



Technologie laserowej obróbki powierzchniowej: laserowa obróbka cieplna

W. Waliczek^a, K. Zwolak^a, M. Bonek^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny

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

Streszczenie: W artykule zamieszczono informacje dotyczące laserowej obróbki cieplnej, a w szczególności uwzględniono hartowanie laserowe. Dokonano analizy wpływu parametrów procesu na zmianę struktury oraz grubość obrobionej cieplnie warstwy wierzchniej. Następnie przedstawiono przykłady wykorzystania laserowej obróbki cieplnej oraz wyniki badań zestawiono i porównano z materiałami poddanymi obróbce cieplnej objętościowej, takimi jak żeliwo, stal szybko tnąca, stal narzędziowa do pracy na gorąco i na zimno, stal konstrukcyjna i narzędziowa z warstwą naborowaną.

Abstract: This article contains information about laser heat treatment in particular, includes laser hardening. The analysis of the influence of process parameters on the change in the structure and the thickness of the surface layer. After that, it was presented examples of using laser heat treatment and test results was summarized and compared with volumetric heat treatment materials, such as: cast iron, high speed steel, hot working and cold working tool steel, constructional steel and tool steel with the borided layer.

Słowa kluczowe: laserowa obróbka cieplna, warstwa powierzchniowa, żeliwo, stal szybko tnąca, stal narzędziowa, stal konstrukcyjna

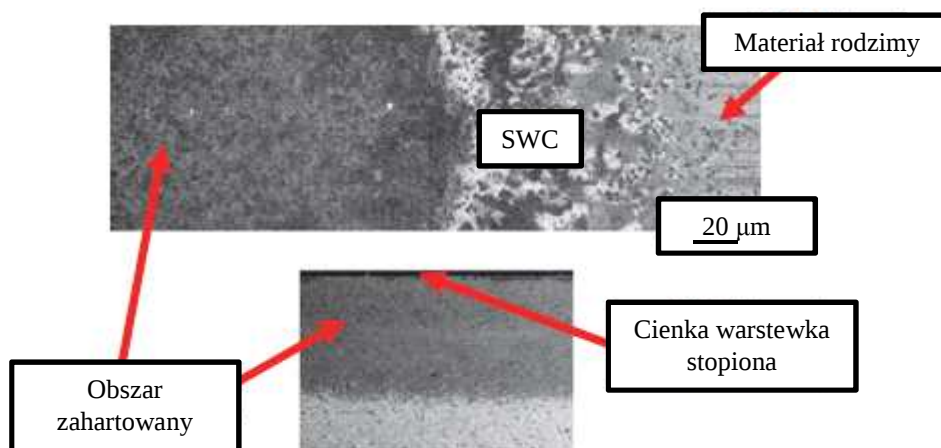
1. WSTĘP

Własności użytkowe przedmiotów w dużym stopniu zależą od obróbki cieplnej, którą można przeprowadzić różnymi metodami, m.in. z wykorzystaniem energii wiązki laserowej. Do obróbki warstw wierzchnich za pomocą energii promieniowania laserowego zalicza się napawanie, stopowanie, przetapianie ale również laserową obróbkę cieplną. Technologia laserowej obróbki cieplnej jest coraz częściej stosowana w produkcji nowoczesnych części maszyn i urządzeń, zastępując konwencjonalne metody poprawiania własności warstw wierzchnich, takich jak hartowanie indukcyjne, płomieniowe, kąpielowe czy elektrolityczne. Zaletą tej metody jest możliwość wykonania dowolnych warstw powierzchniowych na obrabianym przedmiocie o dowolnym kształcie, wielkości czy masie, podobnie jak w procesach przetapiania i stopowania warstw wierzchnich. Dzięki temu technologia ta umożliwia obróbkę

części, które nie mogą być hartowane innymi metodami, dodatkowo proces ten może być w pełni zautomatyzowany. Celem procesu jest uzyskanie twardej i odpornej na ścieranie warstwy powierzchniowej. Dobrze hartują się materiały o zawartości węgla wynoszącej min. 0,22% ich masy, np. stale konstrukcyjne, stale do ulepszania cieplnego, stale narzędziowe, staliwa, żeliwa oraz odlewy z żeliwa modyfikowanego (grafit płatkowy) i sferoidalnego. Hartowanie laserowe umożliwia obróbkę materiałów już wcześniej nawęglonych lub naazotowanych [1,2].

2. TECHNOLOGIA LASEROWEJ OBRÓBKI CIEPLNEJ

Podczas hartowania laserowego wiązka o wysokiej gęstości mocy nagrzewa powierzchnię obrabianego elementu o ściśle określonej grubości do określonej temperatury (zazwyczaj poniżej solidus) w osłonie gazowej z prędkościami nawet do $10^6 \div 10^{11}$ °C/s. Schładzanie obrabianej warstwy odbywa się samoczynnie z prędkościami dochodzącymi do $10^5 \div 10^6$ °C/s. Podobnie jak w procesach przetapiania, stopowania czy napawania strefa wpływu ciepła SWC (rys. 1) powstaje pod warstwami wierzchnimi. Głębokość hartowania zależy od rodzaju materiału i parametrów procesu i może osiągać $1,5 \div 2$ mm [2].



