



Wpływ odległości między ścieżkami hartowniczymi na własności stali stopowych

Effect of distance between laser hardening lines on the properties of alloy steel

(1) Tomasz Gądek*, (2) Łukasz Nowacki, (3) Tadeusz Drenger, (4) Michał Pieszak, (5) Paulina Górecka
Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 30.04.2015
Data recenzji: 30.07.2015
Data akceptacji: 30.09.2015

Wkład autorów

- (1) Określenie metodyki badań, obsługa lasera
- (2) Konsultacje i analiza wyników, określenie założeń, obsługa i koordynacja pomiarów temperatury
- (3) Konsultacje i analiza wyników
- (4) Dobór odpowiedniej trajektorii ruchu głowicy lasera, obsługa stołu współrzędnościowego
- (5) Badania metalograficzne, pomiary twardości

Streszczenie

W niniejszym artykule opisano sposób hartowania powierzchniowego stali narzędziowych (X210Cr12 oraz 42CrMo4) przy pomocy lasera diodowego dużej mocy (HPDL) firmy ROFIN-SINAR Laser GmbH. W pierwszej części artykułu przedstawione i opisane zostały wyniki badań wpływu ciepła wiązki lasera diodowego (dla pojedynczej ścieżki hartowniczej) na strukturę i twardość badanych materiałów. Po przeprowadzeniu prób hartowania, w celu określenia grubości zahartowanej warstwy oraz analizy struktury materiału, wycięto próbki i poddano je badaniom metalograficznym. Otrzymane wyniki badań pozwoliły na wyznaczenie parametrów procesu, które przyjęto do dalszych badań. Celem badań było określenie minimalnej odległości ścieżek hartowniczych względem siebie, mających zapewnić uzyskanie możliwie jednorodnej struktury zahartowanego materiału oraz twardość warstwy zahartowanej powyżej 500 HV_{0,1}. W artykule zbadano i opisano wpływ oddziaływania na siebie kolejnych ścieżek uzyskanych w trakcie laserowego hartowania warstwy wierzchniej. Dla lepszego zobrazowania wpływu ciepła wiązki lasera wyniki badań rozkładu twardości, przedstawione zostały w sposób graficzny. Stwierdzono, że dla materiału 42CrMo4 przy jednomilimetrym pokrywaniu się ścieżek hartowniczych możliwe jest uzyskanie w miejscu pokrywania się ścieżek struktury martenzytycznej. Badania hartowania powierzchniowego przeprowadzone zostały na stanowisku badawczym do kształtowania obrotowego wyrobów z blach znajdującym się w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu, w skład, którego wchodził stół współrzędnościowy oraz laser diodowy o maksymalnej mocy – 3,6 kW, dla wiązki o wymiarach 30x8 mm.

Słowa kluczowe: hartowanie laserowe, warstwa wierzchnia, struktura, stal narzędziowa, ścieżka hartownicza

Article info

Received: 30.04.2015
Reviewed: 30.07.2015
Accepted: 30.09.2015

Authors' contribution

- (1) Determination of research methodology, laser operation
- (2) Consultations and analysis of the results, determination of assumptions, operation and coordination temperature measurements
- (3) Consultations and analysis of the results

Abstract

This article describes the method of surface hardening tool steels (X210Cr12 and 42CrMo4) by means of a high-power diode laser (HPDL) from the ROFIN-SINAR Laser GmbH company. The first part of the article presents and describes the results of studies on the effect of diode laser beam heat (on a single hardening line) on the structure and hardness of the studied materials. After hardening trials were performed, specimens were cut out and subjected to metallographic examinations. The obtained results of studies made it possible to determine process parameters, which were accepted for further research. The aim of this study was to determine the minimum distance of laser hardening lines from one another that would ensure the achievement of the greatest homogeneity of structure possible and hardness of the hardened layer above 500 HV_{0.1}. This article investigates and describes the effect of interaction between successive lines obtained during laser hardening of the surface layer. To better illustrate the effect of laser beam heat on hardness distribution results, the results have been presented graphically. It was observed that, in the case of 42CrMo4 material, it is possible

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: gadek@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: gadek@inop.poznan.pl

- (4) Selection of the appropriate trajectory of the laser head, coordinate table operation
(5) Metallographic research, hardness measurements

to obtain a martensitic structure in the line overlap area for a 1 mm overlap of hardening lines. Surface hardening studies were conducted on a test station for rotary forming of sheet products found at the Metal Forming Institute in Poznan, consisting of a coordinate table and diode laser with maximum power – 3.6 kW and 30x8 mm beam.

