



Wpływ laserowego stopowania na wybrane własności warstw wierzchnich stali narzędziowych stopowych do pracy na gorąco

D. Pencakowska^a, E. Jonda^b, T. Tański^c

^a Studentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie

^c Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
email: ewa.jonda@polsl.pl

Streszczenie: Celem pracy jest przedstawienie wpływu stopowania laserowego na własności warstw wierzchnich stali narzędziowych stopowych do pracy na gorąco. Badania wykonane w ramach pracy obejmują stopowanie warstwy wierzchniej stali narzędziowej do pracy na gorąco 55NiCrMoV7 sproszkowanym węglikiem krzemu z wykorzystaniem lasera włóknowego dużej mocy oraz określenie zmian w warstwie wierzchniej spowodowanych tym procesem.

Abstract: This study presents the influence of laser alloying on the properties of surface layers of the hot work tool steels. The studies include process of laser alloying hot work tool steel 55NiCrMoV7 with the silicon carbide, that has been carried out using the high power fiber laser, and study of the modifications in structure and properties caused by that process.

Słowa kluczowe: Obróbka laserowa, stopowanie laserowe, przetapianie laserowe, węglik krzemu.

1. WSTĘP

Obszar zastosowań stali narzędziowych stopowych do pracy na gorąco jest bardzo szeroki, dlatego nieustannie pracuje się nad poprawianiem ich własności. Wymagania, jakie się im stawia to głównie wytrzymałość i jednocześnie ciągliwość rdzeń materiału, a także twarde, odporne na ścieranie, zmęczenie cieplne i korozję warstwy wierzchnie. Jedną z technologii gwarantujących takie własności jest stopowanie laserowe, które dzięki wyjątkowej precyzji, wysokiej energii działania oraz bezkontaktowości pracy jest coraz bardziej popularne w inżynierii powierzchni [1,2].

Stopowanie laserowe polega na wzbogacaniu przetopionej warstwy wierzchniej w dodatki stopowe i jednoczesnej zmianie jej struktury, przez intensywne mieszanie materiału stopującego i podłoża w ciekłym jeziorce. Własności warstw stopowanych laserowo różnią

się od własności materiału podłoża, jak i materiału stopującego. Zależą one od rodzaju wprowadzanego pierwiastka oraz w dużym stopniu od parametrów obróbki laserowej, które wpływają na szybkość procesu grzania, topnienia, mieszania i krzepnięcia materiału, a zatem decydują o strukturze uzyskanych warstw, ich grubości, występujących naprężeniach i ogólnych własnościach użytkowych. Dlatego możliwe jest wytworzenie warstw powierzchniowych o podwyższonych własnościach wytrzymałościowych, jak odporność na ścieranie, cechujących się dobrą odpornością na korozję, erozję, wytrzymałością zmęczeniową, odpornością na działanie agresywnych środków chemicznych, czy żaroodpornością. Pierwiastkami stopowymi w procesie stopowania są głównie stopy metali, najczęściej chrom, kobalt, mangan, molibden, niob, wanad, wolfram, a także nadstopy, stelliity, węgliki, borki i azotki [2÷5].

Laserowe wzbogacanie warstw wierzchnich stosowane jest w celu poprawy twardości oraz odporności na ścieranie, głównie w wyniku wprowadzenia dodatków stopujących do osnowy materiału. Poprzez odpowiedni dobór pierwiastków stopowych oraz parametrów proces ten pozwala na uzyskanie warstw wierzchnich o strukturze i własnościach porównywalnych ze stalami wysokostopowymi. Podobnie jak w procesie przetapiania laserowego, na granicy przetopionej warstwy oraz podłoża występuje duży gradient temperatur, co wywołuje gwałtowne ochłodzenie i krzepnięcie ciekłego metalu. Prędkości chłodzenia dochodzą do 10^{11} K/s, co może w niektórych przypadkach powodować samohartowanie cienkiej warstwy materiału podłoża. Masa i wymiary obrabianego przedmiotu nie stanowią w tym procesie ograniczenia, zapewniony musi być jedynie dostęp do stopowanego obszaru [3,4,6].

2. METODYKA BADAŃ

Do badań wykorzystano stal narzędziową stopową do pracy na gorąco 55NiCrMoV7 o składzie chemicznym zgodnym z normą PN-EN ISO 4957, przedstawionym w tablicy 1 [7].