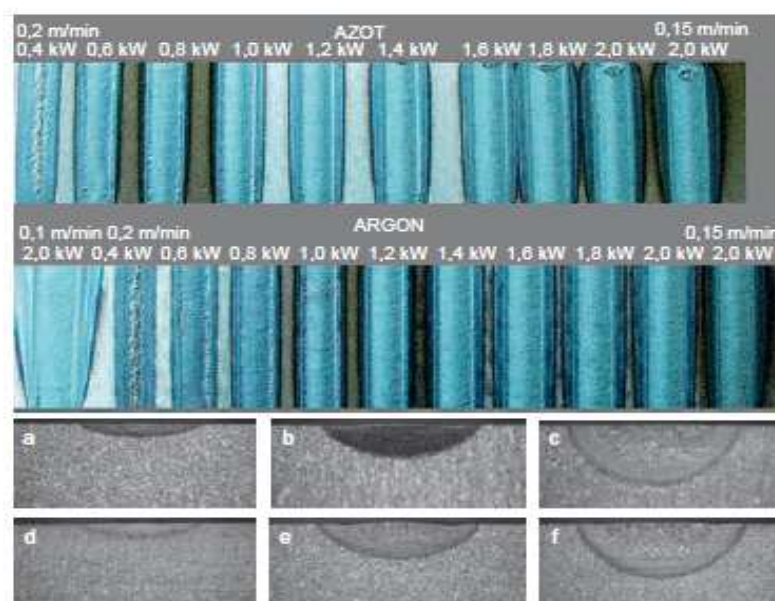
Rysunek 1. Mikrostruktura obszaru zahartowanego wiązką impulsową lasera Nd:YAG [1]

Figure 1. Microstructure of the hardened area by pulsed beam of the laser: Nd:YAG [1]

Zmiany jakie zachodzą w strukturze i grubość warstwy zahartowanej zależą od łącznego oddziaływania parametrów procesu, a mianowicie [1]:

- długości ogniskowej wiązki lasera,
- położenia ogniska wiązki laserowej względem górnej powierzchni obrabianego cieplnie przedmiotu,
- kształtu i wymiaru ogniska wiązki laserowej,
- czasu trwania i częstotliwości powtarzania impulsu,
- rodzaju i natężenia przepływu gazu ochronnego,
- prędkości przesuwu wiązki laserowej,
- mocy wiązki laserowej promieniowania ciągłego,
- trajektorii ruchu wiązki laserowej – ruch wahadłowy (amplituda, częstotliwość, kształt toru ruchu).

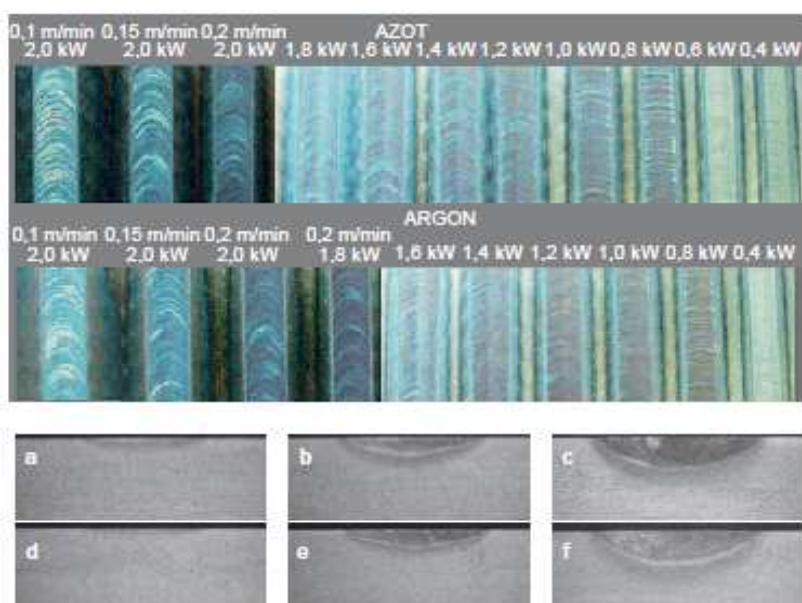
Kluczowym parametrem jest dobór mocy wiązki laserowej oraz prędkość przesuwu tej wiązki na jakość powierzchni. Dzięki tym parametrom proces obróbki cieplnej przechodzi w proces nadtapiania, początkowo bardzo cienkiej warstwy, poniżej której tworzy się SWC. Gazem ochronnym najczęściej używanym w tej technologii jest argon, ale również azot. Wpływ mocy wiązki oraz zastosowanej atmosfery ochronnej na kształt ściegu płytki ze stali narzędziowej do pracy na gorąco (55NiCrMoV2) oraz do pracy na zimno (X210Cr12) przedstawiają rysunki 2 i 3 [1,2].



Rysunek 2. Wpływ parametrów procesu laserowego hartowania powierzchni płytki ze stali narzędziowej 55NiCrMoV2 na kształt ściegu w atmosferze argonu (laser diodowy HPDL): a) 0,4 kW, 0,2 m/min, b) 1,4 kW, 0,2 m/min, c) 2,0 kW, 0,1 m/min; oraz w atmosferze azotu: d) 0,4 kW, 0,2 m/min, e) 1,4 kW, 0,2 m/min, f) 2,0 kW, 0,1 m/min, pow. 10x [2]

Figure 2. Influence of laser heat treatment process parameters of 55NiCrMoV2 plate surface on stitch shape in argon atmosphere (by using diode laser HDPL): a) 0,4 kW, 0,2 m/min, b) 1,4 kW, 0,2 m/min, c) 2,0 kW, 0,1 m/min; and in nitrogen atmosphere: d) 0,4 kW, 0,2 m/min, e) 1,4 kW, 0,2 m/min, f) 2,0 kW, 0,1 m/min, expansion 10x [2]