Keywords: laser hardening, surface layer, structure, tool steel, hardening line

1. WSTĘP

Warstwy wierzchnie części maszyn i urządzeń wykonanych z metali i stopów można obrabiać cieplnie z wykorzystaniem energii promieniowania laserowego [1]. Laserowa obróbka cieplna umożliwia utwardzenie warstw wierzchnich na roboczych częściach przedmiotów [2]. Hartowanie laserem pozwala na uzyskanie bardzo wysokiej twardości, w zależności od gatunku hartowanej stali, nawet do 68 HRC i jest stosowane w przemyśle do hartowania elementów narzędzi, które w trakcie procesu ulegają intensywnemu zużyciu. Hartowanie laserowe jest procesem, w którym wiązka lasera działa bezpośrednio na powierzchnię przedmiotu, poprzez miejscowe nagrzewanie wierzchnich warstw do temperatury przemiany austenicznej hartowanego materiału. W zależności od gatunku materiału temperatura przemiany austenicznej przy hartowaniu laserowym wynosi od ok. 900°C do 1400°C, a czas miejscowego przetrzymania w tej temperaturze mieści się w przedziale od 10^{-3} sek. do 10 sek. W następstwie wprowadzania ograniczonej ilości ciepła do obrabianego przedmiotu, w skutek szybkiego odprowadzania ciepła z materiału poprzez przewodnictwo cieplne, następuje samoistne schładzanie obrabianego przedmiotu. Stosowanie dodatkowych mediów chłodzących takich, jak woda, olej czy sprężone powietrze nie jest wymagane [3, 4]. Zaletami procesu są bardzo szybkie miejscowe utwardzenie i małe prędkości utleniania powierzchniowego. W związku z tym hartowanie laserowe może być wprowadzone jako końcowa operacja w procesie produkcyjnym [5].

2. CEL I METODA BADAŃ

Celem badań było określenie minimalnej odległości ścieżek hartowniczych uzyskanych wiązką lasera o wymiarach 30x8 mm oraz ocena wpływu

1. INTRODUCTION

The surface layers of machine and tool parts made of metals and alloys can be thermally treated using the energy of laser radiation [1]. Laser heat treatment makes it possible to harden surface layers of the working parts of objects [2]. Laser hardening makes it possible to obtain a very high hardness depending on the grade of hardened steel, up to 68 HRC, and is used in industry to harden tool elements that are subject to intensive wear. Laser hardening is a process in which the laser beam acts directly on the surface of the object by locally heating surface layers to the austenitic transformation temperature of the hardened material. Depending on the grade of material, the austenitic transformation temperature in the case of laser hardening ranges from approx. 900°C to 1400°C, and the time of local holding at this temperature lies within the range from 10^{-3} sec. to 10 sec. The processed object self-cools as a result of the introduction of a limited amount of heat into it, due to rapid discharge of heat from the material by means of thermal conduction. The use of additional cooling media such as water, oil, or compressed air is not required [3, 4]. The advantages of this process are: very rapid local hardening and low surface oxidation rates. Because of this, laser hardening can be applied as the final operation in a production process [5].

2. OBJECTIVE AND METHOD OF RESEARCH

The research objective was to determine the minimum distance of laser hardening lines made using a 30x8 mm laser beam, and to evaluate the

oddziaływania ciepła wiązki lasera diodowego w różnych odległościach pomiędzy zahartowanymi ścieżkami (twardość powyżej 500 HV 0,1).

Badania hartowania powierzchniowego z zastosowaniem lasera diodowego dużej mocy przeprowadzono na stali narzędziowej X210Cr12 o twardości 340 HV 0,1 oraz na stali konstrukcyjnej stopowej 42CrMo4 o twardości 250 HV 0,1.

W celu określenia strefy wpływu ciepła wiązki laserowej pojedynczej ścieżki hartowniczej, przeprowadzono próby technologiczne. Próby prowadzono w zakresie mocy lasera 1,8–2,9 kW, przy posuwie 2–5 mm/s. Uzyskane wyniki wykorzystano do dalszych badań określających wpływ ciepła pomiędzy poszczególnymi ścieżkami w zależności od odległości między nimi.

Badanie prowadzono na stanowisku badawczym (rys. 1) w skład, którego wchodzi:

- a) laser diodowy HPDL Rofin DL 036L
 - długość fali promieniowania laserowego: 940–980 [nm],
 - maksymalna moc wyjściowa wiązki laserowej (promieniowanie ciągłe): 3600 [W],
 - gęstość mocy wiązki laserowej: 1,5 [kW/cm²],
- b) stół współrzędnościowy sterowany w osi X, Y i Z,
- c) pirometr dwubarwny,
- d) kamera do rejestracji przebiegu procesu.