Tablica 1. Skład chemiczny badanej stali [7]

Table 1. Chemical composition of investigated steel [7]

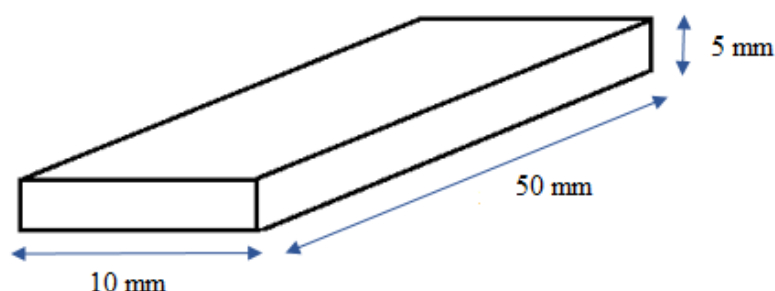
Gatunek stali	Średnie stężenie pierwiastków w stali, %						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni
55NiCrMoV7	0,5÷0,6	0,1÷0,4	0,6÷0,9	0,8÷1,2	0,35÷0,55	0,05÷0,15	1,5÷1,8

Jest to stal o podwyższonej hartowności, twardości i jednocześnie ciągliwości oraz o średniej odporności na odpuszczanie. Wykazuje znaczną wytrzymałość w podwyższonej temperaturze oraz odporność na uderzenia oraz gwałtowne zmiany temperatury w czasie pracy. Stosowana jest głównie na jednolite matryce kuźnicze średnie i małe oraz na kowadła do pras i młotów, płyt okrawających, na mniej obciążone narzędzia do wyciskania rur i prętów ze stopów miedzi i metali lekkich, a także na matryce do wytłaczania wyrobów z tworzyw sztucznych [1].

Materiał próbek dostarczono w postaci pręta, w stanie wyżarzonym, z którego wycięto próbki w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 50 x 10 x 5 mm. Kształt i wymiary próbek użytych do badań pokazano na rysunku 1.

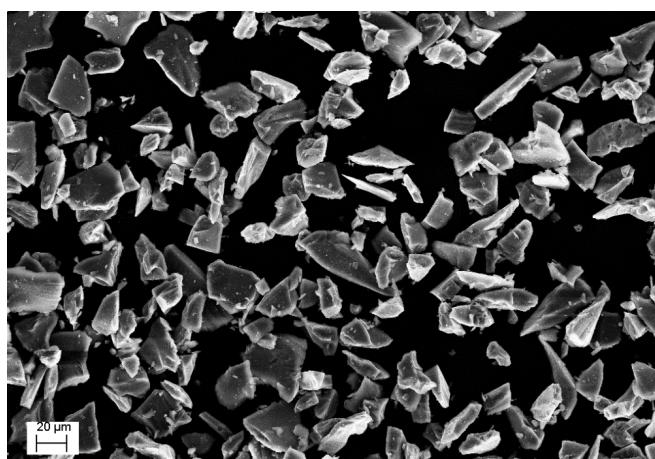
Do stopowania laserowego użyto węglika krzemu SiC o gęstości $3,21 \text{ g/cm}^3$ i granulacji $32 \mu\text{m}$ (rys. 2). Węgiel krzemu zwany jest też karborundem ze względu na jego twardość, która zawiera się pomiędzy twardością diamentu i korundu, i wynosi 9,5 w skali Mohsa (tab. 2).

Charakteryzuje się dużą wytrzymałością mechaniczną oraz wyjątkowo wysokim przewodnictwem cieplnym i elektrycznym. Kolejną jego zaletą jest bardzo dobra odporność na wysokie temperatury, natomiast główną wadą duża kruchość. Węglík krzemu stosowany jest do pokrywania powierzchni ciernych pracujących w wysokich temperaturach. Unikatowe własności fizykochemiczne węgla krzemu sprawiają, że jest najważniejszym materiałem z grupy tzw. wysokoogniotrwałej ceramiki specjalnej [5].