Utworzona warstwa w wyniku przetopienia laserowego ma drobnoziarnistą strukturę, zapewnia to znacznie wyższą twardość i odporność na zużycie ściernie, bez spadku uderzalności w stosunku do materiału podłoża. Wpływa na to szereg różnych czynników, a mianowicie parametry związane z rodzajem stosowanego lasera (tab. 1), a przede wszystkim emitowaną przez niego wiązką, rozkładem energii w wiązce czy też rodzaj i natężenie przepływu gazu ochronnego. Materiał obrabiany jest również istotny (tab. 2), jego stan powierzchni, własności fizyczne (np. temperatura topnienia) oraz własności cieplne takie jak przewodnictwo cieplne czy ciepło właściwe. Dlatego obróbka laserowa z tymi samymi parametrami wiązki laserowej materiału o różnych własnościach cieplnych może spowodować zupełnie różne efekty [3].



Rysunek 3. Wpływ parametrów procesu laserowego hartowania powierzchni płytki ze stali narzędziowej X210Cr12 na kształt ściegu w atmosferze argonu (laserem diodowym HPDL): a) 0,4 kW, 0,2 m/min, b) 1,4 kW, 0,2 m/min, c) 2,0 kW, 0,1 m/min; oraz w atmosferze azotu: d) 0,4 kW, 0,2 m/min, e) 1,4 kW, 0,2 m/min, f) 2,0 kW, 0,1 m/min [2]

Figure 3. Influence of laser heat treatment process parameters of X210Cr12 plate surface on stitch shape in argon atmosphere (by using diode laser HPDL): a) 0,4 kW, 0,2 m/min, b) 1,4 kW, 0,2 m/min, c) 2,0 kW, 0,1 m/min; and in nitrogen atmosphere: d) 0,4 kW, 0,2 m/min, e) 1,4 kW, 0,2 m/min, f) 2,0 kW, 0,1 m/min [2]

Tablica 1. Wpływ parametrów laserowej obróbki cieplnej laserem diodowym HPDL powierzchni płytek ze stali narzędziowej 55NiCrMoV2 i X210Cr12 oraz rodzaj osłony gazowej na twardość zahartowanej warstwy wierzchniej [1]

Table 1. The influence of laser heat treatment parameters of the diode laser HPDL tool steel plates surface 55NiCrMoV2 and X210Cr12 and gas atmosphere type on hardness of the hardened surface layer

Moc lasera, W	Prędkość przesuwu wiązki laserowej, m/min	Twardość warstwy zahartowanej, HV 0,2			
		55NiCrMoV2		X210Cr12	
		Argon	Azot	Argon	Azot
400	0,2	731,15	777,1	468,5	435,6
1200	0,2	637,3	766,7	417,7	431,25
2000	0,2	653,25	712,95	463,1	447,95
2000	0,2	747,45	693,5	516,7	450,3

Tablica 2. Warunki technologiczne obróbki cieplnej powierzchniowej laserem diodowym HPDL [2]

Table 2. Technological conditions of surface heat treatment by using diode laser HPDL [2]

Rodzaj materiału	Grubość warstwy, mm	Szerokość warstwy, mm	Moc wiązki, kW	Wymiary ogniska, mm	Prędkość przesuwu, mm/min	Twardość warstwy, HV 0,5
Stal 0,45%C	0,9	6	1,4	2x6	500	1000÷1200
Żeliwo sferoidalne	0,4÷1	6	1,4	2x6	50÷200	600÷650
Pierścień tłokowy ze stali 55Si7*	0,1÷0,5	1,36	1,37	1,8x3,8	21152115	800÷900
Stop tytanu Ti-6Al-4V*	0,3÷0,9	7	0,4	2x7	100÷500	540 ÷600 HV 0,05

* dodatkowy nadmuch na powierzchnię jeziora ciekłego metalu azotu o natężeniu przepływu 4÷5 l/min

3. WYKORZYSTANIE LASEROWEJ OBRÓBKIE CIEPLNEJ. PRZYKŁADY

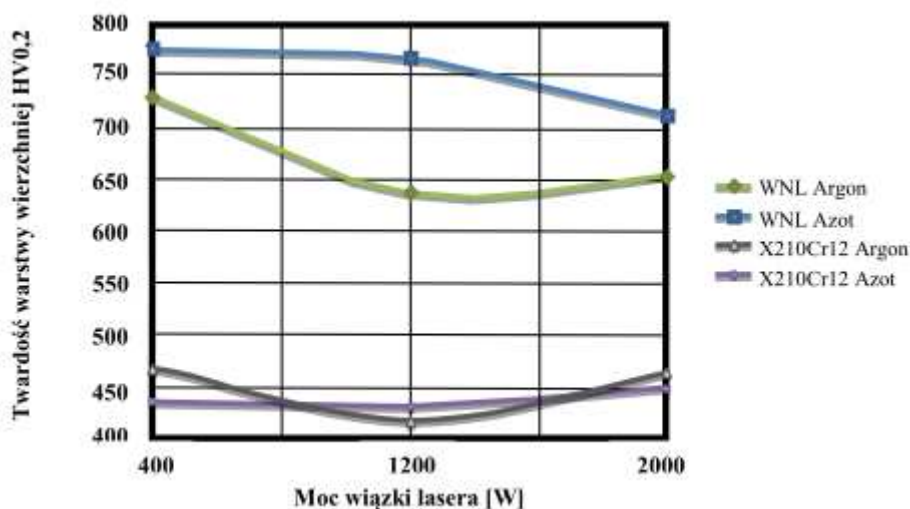
Wykorzystanie lasera pozwala na obrobienie cieplnie każdego materiału, który nie odbije wiązki lasera oraz nie jest przezroczysty. Dużą zaletą jest to, że można z łatwością regulować gęstość wiązki, co pozwala na odpowiedni dobór parametru procesu. Laser można zastosować do obróbki powierzchniowej takich materiałów jak: żeliwo [4], stal szybko tnąca [5], stal narzędziowa (do pracy na gorąco i na zimno), stopy tytanu, stal sprężynowa, stale konstrukcyjne, stale odporne na korozję, stale niskowęglowe (o zawartości C poniżej 0,2%), stal łożyskowa, do umocnienia stopów miedzi oraz aluminium [2, 6].