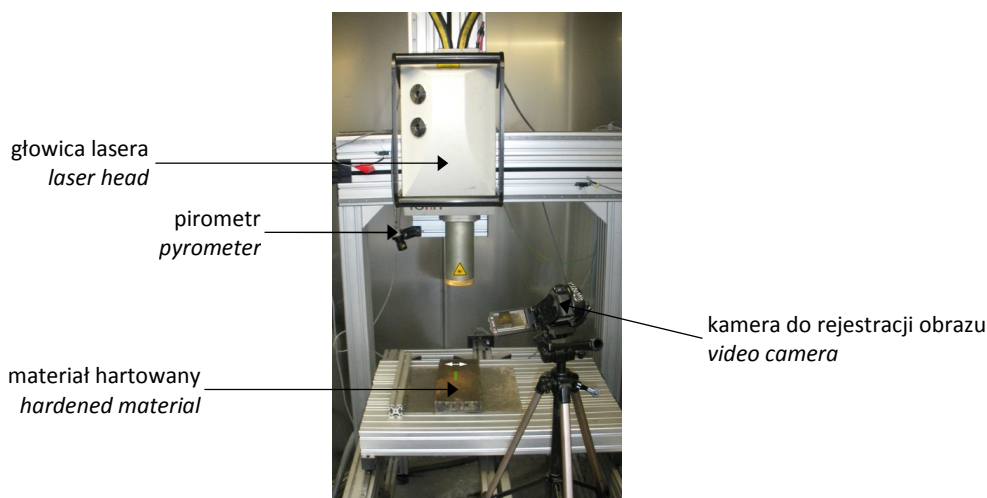
effect of diode laser beam heat at various distances between the hardened lines (hardness above 500 HV 0.1).

Surface hardening tests were performed using a high-power diode laser on X210Cr12 tool steel with 340 HV 0.1 hardness and on 42CrMo4 construction alloy steel with 250 HV 0.1 hardness.

Technological tests were conducted in order to determine the heat-affected zone of the hardening line. Tests were conducted for laser powers ranging from 1.8–2.9 kW and feed of 2–5 mm/s. Obtained results were used for further research determining the effect of heat between individual lines depending on distance between them.

The test was performed on a test station (Fig. 1) consisting of:

- a) HPDL Rofin DL 036L Diode Laser:
 - wavelength of laser radiation: 940–980 [nm],
 - maximum output power of laser beam (continuous radiation): 3600 [W],
 - power density of laser beam: 1.5 [kW/cm²],
- b) coordinate table with X, Y, and Z axis control,
- c) two-color pyrometer,
- d) camera for recording the process.



Rys. 1. Stanowisko badawcze hartowania powierzchniowego

Fig. 1. Surface hardening test station

Badania hartowania prowadzono na stole współrzędnościowym, który był sterowany za pomocą programu Mach 3 firmy ArtSoft, umożliwiającym precyzyjne sterowanie w trzech osiach za pomocą G-kodów.

Warunki obróbki cieplnej hartowania laserowego:

- prędkość posuwu wiązki lasera: 2–5 mm/s,
- temperatura hartowania: 980–1200°C,
- stała odległość optyki laserowej od miejsca podgrzewania: 300 mm,
- materiał hartowany: stal narzędziowa X210Cr12 oraz stal konstrukcyjna 42CrMo4,
- wymiary wiązki laserowej: 8x30 mm.

Sposób przeprowadzania prób doboru mocy lasera (rozmieszczenia ścieżek) podczas hartowania powierzchniowego przedstawiono na rys. 2. W kolejnym etapie badań określono minimalną odległość ścieżek hartowniczych zapewniającą uzyskanie możliwie jednorodnej struktury w zahartowanej powierzchni oraz twardości powyżej 500 HV 0,1.

Podczas przebiegu procesu badań rejestrowano:

- temperaturę, pirometrem dwubarwnym na powierzchni warstwy hartowanej,
- moc lasera,
- prędkość posuwu wiązki lasera,
- przebieg procesu kamerą wizyjną HD.

Hardening tests were conducted on a coordinate table controlled by means of Mach 3 software from the ArtSoft company, enabling precise triaxial control by means of G-codes.