Rysunek 1. Kształt i wymiary próbki ze stali narzędziowej stopowej do pracy na gorąco 55NiCrMoV7

Figure 1. The shape and dimensions of the sample of the 55NiCrMoV7 hot work tool steel



Rysunek 2. Węglík krzemu użyty do stopowania (SEM)

Figure 2 The silicon carbide used for the alloying (SEM)

Tablica 2. Wybrane własności proszku węgla krzemu [5]

Table 2. Selected properties of SiC powder [5]

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

Stopowanie laserowe stali 55NiCrMoV7 proszkiem SiC wykonano na laserze włóknowym dużej mocy (400 W÷4 kW) – Ytterbium Laser System YLS-4000-S2T. Wiązka lasera miała przekrój prostokątny o wymiarach 6 x 2 mm i podczas stopowania pracowała w trybie ciągłym.

Stopowanie laserowe wykonano jako proces jednoetapowy, tj. materiał stopujący w postaci proszku podawany był w strumieniu gazu ochronnego do obszaru jeziora przetopienia utworzonego na powierzchni, gdzie ulegał wtopieniu. W celu ochrony obszaru przetopienia zastosowano gaz ochronny – azot, o natężeniu przepływu 10 l/min. Proszek stopujący podawano z jednego z czterech zasobników, również w osłonie gazowej azotu, z prędkością 15 l/min, co gwarantowało dostarczenie w miejsce przetapiania ok. 3 g proszku SiC na minutę.

Stopowanie wykonano na trzech próbkach, po jednym ściegu, każde z zastosowaniem innej mocy lasera, natomiast ze stałą prędkością skanowania 5 mm/s. Pierwszą próbkę stopowano z mocą 500 W, kolejną wiązką o mocy 800 W i ostatnią z mocą 1100 W. Parametry każdej z operacji przedstawiono w tablicy 3.

Tablica 3. Parametry procesów stopowania laserowego

Table 3. The parameters of the laser alloying process

Gatunek stali	Parametry procesu stopowania			
	Proszek stopujący	Moc wiązki lasera, W	Prędkość skanowania, mm/s	Natężenie przepływu gazu, l/min
55NiCrMoV7	SiC	500	5	10
	SiC	800	5	10
	SiC	1100	5	10

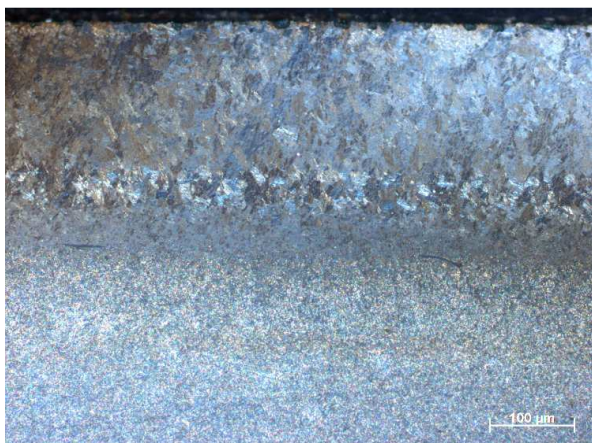
3. WYNIKI BADAŃ

W celu określenia zmian, jakie zaszły w wyniku stopowania laserowego warstwy wierzchniej badanej stali wykonano:

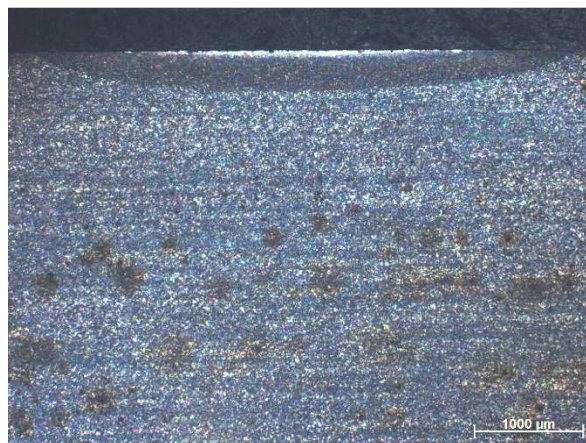
- obserwacje struktur na mikroskopie świetlnym,
- obserwacje powierzchni na mikroskopie stereoskopowym,
- obserwacje struktury w elektronowym mikroskopie skaningowym,
- badanie twardości.