Wcześniej wymienione parametry mają istotny wpływ na końcowy efekt obróbki cieplnej, co udowodniono podczas wielu badań. Twardości stali narzędziowych WNL i X210Cr12 zahartowanych laserowo jest zależna od używanego gazu – argonu i azotu [2]. Zaleca się obróbkę cieplną z użyciem argonu, jednak zastosowanie azotu pozwala na zwiększenie twardości warstwy (rys. 4).

Ze względu na niską przewodność cieplną, trudno obrabialnym materiałem jest stal szybko tnąca. Jednak stosując odpowiednią gęstość mocy lasera można uzyskać w szybki sposób wysoką twardość (nawet nieco ponad 1150 HV) oraz korzystną mikrostrukturę (martenzyt listkowy i płytkowy, austenit szczątkowy – 13,2% przy optymalnej gęstości mocy, nierozpuszczone węgliki – M_6C i MC oraz węgliki wydzieleniowe – M_6C , M_2C i MC) a także mniejsze ziarno w porównaniu do tradycyjnych metod obróbki cieplnej stali szybko tnących [5].

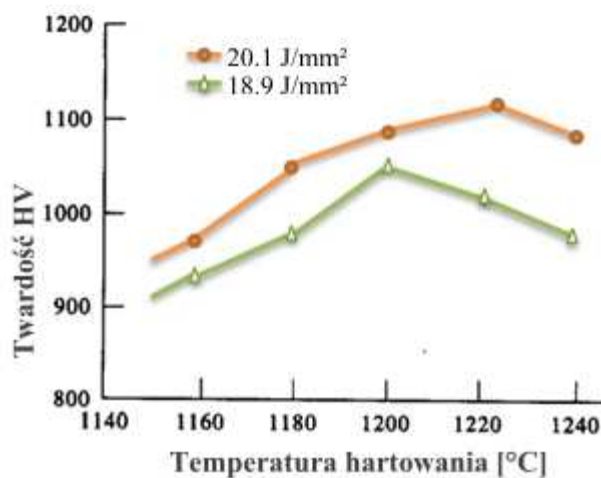
Przy hartowaniu powierzchniowym stali szybko tnącej nie tylko ważne są parametry procesu, ale również wcześniejsza obróbka cieplna przedmiotu ma istotny wpływ na właściwości materiału. Badania [5] wykazały że najlepszą twardość, mikrostrukturę i głębokość strefy zahartowania posiada materiał inżynierski wcześniej poddany obróbce cieplnej (zahartowany w 1220°C oraz potrójnie odpuszczony w 560°C) (rys. 5).

Podczas procesu z wykorzystaniem lasera do obrobienia żeliwa [4] uzyskano strefę przetopienia i strefę zahartowania. Stało się tak ze względu na użycie dużej mocy wiązki lasera.



Rysunek 4. Zależność mocy wiązki laserowej oraz rodzaju osłony gazowej na twardość stali WNL i X210Cr12 [2]

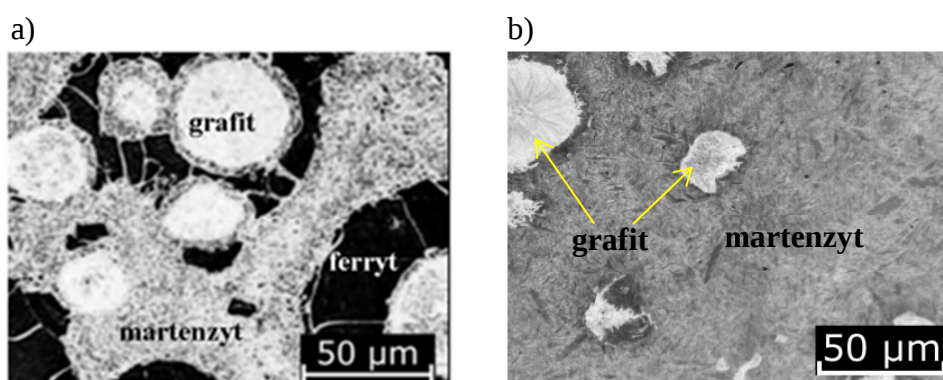
Figure 4. The dependence of the laser beam power and the type of gas shield on the hardness of steel WNL and X210Cr12 [2]



Rysunek 5. Zależność temperatury wcześniejszego hartowania i gęstości mocy na twardość stali HS6-5-2 [5]