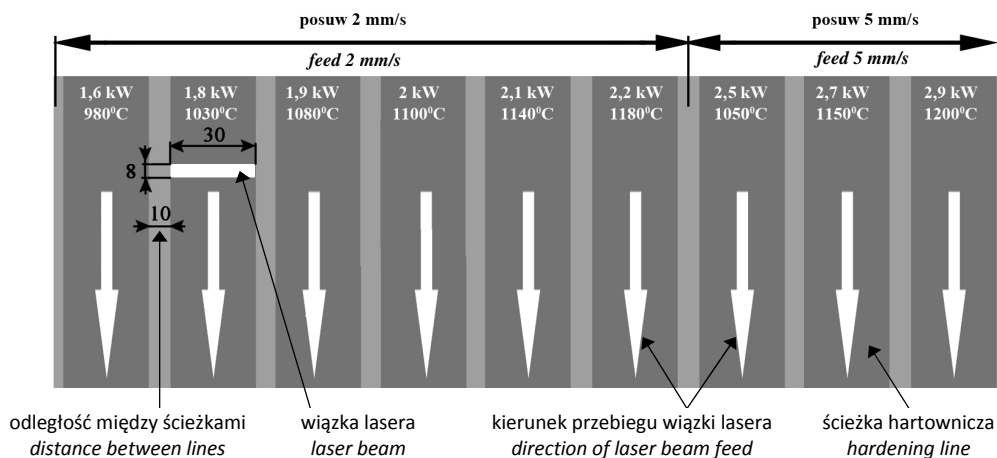
Laser heat treatment conditions:

- *laser beam feed: 2–5 mm/s,*
- *hardening temperature: 980–1200°C,*
- *constant distance of laser optics from heating point: 300 mm,*
- *hardened material: X210Cr12 tool steel and 42CrMo4 construction steel,*
- *laser beam dimensions: 8x30 mm.*

The method of conducting tests for laser power selection (line placement) during surface hardening is presented in Fig. 2. In the next stage of research, the minimum distance of hardening lines ensuring achievement of as homogeneous a structure as possible in the hardened surface as well as hardness above 500 HV 0.1 was determined.

During progression of the process of tests was registered:

- *temperature, by means of a two-color pyrometer on the surface of the hardened layer,*
- *laser power,*
- *laser beam feed,*
- *progression of the process using an HD video camera.*

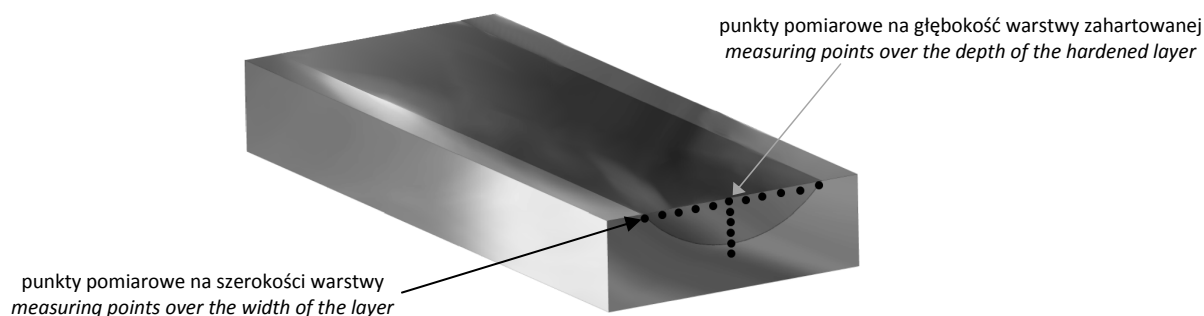


Rys. 2. Sposób rozmieszczenia wiązek i warunki procesu hartowania

Fig. 2. Method of positioning beams and hardening process conditions

Po przeprowadzeniu prób hartowania, w celu określenia grubości zahartowanej warstwy oraz do oceny struktury materiału, wycięto próbki jak na rys. 3.

After hardening tests were conducted, specimens were cut out as shown in Fig. 3 in order to determine the thickness of the hardened layer and assess the structure of the material.



Rys. 3. Miejsca pomiaru twardości warstwy zahartowanej
Fig. 3. Hardness measurement points on the hardened layer

Otrzymane próbki poddano badaniom mającym na celu określenie:

- głębokości zahartowanej stali (mikroskop świetlny Nikon Eclipse L150),
- twardości (twardościomierz Vickersa i Knoopa FM-800),
- struktury po hartowaniu – (SEM) Inspect S (FEI).