Obserwacje struktur badanej stali wykonano za pomocą mikroskopu świetlnego Zeiss Axio Observer Z1 przy powiększeniach 25÷1000 x, jak również w mikroskopie elektronowym skaningowym DSM-940 firmy Opton przy napięciu przyspieszającym 20 kV, z wykorzystaniem detektora elektronów wtórnych oraz wstecznie rozproszonych. Pomiary twardości metodą Rockwella wykonano przy użyciu twardościomierza firmy Zwick ZHR 4150TK z zamontowanym elektronicznym czujnikiem umożliwiającym bezpośredni odczyt twardości. Badania wykonano dla wszystkich laserowo przetopionych lub stopowanych próbek, a także dla próbki wykonanej ze stali dostarczonej w stanie wyżarzonym.

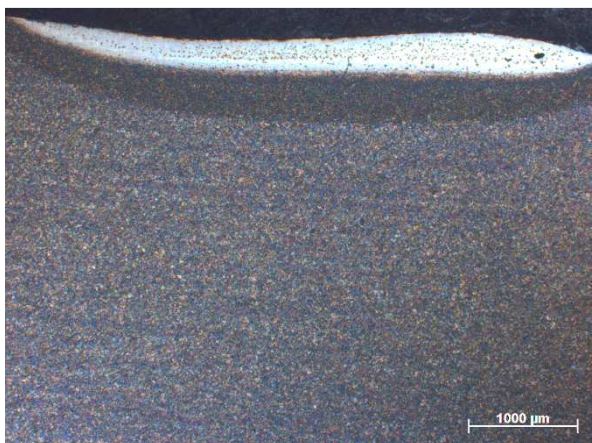
Na podstawie analiz w mikroskopie świetlnym stwierdzono, że poprzez gwałtowne krzepnięcie przetopionego materiału, powstają w nim wyraźne strefy, których wielkość jest zależna od parametrów obróbki laserowej. W wyniku stopowania powierzchni próbek otrzymano warstwę wierzchnią, na którą składają się koncentrycznie ułożone strefy: przetopiona (SP) oraz strefa wpływu ciepła (SWC), pomiędzy którymi występują granice przejść (rys. 3). Przy stałej prędkości stopowania laserowego następuje wzrost grubości strefy wraz ze wzrostem mocy lasera. Wzrasta także pofałdowanie obszaru stopowanego, a nierówności dna przetopienia są zauważalnie większe (rys. 4÷6).



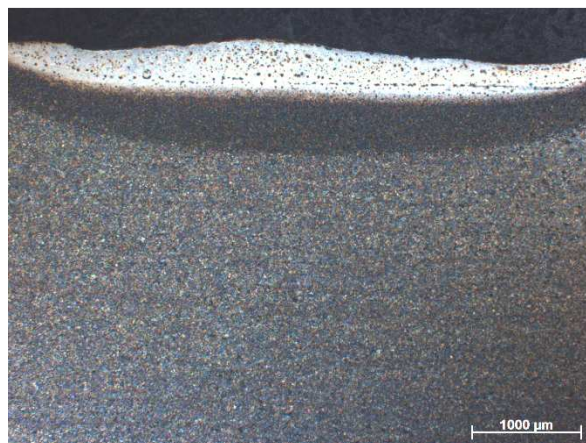
Rysunek 3. Granica strefy przetopionej warstwy wierzchniej stali, moc lasera 800 W
Figure 3. The boundary of the remelted zone of the surface layer, laser power 800 W



Rysunek 4. Głębokość i kształt przetopienia próbki stali stopowanej z mocą 500 W
Figure 4. The depth and shape of cross section of the alloyed samples, laser power 500 W



Rysunek 5. Głębokość i kształt przetopienia próbki stali stopowanej z mocą 800 W
Figure 5. The depth and shape of cross section of the alloyed samples, laser power 800 W