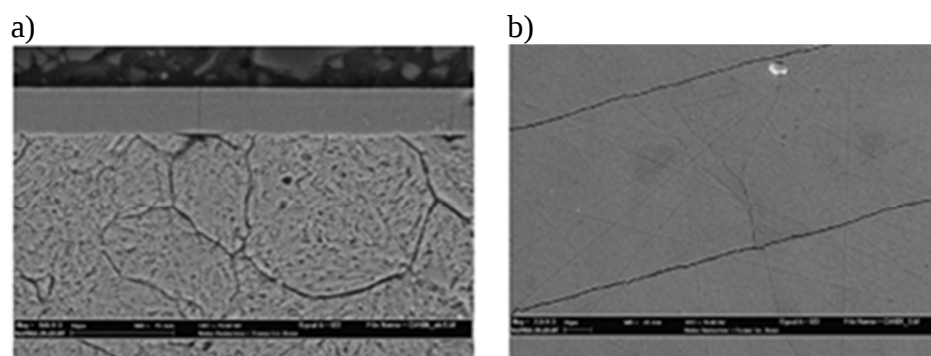
Figure 5. Prior temperature dependence of quenching on the power density and hardness of the steel HS6-5-2 [5]

Mikrostruktura strefy zahartowanej składała się z martenzytu, grafitu, ferrytu oraz trochę austenitu szczątkowego, gdzie podczas tradycyjnego hartowania uzyskano grafit w osnowie martenzytycznej (rys. 6). Natomiast strefa przetopienia posiadała wysoko drobnoziarnistą mikrostrukturę, w której skład wchodził martenzyt, austenit szczątkowy, cementyt oraz niewielka ilość grafitu. Badania twardości wykazały, że mikrotwardość strefy przetopionej waha się pomiędzy 800 a 1300 HV_{0,1}, natomiast obszaru zahartowanego – około 600 HV_{0,1} i była przybliżona do twardości badanego materiału poddanego klasycznej obróbce cieplnej [4].



Rysunek 6. Mikrostruktura żeliwa sferoidalnego: a) po hartowaniu ze stanu stałego; b) po hartowaniu klasycznym [4]

Figure 6. The microstructure of nodular cast iron: a) after quenching from a solid state; b) after quenching classic [4]



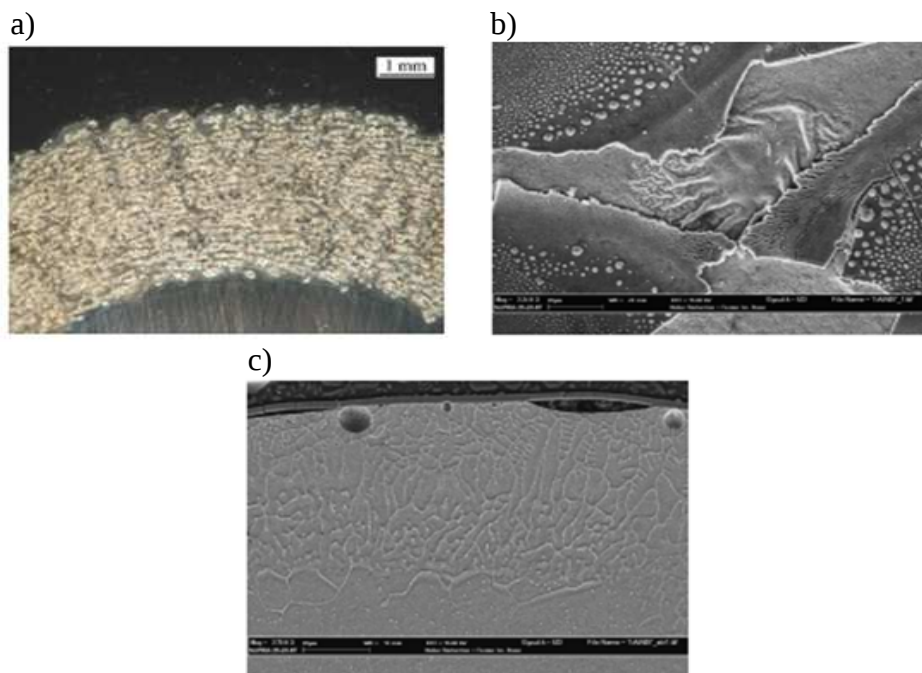
Rysunek 7. Powłoka CrN na stali X40CrMoV5-1: a) mikrostruktura powłoki po obróbce laserowej o mocy wiązki 0,5 kW (przekrój poprzeczny), b) topografia powierzchni po obróbce wiązką lasera o mocy 0,7 kW [7]

Figure 7. CrN coating on steel X40CrMoV5-1 a) of the coating microstructure after the treatment laser beam with a power of 0.5 kW (cross-section), b) the surface topography of the treatment laser beam with a power of 0.7 kW [7]

Ciekawym pomysłem jest również to, by zbadać wpływ obróbki cieplnej diodowym laserem HPDL na warstwy wierzchnie stali narzędziowej do pracy na gorąco pokrytej powłokami PVD [7]. Analizowano powłoki CrN, (Ti,Al)₂N oraz Ti(C,N) na stali X40CrMoV5-1. Próbkę tę poddano obróbce laserowej o mocy wiązki 0,3, 0,5 oraz 0,7 kW. Laserowa obróbka w analizowanym zakresie mocy powoduje strukturalne zmiany występujące w powłokach i w rdzeniu stali, a zależy od typu połączenia powłoki z podłożem. Działanie 0,3 kW wiązki lasera nie powoduje żadnych istotnych zmian w topografii powierzchni zbadanych powłok.