Obtained samples were tested to determine:

- depth of hardened steel (Nikon Eclipse L150 light microscope),
- hardness (Vickers and Knoop FM-800 hardness tester),
- structure after hardening – (SEM) Inspect S (FEI).

3. WYNIKI BADAŃ

Najlepsze wyniki hartowania uzyskano dla parametrów:

- moc 2,5 kW i posuw 5 mm/s – dla stali X210Cr12,
- moc 2,4 kW i posuw 5 mm/s – dla stali 42CrMo4.

Wyniki badań hartowania powierzchniowego dla ww. parametrów przedstawiono w tab. 1 oraz na rys. 4.

Szerokość warstwy zahartowanej na powierzchni badanych stali wynosiła około 25 mm. Na całej szerokości wiązki twardość wynosiła powyżej 500 HV 0,1. Przy zastosowanych parametrach technologicznych podczas procesu otrzymano na powierzchni materiału X210Cr12 średnią temperaturę hartowania 1050°C oraz 960°C dla materiału 42CrMo4.

3. TESTS RESULTS

The best hardening results were obtained for the following parameters:

- power 2.5 kW and feed rate 5 mm/s – for X210Cr12 steel,
- power 2.4 kW and feed rate 5 mm/s – for 42CrMo4 steel.

The results of surface hardening tests for the aforementioned parameters are presented in Tab. 1 and in Fig. 4.

The width of the hardened layer on the surfaces of the studied steels amounted to approx. 25 mm. Hardness was above 500 HV 0.1 over the entire width of the beam. For the applied technological parameters, an average hardening temperature of 1050°C was obtained on the surface of X210Cr12 material and 960°C for 42CrMo4 material.

Tab. 1. Wyniki pomiarów twardości warstwy hartowanej laserem stali X210Cr12 i 42CrMo4

Tab. 1. Results of hardness measurements of the laser-hardened layer of X210Cr12 and 42CrMo4 steel

Miejsca pomiarów Measuring points		X210Cr12	42CrMo4
		Twardość HV 0,1 HV 0.1 hardness	
Pomiary na szerokości warstwy zahartowanej w odległości 0,025 mm od powierzchni hartowanej Measurements over the width of the hardened layer at a distance of 0.025 mm from the hardened surface		669	645
		596	658
		551	678
		689	665
		669	637
Pomiary od powierzchni w głąb materiału [mm] Measurements from surface into the material [mm]	0,05	689	668
	0,10	657	641
	0,15	669	638
	0,20	627	625
	0,25	645	617
	0,30	589	598
	0,35	585	578
	0,40	554	557
	0,50	551	542
	0,60	517	531
	0,70	523	517
0,80	504	503	
0,90	480	486	



Rys. 4. Warstwa utwardzona podczas hartowania stali laserem diodowym

Fig. 4. Hardened layer during diode laser hardening of steel

W celu określenia wpływu ciepła pochodzącego z sąsiednich ścieżek hartowniczych przeprowadzono próby technologiczne, w których odległości pomiędzy ścieżkami wynosiły od 2 do 0 mm (mierząc od krawędzi ścieżek). Przebieg trajektorii ruchu głowicy laserowej sterowany był za pomocą programu Mach 3, dzięki czemu możliwe było precyzyjne określenie odległości poszczególnych ścieżek od siebie. W tab. 2 przedstawiono parametry procesu hartowania.

In order to determine the effect of heat originating from neighboring hardening lines, technological tests were performed, in which the distances between lines ranged from 2 to 0 mm (measuring from the edges of lines). The trajectory of the laser head's motion was controlled using Mach 3 software, thanks to which it was possible to precisely determine the distances of individual lines from one another. The parameters of the hardening process are presented in Tab 2.

Tab. 2. Parametry procesu hartowania

Tab. 2. Hardening process parameters

Nr ścieżki Line no.	Moc [kW] Power [kW]	Śr. temp. [°C] Avg. temp. [°C]	Posuw [mm/s] Feed rate [mm/s]	Odległość pomiędzy ścieżkami [mm] Distance between lines [mm]
X210Cr12				
1-10	2,5	1050	5	Co 0,25 mm w przedziale 2-0 mm Every 0.25 mm within the 2-0 mm range

Nr ścieżki Line no.	Moc [kW] Power [kW]	Śr. temp. [°C] Avg. temp. [°C]	Posuw [mm/s] Feed rate [mm/s]	Odległość pomiędzy ścieżkami [mm] Distance between lines [mm]
42CrMo4				
1-10	2,4	960	5	Co 0,25 mm w przedziale 2-0 mm Every 0.25 mm within the 2-0 mm range

Próbki uzyskane podczas hartowania po-
cięto na elektrodrążarce, a następnie wytrawio-
no; przygotowano do badań metalograficznych
i pomiarów twardości (rys. 5).