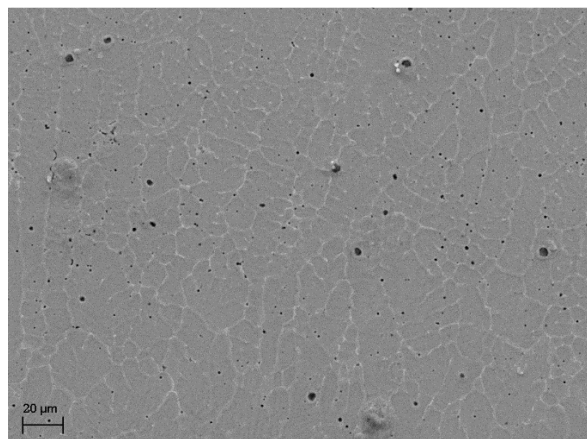
Rysunek 6. Głębokość i kształt przetopienia próbki stali stopowanej z mocą 1100 W
Figure 6. The depth and shape of cross section of the alloyed samples, laser power 1100 W

Obserwacje mikroskopowe wykazały, że warstwa przetopiona każdej próbki ma budowę dendrytyczną (rys. 7÷9). Zorientowanie dendrytów zależne jest głównie od kierunku odprowadzania ciepła. Porównując strukturę materiału rodzimego z obszarem przetopionym oraz strefą wpływu ciepła można również stwierdzić, że struktura w miejscu obróbki laserowej uległa dość znacznemu rozdrobnieniu i jest stosunkowo jednorodna, co ma bezpośredni wpływ na wzrost twardości stopowanej powierzchni. W wyniku analizy wykonanych zdjęć stwierdzono, że laserowa modyfikacja warstwy wierzchniej wpływa na rozdrobnienie struktury w warstwie wierzchniej nawet przy najmniejszej zastosowanej mocy lasera.



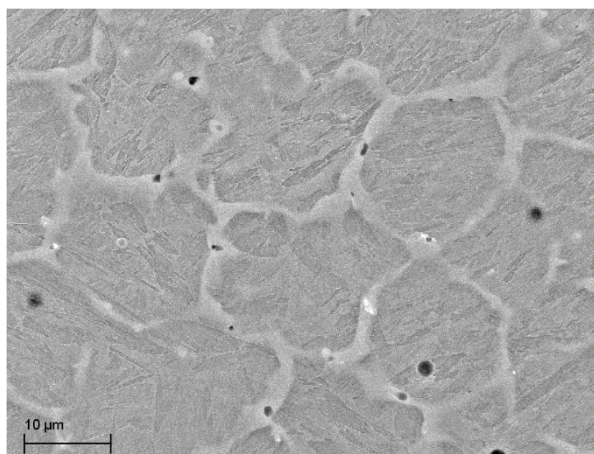
Rysunek 7. Struktura przetopienia i strefy wpływu ciepła, moc lasera 500 W

Figure 7. The structure of remelting zone and heat affected zone, laser power 500 W



Rysunek 8. Struktura strefy przetopienia, moc lasera 500 W (SEM)

Figure 8. The structure of remelting zone, laser power 500 W (SEM)



Rysunek 9. Struktura strefy przetopienia, moc lasera 500 W (SEM)

Figure 9. The structure of remelting zone, laser power 500 W (SEM)

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 55NiCrMoV7 (tab. 4). Im większa jest moc lasera wykorzystana do stopowania, tym głębokość przetopienia jest większa, a tym samym większa jest strefa wpływu ciepła. Wyniki badań potwierdzają dane z przeglądu literaturowego, według których im większa jest moc wiązki lasera, tym większa głębokość przetopienia materiału oraz wielkość strefy wpływu ciepła (rys. 10).