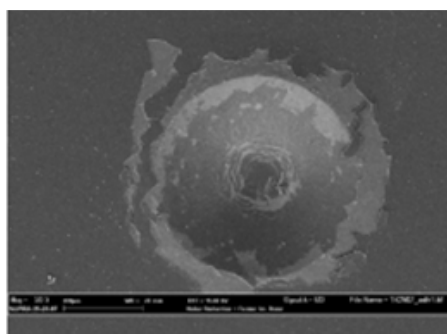
Użycie wiązki o mocy 0.5 kW wnoszą zmiany w powłokach: w powłoce CrN można zauważyć rozwój sieci pęknięć (rys. 7a) i wiele pęknięć wraz z odpryskami w powłoce (Ti,Al)₂N. Ponadto zauważono delaminację (rozwarstwienie) powłoki (Ti,Al)₂N od materiału rodzimego. Na powłokę Ti(C,N) wiązka 0,5 kW nie ma zauważalnego wpływu. Wzrost mocy wiązki do 0,7 kW przyczyniło się do nasilenia zmian w powłokach CrN (rys. 7b) oraz w przypadku (Ti,Al)₂N 50% powłoki zostało usunięte lub przetopione (rys. 8b). Również

materiał podłoża został przetopiony w wyniku czego ujawniła się charakterystyczna struktura dendrytyczna (rys. 8c). Jedynie ta moc wiązki wpłynęła na powłokę Ti(C,N), jednakże dalej jej nie zniszczyła (rys. 9). Dzięki ocenie przyczepności powłok metodą Rockwella C można stwierdzić, że w przypadku powłoki Ti(C,N) jej adhezja znacznie rośnie po użyciu 0,7 kW wiązki lasera [7].



Rysunek 8. a) mikrofotografia ścieżki lasera o mocy wiązki 0,7 kW stali narzędziowej z powłoką (Ti,Al)N; b) topografia powierzchni (Ti,Al)N po obróbce wiązką 0,7 kW; c) mikrostruktura stali narzędziowej z powłoką (Ti,Al)N w obszarze obróbki wiązką lasera 0,7 kW (przekrój poprzeczny) [7]

Figure 8. a) laser paths micrograph of 0.7 kW beam power tool steel coated with (Ti, Al) N; b) surface topography (Ti, Al) N after treatment beam of 0.7 kW; c) the microstructure of the steel tool coated with (Ti, Al) N in the area of the laser beam treatment of 0.7 kW (cross-section) [7]

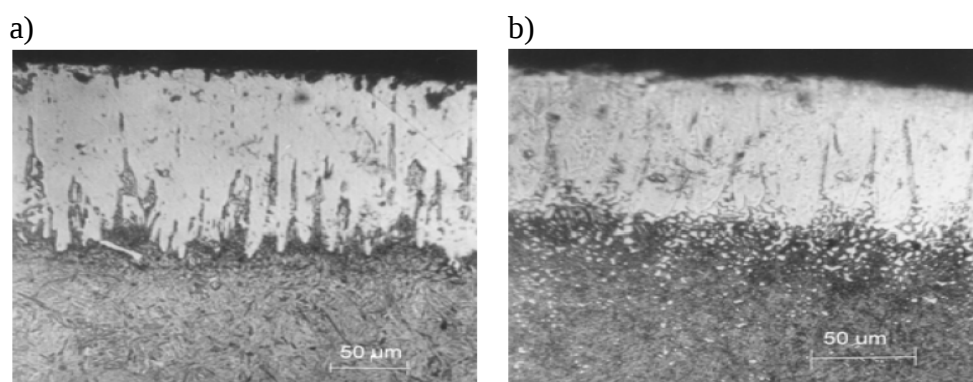


Rysunek 9. Widok obszaru wgniecenia Rockwella C na stali narzędziowej do pracy na gorąco z powłoką Ti(C,N) po obróbce z 0,7 kW mocy wiązki lasera [7]

Figure 9. View of the Rockwell C intent area of the hot-work steel tool steel with Ti(C,N) coating after heat treatment with 0.7 kW laser beam [7]

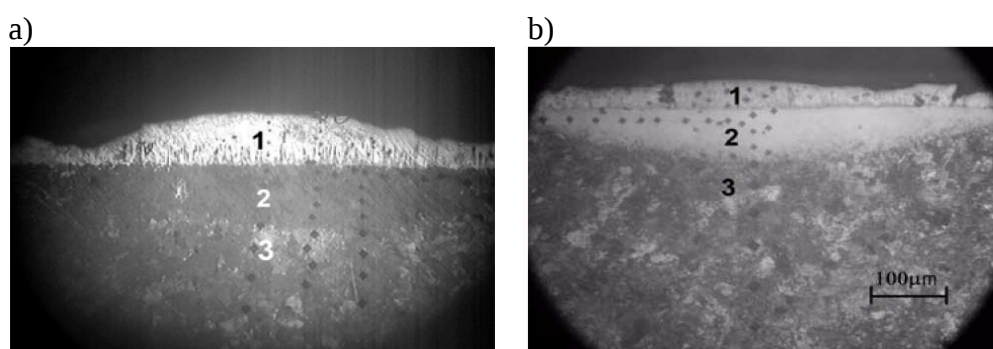
Badania również wykazały, że laserowa obróbka cieplna jest dobrym sposobem na polepszenie własności i struktury warstwy naborowanej stali konstrukcyjnej oraz narzędziowej w porównaniu do objętościowej obróbki cieplnej [8]. Stal o wyższej zawartości węgla (narzędziowa 102Cr6) z borowaną warstwą wykazuje wyższą odporność na zużycie przez tarcie od stali konstrukcyjnej 41Cr4. Naborowana powierzchnia stali posiada duże zalety, jak wysoką twardość (dochodzącą do 2000 HV) oraz dobrą odporność na korozję chemiczną i gazową a także odporność na zużycie. Jednak minusem jest to, że borki żelaza charakteryzuje pewna kruchość i porowatość, co może być przyczyną zmniejszonej ciągliwości warstwy oraz jej odpryskiwaniem od podłoża. Są trzy sposoby by zmniejszyć to ryzyko, poprzez wytworzenie warstw jednofazowych Fe_2B , regulację zawartości węgla pod borkami żelaza oraz przeprowadzenie laserowej obróbki cieplnej warstw borowanych [8].