Specimens obtained during hardening, cut on
an electrical discharge machine tool then etched;
prepared for metallographic examinations and
hardness measurements (Fig. 5).



Nr ścieżki Line No.	Wartości odległości między ścieżkami Values of distances between lines	
	X210Cr12 [mm]	42CrMo4 [mm]
2-1	2	
3-2	1,75	
4-3	1,5	
5-4	1,25	
6-5	1	
7-6	0,75	
8-7	0,5	
9-8	0,25	
10-9	0	

Rys. 5. Próbki z widocznymi odległościami między ścieżkami hartowanymi laserem i wartości tych odległości

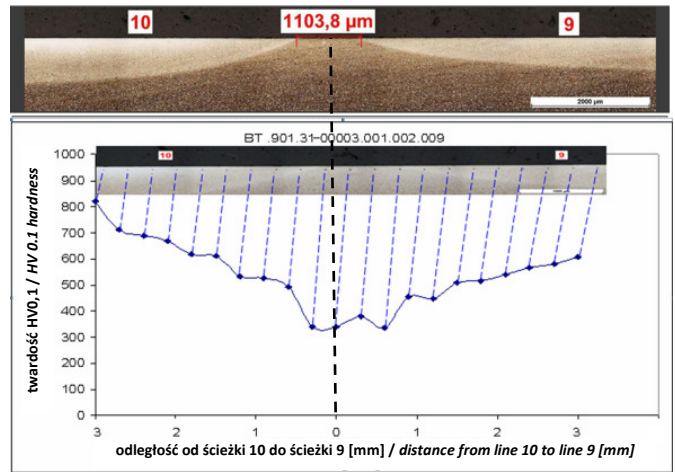
Fig. 5. Specimens with visible distances between laser hardening lines and the values of these distances

Wyniki badań oddziaływania na siebie ście-
żek hartowniczych od ścieżki 10 do 9 dla ma-
teriału X210Cr12 pokazano na rys. 6, zaś dla
materiału 42CrMo4 na rys. 7. Odległość po-
między ścieżkami mierzona na powierzchni ma-
teriału hartowanego wynosiła 0 mm (rys. 5). Po
przygotowaniu próbek do badań i ocenie od-
ległości na skaningowym mikroskopie elektrony-
wym, zmierzono na przekroju hartowanego ma-
teriału odległość pomiędzy ścieżkami. Okazało
się, że zerowa odległość, którą określono na po-
czątku, występuje jedynie w formie nalotu na
powierzchni hartowanego materiału (rys. 6b).
Opis pomiaru odległości pomiędzy ścieżkami 9
i 10 w zakresie odległości 0-3 mm przedsta-
wiony na rys. 6a i 6b dotyczy odległości od osi
pokrywania się ścieżek, którą wyznaczono pod-
czas pomiaru na powierzchni zahartowanego
materiału.

Results of tests of the interaction of harden-
ing lines from line 10 to 9 in Fig. 6 for X210Cr12
material and on Fig. 7 for 42CrMo4 material.
The distance between lines measured on the sur-
face of the hardened material amounted to 0 mm
(Fig. 5). After preparing specimens for tests and
evaluating distances using a scanning electron
microscope, the distance between lines was mea-
sured on the cross-section of the hardened ma-
terial. It turned out that the zero distance that
was initially determined is only present in the
form of a coating on the surface of the hardened
material (Fig. 6b). The description of measure-
ment of the distance between lines 9 and 10
within distance range 0-3 mm that is presented
in Fig. 6a and 6b pertains to distances from the
axis of beam overlap, which was determined by
measurement on the surface of the hardened
material.