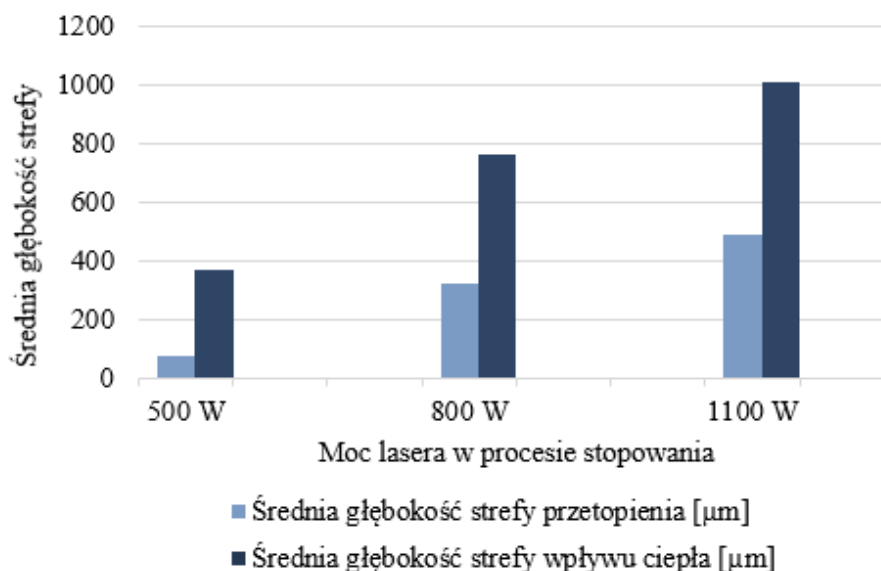
Topografia i jakość powierzchni kształtowanych wiązką promieniowania laserowego jest rezultatem specyficznego procesu cieplno-dynamicznego, w wyniku oddziaływania impulsu laserowego o dużej mocy na obrabiany materiał. Na rysunku 11 (a÷d) pokazano widok lica po stopowaniu warstwy wierzchniej węglikiem krzemu SiC. Stwierdzono, że warunki stopowania, a w szczególności moc wiązki lasera HPDL oraz rodzaj materiału stopującego mają istotny wpływ na kształt lica ściegu. W przypadku stali stopowanej SiC stwierdzono

zmiany topografii, wzrost nierówności oraz chropowatości powierzchni, co związane jest fluktuacją materiału stopującego wywołaną zmianami napięcia powierzchniowego przetapianego materiału oraz warunków cieplnych związanych ze zwiększoną absorpcją promieniowania laserowego na powierzchni węglików wprowadzanych do jeziora ciekłego metalu. W wyniku obserwacji powierzchni można też stwierdzić, że próbka stopowana z największą mocą ma największą chropowatość, podczas gdy na próbce stopowanej z małą mocą, nierówności powierzchni są znacznie mniejsze.

Tablica 4. Głębokość strefy przetopienia oraz strefy wpływu ciepła w zależności od mocy wiązki lasera

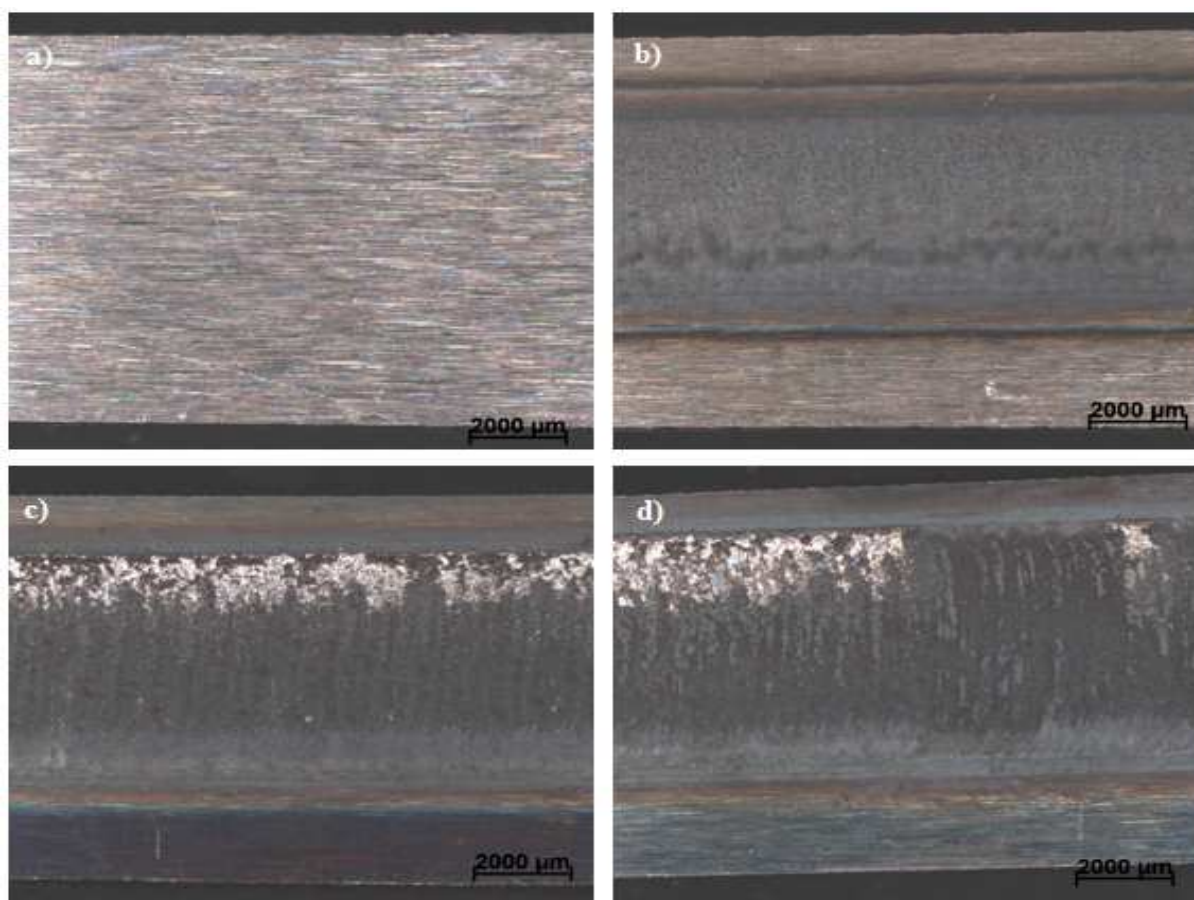
Table 4. Remelting depth zone and heat affected zone, depending on the laser power