Na poniższych fotografiach (rys. 10) przedstawiono mikrostrukturę warstw borowanych dwóch badanych stali, z których stwierdzono że tworzy się dwufazowa warstwa dyfuzyjna zawierająca borki żelaza – przy powierzchni FeB i głębiej Fe_2B . Warstwa borowana posiada iglastą budowę, jednak w stali narzędziowej można dostrzec mniej wyraźne igły, ze względu na wyższą zawartość C i Cr w tej stali, które hamują dyfuzję boru. Dlatego też grubość warstwy borowanej na stali 41Cr4 jest wyższa (ok. 95 μm a na stali 102Cr6 – ok 80 μm) [8].



Rysunek 10. Mikrostruktury warstw borowanych po objętościowej obróbce cieplnej: a) stali 41Cr4, b) stali 102Cr6 [8]

Figure 10. Microstructure of borided steel after volume heat treatment: a) 41Cr4 steel, b) 102Cr6 steel [8]

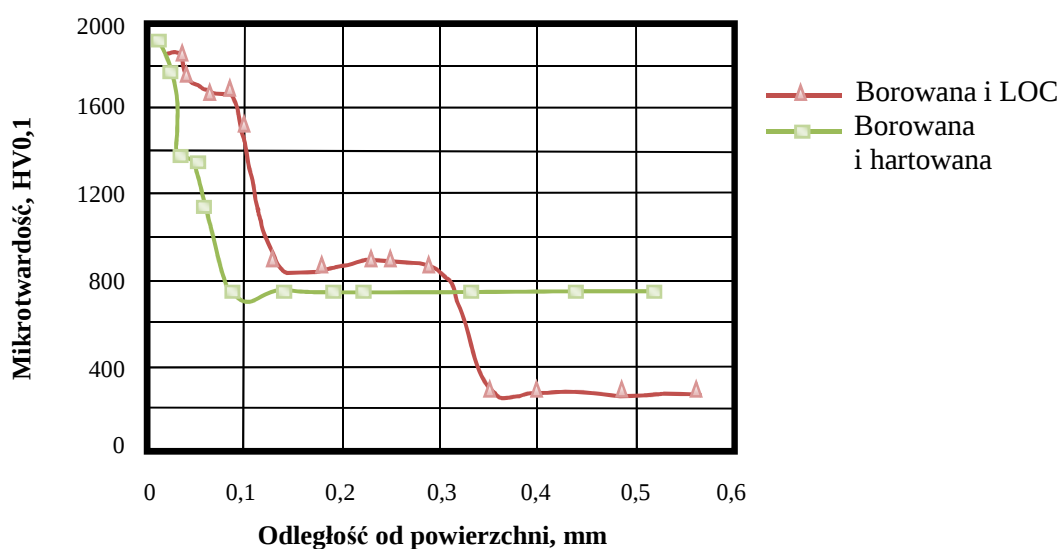


Rysunek 11. Mikrostruktura borowanej stali po laserowej obróbce cieplnej bez przetopienia: a) stali 41Cr4, b) stali 102Cr6 [8]

Figure 11. Microstructure of borided steel after laser heat treatment without re-melting: a) 41Cr4 steel, b) 102Cr6 steel [8]

Na rysunku 11 zestawiono zdjęcia mikrostruktury po laserowej obróbce warstw naborowanych badanych stali, z wyraźnym zaznaczeniem trzech stref: 1 – warstwa borków żelaza, 2 – strefa wpływu ciepła oraz 3 – materiał rodzimy. Parametry procesu dla obydwóch stali różniły się tylko gęstością: dla stali 41Cr4 – 37,3 kW/cm², dla stali 102Cr6 – 24,84 kW/cm². Prędkość przesuwu wynosiła dla obu tyle samo: 2,88 m/min. W strefie borków żelaza zachodzi szkliwienie warstwy wierzchniej, co powoduje zamykanie porów w borkach – zmniejszenie kruchości warstwy. Przy czym borki w strefie przylegającej do podłoża zmieniają swój kształt z iglastego w globularny.