Pomiary od ścieżki 10 do ścieżki 9 <i>Measurements from line 10 to line 9</i>		Twardość HV0,1 <i>HV 0.1 hardness</i>
Stała odległość od powierzchni 0,025 mm <i>Constant distance from surface 0.025 mm</i>	3,0 mm	822
	2,7 mm	711
	2,4 mm	688
	2,1 mm	668
	1,8 mm	618
	1,5 mm	610
	1,2 mm	531
	0,9 mm	524
	0,6 mm	490
	0,3 mm	340
	0 mm	339
	0,3 mm	378
	0,6 mm	336
	0,9 mm	455
	1,2 mm	449
	1,5 mm	507
1,8 mm	516	
2,1 mm	538	
2,4 mm	567	
2,7 mm	579	
3,0 mm	608	

a)



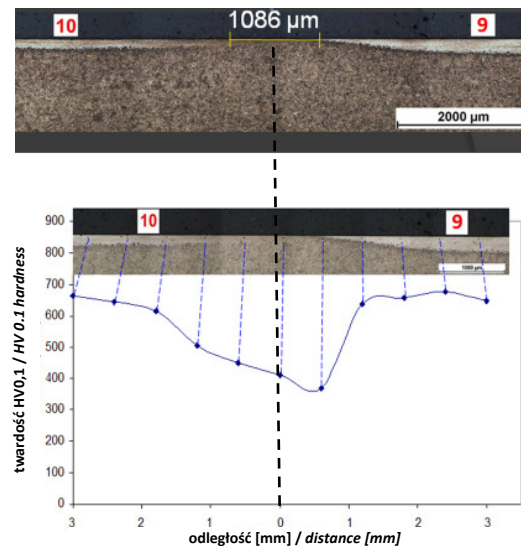
b)

Rys. 6. Twardości stali X210Cr12 po hartowaniu przy zerowej odległości między ściezkami:
a – wyniki pomiarów, b – rozkład twardości

Fig. 6. Hardnesses of X210Cr12 steel after hardening for zero distance between lines:
a – results of measurements, b – hardness distribution

Pomiary od ścieżki 10 do ścieżki 11 <i>Measurements from line 10 to line 9</i>		Twardość HV0,1 <i>HV 0.1 hardness</i>
Odległość od powierzchni, 0,025 mm <i>Distance from surface 0.025 mm</i>	3,0 mm	665
	2,4 mm	645
	1,8 mm	615
	1,2 mm	505
	0,6 mm	450
	0 mm	410
	0,6 mm	370
	1,2 mm	637
	1,8 mm	658
	2,4 mm	678
3,0 mm	649	

a)



b)

Rys. 7. Twardości stali 42CrMo4 po hartowaniu przy zerowej odległości między ściezkami:
a – wyniki pomiarów, b – rozkład twardości

Fig. 7. Hardness of 42CrMo4 steel after hardening for zero distance between lines:
a – results of measurements, b – hardness distribution

Wymiary pokazane na rys. 6b oraz 7b oznaczają odległość pomiędzy ścieżkami hartowniczymi na głębokości 0,025 mm od powierzchni materiału. Jak wynika z przeprowadzonych badań, dla założonych parametrów hartowania, nie udało się uzyskać na całej powierzchni hartowanej laserowo twardości 500 HV 0,1.

Rozkład twardości w głąb materiału pomiędzy ścieżkami zahartowanymi przedstawiono w tab. 3.

The dimensions shown in Fig. 6b and 7b signify the distance between hardening lines at a depth of 0.025 mm from the surface of the material. As shown by performed tests, it was not possible to obtain 500 HV 0.1 hardness on the entire laser-hardened surface at the accepted hardening parameters.

The hardness distribution over the depth of the material between hardened lines is presented in Tab. 3.

Tab. 3. Rozkład twardości pomiędzy zahartowanymi ścieżkami

Tab. 3. Hardness distribution between hardened lines

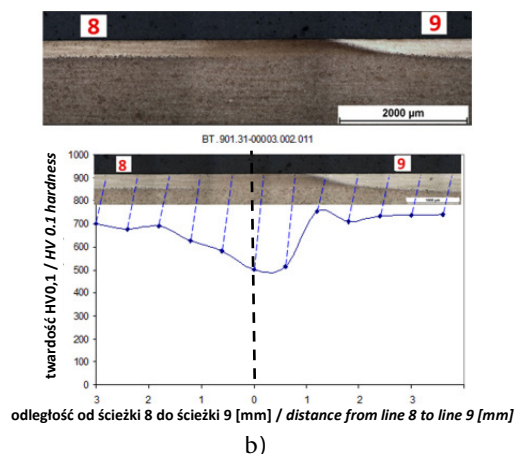
Odległość od powierzchni [mm] Distance from surface [mm]	X210Cr12	42CrMo4
Materiał w stanie dostawy / Material, as-delivered		
	340	250
Materiał po próbie hartowania / Material after hardening test		
0,1	326	379
0,2	333	390
0,3	345	352
0,4	365	336
0,5	347	333

Z tab. 3 wynika niewielki wpływ ciepła wiązki laserowej na twardość pomiędzy zahartowanymi ścieżkami stali 42CrMo4; twardość stali X210Cr12 nie uległa zmianie. W kolejnym etapie badań tej stali przeprowadzono próby z nakładaniem się na siebie ścieżek hartowniczych. Określono minimalną odległość ścieżek hartowniczych zapewniającą uzyskanie możliwie jednorodnej struktury w zahartowanej powierzchni oraz twardość powyżej 500 HV 0,1. Wyniki badań próbki z jednomilimetrowym pokrywaniem się ścieżek przedstawiono na rys. 8.

