość powierzchni próbek uzyskanych w wyniku stopowania laserowego, grubość naniesionej powłoki 0,10 mm.

	B1	B2	B3	B4
	HRC	HRC	HRC	HRC
Średnia	58,6	58,4	59,1	54,7
Odch. stand.	1,7	1,8	1,6	3,2
Błąd 5%	2,9	2,9	3,0	2,7

Chropowatość warstw wierzchnich stali X40CrMoV5-1 uzyskanych w wyniku stopowania laserowego zawiera się w przedziale  $Ra = 10,3-15,5 \mu\text{m}$ . Maksymalną chropowatość powierzchni  $Ra = 15,5 \mu\text{m}$  uzyskano po stopowaniu z wykorzystaniem sekwencji mocy lasera 2,3 i 2,0 kW oraz grubości powłoki węgla wolframu 0,05 mm, natomiast minimalną chropowatość powierzchni  $Ra = 6,62 \mu\text{m}$  uzyskano na powierzchni próbki otrzymanej w wyniku stopowania z sekwencją mocy lasera odpowiednio 2,3 i 2,0 kW oraz grubością powłoki węgla wolframu 0,10 mm (rys. 7). Optymalnym rozwiązaniem pod względem małej chropowatości powierzchni jest wykorzystanie warstwy węgla wolframu o grubości 0,10 mm i wyższych mocy lasera użytych do dwukrotnego stopowania próbki. Takie



wykonanie procesu laserowego stopowania powoduje uzyskanie powierzchni o małej chropowatości i dobrej jakości. Ma to istotne znaczenie, gdyż wzrost chropowatości powierzchni jest wadą tego rodzaju obróbki laserowej, która stwarza konieczność zastosowania dodatkowej obróbki wykańczającej materiał.



Rysunek 7. Wpływ grubości naniesionej warstwy węgliku wolframu na chropowatość stali X40CrMoV5-1 poddanej stopowaniu laserowemu.

#### 4. PODSUMOWANIE

Współczesny obszar zastosowań stali stopowych narzędziowych stale się powiększa. Szybki rozwój techniki wymaga stosowania nowych technologii, które pozwoliłyby uzyskać warstwę wierzchnią materiałów, taką aby mogła sprostać szczególnie trudnym warunkom pracy nowoczesnych narzędzi.

Odpowiednie poprowadzenie i dobór parametrów procesu stopowania, w postaci:

- mocy wiązki laserowej,
  - sekwencji przetwarzania,
  - prędkości skanowania,
  - grubości naniesionej warstwy materiału stopującego,
- pozwała uzyskać warstwę wierzchnią o bardzo wysokich własnościach użytkowych, a w szczególności wysokiej twardości, odporności na zużycie i to w miejscach szczególnie narażonych na niekorzystne oddziaływania czynników niszczących.

Obszar przetopiony wiązką lasera posiada komórkowo dendrytyczną strukturę ziarn, co związane jest z dużym gradientem temperatury i wywołanym przez to szybkim i kierunkowym odprowadzaniem ciepła ze strefy przetopionej. We wszystkich wariantach obróbki laserowej strukturę strefy przetopionej stanowią kryształy dendrytyczne, o kierunku wzrostu zgodnym z kierunkiem odprowadzania ciepła. W wyniku przetopienia powierzchni stali, wraz z powłoką węgliku wolframu, w strefie przetopionej obserwuje się znaczne rozdrobnienie struktury. Parametry obróbki laserowej, takie jak moc wiązki lasera i czas interakcji wiązki laserowej z materiałem podłoża, mają wpływ na głębokość przetopienia, a także na głębokość strefy wpływu ciepła w stali stopowej narzędziowej X40CrMoV5-1. Im

większa jest moc lasera wykorzystana do stopowania, tym głębokość przetopienia jest większa, a tym samym większa jest strefa wpływu ciepła. Na podstawie obserwacji stwierdzono także, że moc wiązki laserowej wykorzystanej do stopowania próbek ma wpływ na szerokość lica, wraz ze wzrostem mocy wiązki laserowej wzrasta szerokość lica. Na twardość stali X40CrMoV5-1 poddanej stopowaniu laserowemu wpływa zarówno moc lasera użyta do stopowania, jak również grubość powłoki WC naniesionej na powierzchnię próbki. Wraz ze wzrostem grubości warstwy węgla wolframu i zmniejszeniem mocy lasera użytej do stopowania, rośnie twardość, a zależność jest w tym przypadku liniowa. Wynika to z tego, że im więcej nieroztopionych twardych ziarn węgla wolframu znajduje się w warstwie wierzchniej stali, tym większa jest jej twardość. Stwierdzono brak wyraźnej zależności pomiędzy chropowatością warstwy wierzchniej, a mocą wiązki lasera i grubością warstwy stopującej.

Stosowanie obróbek wysokoenergetycznych, w tym obróbki laserowej, pozwala w znaczący sposób poprawić własności warstwy wierzchniej stali, w porównaniu do własności uzyskanych w wyniku konwencjonalnej obróbki cieplnej, uzyskując wysokiej jakości warstwę wierzchnią.

## LITERATURA

1. Adamiec P., Dziubiński J., Regeneracja i wytwarzanie warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
2. Adamiec P., Dziubiński J., Wytwarzanie i właściwości warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
3. Blicharski M., Inżynieria materiałowa, Stal, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
4. Burakowski T., Wierzchoń T., Inżynieria powierzchni metali, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
5. Dobrzański L.A., Hajduczek A., Marciniak J., Nowosielski R., Obróbka cieplna materiałów narzędziowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1990.
6. Bachmann F., Industrial applications of high power diode lasers in materials processing, Applied Surface Science, nr. 208-209, 2003, s. 125-136.
7. Bonek M., Dobrzański L.A., Hajduczek E., Klimpel A., Charakterystyka warstwy wierzchniej stali narzędziowej stopowej X40CrMoV5-1 do pracy na gorąco stopowanej przy użyciu lasera diodowego dużej mocy, 3rd Scientific Conference on Materials, Mechanical and Manufacturing Engineering, Gliwice-Wisła 2005, s. 176-186.
8. Dobrzański L.A., Bonek M., Hajduczek E., Klimpel A., Lisiecki A., Comparison of the structures of the hot-work tool steels laser modified surface layers, Journal of Materials Processing Technology, nr. 164-165, 2005, s. 1014-1023.
9. Klimpel A., Lasery diodowe w spawalnictwie, Przegląd Spawalnictwa, nr. 8, 1999, s. 1-7.
10. Kusiński J., Lasery i ich wykorzystanie w inżynierii materiałowej, Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków 2000.
11. PN-EN ISO 6508-1:2002 Metale. Pomiar twardości sposobem Rockwella. Część 1: Metoda badań (skala A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)