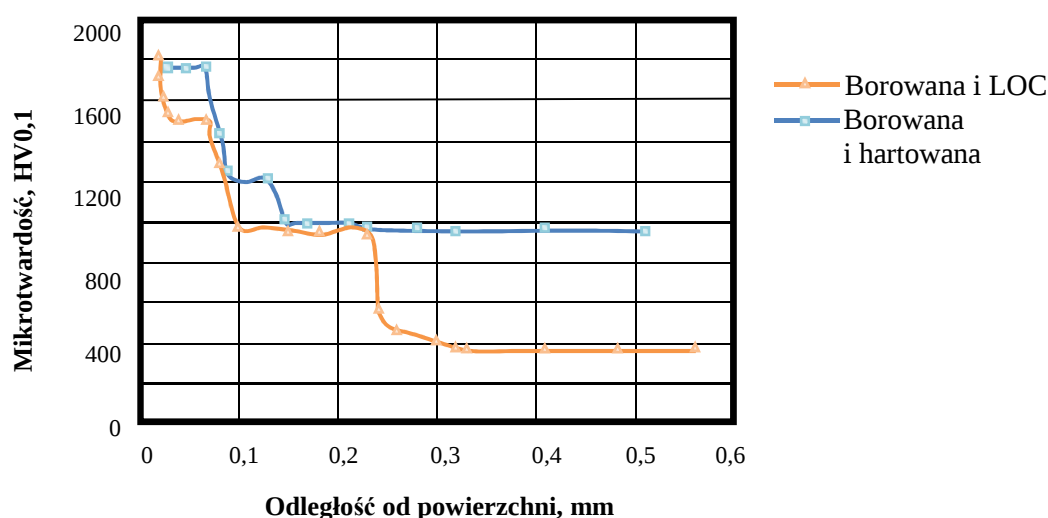
W obu przypadkach uzyskano zbliżone wartości mikrotwardości dla borków żelaza FeB i Fe₂B, zarówno po objętościowej jak i po powierzchniowej obróbce cieplnej (rys. 12 i 13). Z punktu widzenia własności użytkowych, stopniowy spadek twardości borowanych stali od powierzchni do rdzenia po laserowej obróbce w porównaniu ze stalą borowaną i obrobioną objętościowo (w zależności od temperatury odpuszczania) jest korzystny. Podwyższone stężenie węgla w stali wpływa na wzrost twardości rdzenia pod borkami żelaza w wyniku przeprowadzonej obróbki cieplnej. W rezultacie maleje gradient twardości między warstwą borowaną a rdzeniem [8].



Rysunek 12. Mikrotwardość borowanej stali 41Cr4 po hartowaniu i odpuszczaniu oraz po laserowej obróbce cieplnej [8]

Figure 12. Microhardness of borided 41Cr4 steel after hardening and tempering and after laser heat treatment [8]

Warstwa borowana i laserowa obróbka cieplna znacznie wydłuża czas zużycia wagowego badanych stali narzędziowej i konstrukcyjnej. Stale o niższym gradiencie twardości między warstwą borków a utwardzoną strefą pod borkami cechują się niższym zużyciem przez tarcie. Powierzchniowa obróbka cieplna z użyciem lasera zmniejsza w większym stopniu gradient twardości między warstwą borków a rdzeniem metalu niż hartowanie i odpuszczanie. Również wraz ze wzrostem zawartości węgla w stali maleje gradient twardości [8].



Rysunek 13. Mikrotwardość borowanej stali 102Cr6 po hartowaniu i odpuszczaniu oraz po laserowej obróbce cieplnej [8]

Figure 13. Microhardness of borided 102Cr6 steel after hardening and tempering and after laser heat treatment [8]

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy poniższych artykułów, można wysnuć kilka podstawowych wniosków: laserowa obróbka cieplna świetnie spisuje się do obróbki materiałów żelaznych, na przykład stali szybko tnącej, a także nanoszonych powłok na stale narzędziowe i konstrukcyjne czy wcześniej zmodyfikowanych warstw wierzchnich (borowanych). Dzięki wykorzystaniu lasera jest to energooszczędny, krótkotrwały proces, w którym można łatwo sterować parametrami, jest bardzo dokładny. Minusami tej metody jest wysoki koszt urządzenia oraz jego serwis, a także to, że jest wymagany odpowiednio wykwalifikowany pracownik do obsługi lasera.

Laserowa obróbka cieplna w porównaniu z tradycyjną objętościową obróbką cieplną znacznie skraca czas procesu, wpływa korzystnie na mikrostrukturę i własności mechaniczne obrabianych materiałów. Wykorzystując diodowy laser HPDL można uzyskać lepsze wykończenie powierzchni, mniejszą strefę wpływu ciepła, bardziej spójne i powtarzalne wyniki, mniej pęknięć powierzchni oraz mniej porowatości – w porównaniu do lasera Nd:YAG czy CO₂ (z powodu wielokrotnej integracji wiązki i skrócenia długości fali w HPDL).

LITERATURA

1. A. Klimpel, Technologie laserowe: spawanie, napawanie, stopowanie, obróbka cieplna i cięcie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2012.
2. A. Klimpel, A. Borek, Laserowa obróbka cieplna części maszyn i urządzeń, Stal. Metale & Nowe Technologie (2011) 8-13.
3. G. Kinal, M. Paczkowska, Porównanie gatunków żeliw szarych pod względem możliwości ich laserowej obróbki cieplnej, Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering 57/1 (2012) 73-76.

4. M. Paczkowska, Analiza wpływu warunków hartowania laserowego żeliwa sferoidalnego na mikrostrukturę jego warstwy powierzchniowej, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji* 30/1 (2010) 29-39.
5. G. Shi, P. Ding, J. Liu, H. Yin, J. Wang, Microstructure and properties of laser surface hardened M2 high speed steel, *Acta Metallurgica et Materialia* 43/1 (1995) 217-223.
6. T. Burakowski, T. Wierzchoń, *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa, 1995.
7. M. Adamiak, L.A. Dobrzański, Microstructure and selected properties of hot-work tool steel with PVD coatings after laser surface treatment, *Applied Surface Science* 254/15 (2008) 4552-4556.
8. A. Pertek-Owsianna, M. Kulka, M. Jankowiak, Badania struktury i właściwości borowanej stali konstrukcyjnej 41Cr4 i narzędziowej 102Cr6, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji* 26/2 (2006) 1-12.