Rodzaj próbki		Głębokość strefy przetopienia, μm	Średnia, μm	Głębokość strefy wpływu ciepła, μm	Średnia, μm
Stal obrobiona laserowo	Moc 500 W	67	79	346	372
		74		389	
		96		382	
	Moc 800 W	265	319	772	765
		324		684	
		368		838	
	Moc 1100 W	428	486	1037	1007
		559		956	
		472		1029	



Rysunek 10. Średnia głębokość strefy przetopienia oraz strefy wpływu ciepła w zależności od mocy lasera użytej w trakcie obróbki laserowej

Figure 10. The average depth of melting zone and heat affected zone, depending on the power of the laser used during the laser treatment



Rysunek 11. Widok lica warstwy wierzchniej stali: a) nieobrobionej cieplnie; oraz stopowanej laserowo z mocą lasera: b) 500 W, c) 800 W, d) 1100 W

Figure 11. The face view of the surface layer of steel: a) untreated heat, and alloyed with laser power b) 500 W, c) 800 W, d) 1100 W

Na podstawie analizy zdjęć oraz pomiarów szerokości lica przetopienia każdej z próbek można wnioskować, że szerokość obszaru przetopionego również wzrasta wraz ze zwiększeniem mocy lasera (tab. 5).

Tablica 5. Wpływ mocy wiązki lasera na szerokość przetopienia

Table 5. The effect of laser power on the width of the melting

Rodzaj próbki	Średnia szerokość przetopienia, μm
Stal stopowana z mocą 500 W	5904
Stal stopowana z mocą 800 W	6376
Stal stopowana z mocą 1100 W	6492

W wyniku obserwacji mikroskopowych stwierdzono występowanie korozji próbki w strefie przetopienia, a także w materiale rodzimym, która spowodowana jest niską zawartością chromu w stali oraz nieodpowiednim przechowywaniem niezabezpieczonej próbki. Nie jest jednak możliwe zaobserwowanie węglików krzemu, prawdopodobnie ze względu na fakt, że nie zostały one wtopione z powodu nieprawidłowo dobranych parametrów procesu.

Po wykonaniu analizy zdjęć całego obszaru stopowanego stwierdzono, iż mało prawdopodobne jest, by węgiel krzemu wtopił się w podłoże. Można zatem przyjąć, że zamiast procesu stopowania miało miejsce jedynie laserowe przetapianie warstwy wierzchniej badanej stali.

Wyniki pomiarów twardości próbek przed i po obróbce laserowej jednoznacznie potwierdzają, że mimo braku twardych cząstek węgla krzemu, sam proces przetopienia warstwy wierzchniej znacząco zwiększa jej twardość (tab. 6). Twardość stali rośnie wraz ze wzrostem mocy lasera. Przy dwukrotnym zwiększaniu mocy lasera, za każdym razem o 300 W, twardość wzrasta ponad dwa razy. Stal nieobrobiona laserowo ma najmniejszą średnią twardość, która wynosi 217 HV. Najniższą twardość spośród stali modyfikowanych laserowo wynoszącą 249 HV ma próbka przetapiana z najmniejszą mocą wiązki, tj. 500 W. Największą z badanych twardości stwierdzono dla próbki stali obrobionej z najwyższą mocą lasera i wynosi 512 HV.

Tablica 6. Twardość warstw wierzchnich badanej stali stopowanych różnymi mocami lasera
Table. 6 The hardness of the surface layers of steel alloyed different laser powers

Rodzaj próbki		Twardość ,HV	Średnia, HV	Odchylenie standardowe, HV
Stal nieobrobiona cieplnie		211	217	5,51
		217		
		222		
Stal obrobiona laserowo	Moc 500 W	249	249	10
		269		
		259		
	Moc 800 W	488	465	38,69
		486		
		420		
	Moc 1100 W	488	512	20,88
		526		
		522		

Twardość stali 55NiCrMoV7 po konwencjonalnej obróbce cieplnej mieści się w przedziale 370-425 HV, a więc jest zdecydowanie mniejsza niż twardość powierzchni próbek stopowanych laserowo z dużą mocą wiązki. Wzrost twardości przy prawidłowo wykonanym procesie obróbki laserowej wiąże się z obecnością twardych węglików krzemu, jednakże mimo wykonania samego procesu przetopienia warstwy wierzchniej, bez wzbogacania jej w cząstki stopujące, twardość powierzchni uległa zwiększeniu. Ma to związek z wystąpieniem przemian fazowych oraz rozdrobnieniem i ujednorodnieniem struktury w miejscu przetopienia. Poprzez zwiększenie twardości następuje wzrost kilku innych własności mechanicznych materiału, szczególnie odporności na ścieranie, co ma istotne znaczenie w przypadku trwałości narzędzi wykonanych z badanej stali.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie badań struktury stali 55NiCrMoV7 nie stwierdzono występowania węgla krzemu użytego do stopowania laserowego. Powodem tego były prawdopodobnie nieprawidłowo dobrane parametry, np. niewystarczająco duża moc lasera, zbyt duża szybkość

podawania proszku lub nieodpowiednia prędkość skanowania. Obserwacje struktury pozwoliły na ustalenie, że wtopienie proszku materiału stopującego było niemożliwe i wykonano jedynie proces przetapiania laserowego.

Przetapianie laserowe ma znaczący wpływ na wzrost twardości modyfikowanej powierzchni, która często przewyższa twardość materiału uzyskaną podczas konwencjonalnej obróbki cieplnej. Zwiększenie twardości wiąże się głównie z rozdrobnieniem i ujednorodnieniem przetopionej struktury.

Przy stałej prędkości skanowania, głównym parametrem obróbki laserowej jest zastosowana moc wiązki lasera, która decyduje o wielkości uzyskanego przetopienia oraz strefy wpływu ciepła. Wraz ze wzrostem mocy lasera rośnie głębokość i szerokość lica przetopienia, a tym samym wielkość strefy wpływu ciepła, natomiast dno przetopienia jest bardziej pofałdowane.

LITERATURA

1. L.A. Dobrzański, *Metaloznawstwo opisowe stopów żelaza*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2007.
2. E. Jonda, *Wpływ laserowego przetapiania i stopowania na strukturę i własności warstw wierzchnich stali X40CrMoV5-1*, Praca doktorska, Biblioteka Główna Politechniki Śląskiej, Gliwice.
3. A. Klimpel, *Technologie laserowe*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2012.
4. J. Kusiński, *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków, 2000.
5. L.A. Dobrzański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, *Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich*, *Open Access Library* 5 (2011) 1-480.
6. M. Piec, L.A. Dobrzański, K. Labisz, Z. Trojanova, A. Klimpel, *Poprawa własności warstwy wierzchniej stali narzędziowej stopowej do pracy na gorąco metodą obróbki laserowej*, *Przegląd spawalnictwa* 79/11 (2007) 3-7.
7. Polska norma. PN-EN ISO 4957: *Stale narzędziowe*, kwiecień 2004.