Tab. 3 indicates a small effect of laser beam heat on hardness between hardened lines of 42CrMo4 steel; the hardness of X210Cr12 steel was unchanged. In the second stage of tests conducted on this steel, tests with overlapping of hardening lines were conducted. The minimum distance of hardening lines ensuring as homogeneous a structure as possible in the hardened surface as well as hardness above 500 HV 0.1 was determined. The results of tests of the specimen with 1 mm overlap between lines are presented in Fig. 8.

Pomiary od ścieżki 8 do ścieżki 9 Measurements from line 8 to line 9		Twardość HV0,1 HV 0.1 hardness
Odległość od powierzchni, 0,025 mm Distance from surface 0.025 mm	3,0 mm	699
	2,4 mm	677
	1,8 mm	691
	1,2 mm	627
	0,6 mm	584
	0 mm	502
	0,6 mm	515
	1,2 mm	753
	1,8 mm	712
	2,4 mm	733
	3,0 mm	739

a)



b)

Rys. 8. Twardość stali 42CrMo4 po hartowaniu przy 1 mm nakładaniu się na siebie ścieżek: a – wyniki pomiarów, b – rozkład twardości
Fig. 8. Hardness of 42CrMo4 steel after hardening with 1 mm overlap between lines: a – results of measurements, b – hardness distribution

Jak wynika z rys. 8, jednomilimetrowe nakładanie się ścieżek hartowniczych na siebie umożliwiło uzyskanie na odległości do 0,025 mm od powierzchni materiału, zahartowanej strefy pomiędzy badanymi ścieżkami. Dla zastosowanych parametrów technologicznych możliwe jest uzyskanie ciągłości zahartowanej powierzchni stali 42CrMo4 o szerokościach znacznie większych niż szerokość wiązki światła lasera diodowego.

W tab. 4 dla stali 42CrMo4 przedstawiono wpływ ciepła wiązki lasera pomiędzy nakładającymi się ścieżkami na twardość badanej stali.

As shown in Fig. 8, one-millimeter overlapping of hardening lines made it possible to achieve a hardened zone between the studied lines at a distance up to 0.025 mm from the material's surface. It is possible to achieve continuity of the hardened surface of 42CrMo4 steel with the applied process parameters, over widths significantly greater than the width of a diode laser beam.

The effect of laser beam heat between overlapping lines on the hardness of tested steel is presented in Tab. 4.

Tab. 4. Rozkład twardości stali 42CrMo4 w obszarze nakładania się zahartowanych ścieżek

Tab. 4. Hardness distribution of 42CrMo4 steel in the overlap area of hardened paths

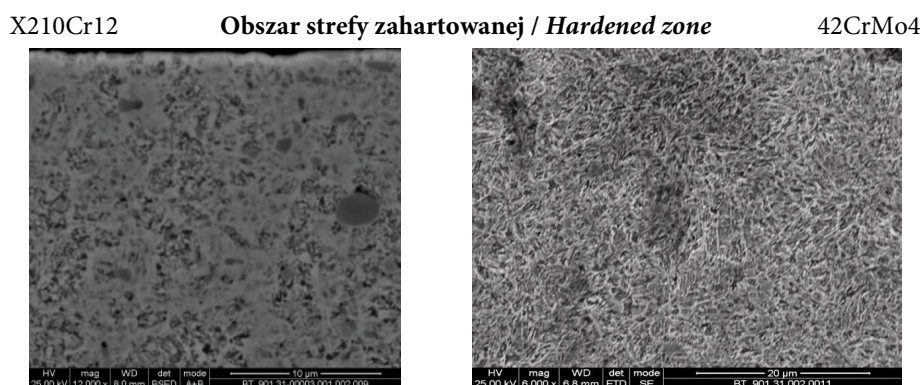
Odległość od powierzchni [mm] <i>Distance from surface [mm]</i>	42CrMo4 HV 0,1
0,025	515
0,05	483
0,1	437
0,15	440
0,2	451
0,25	425
0,3	250

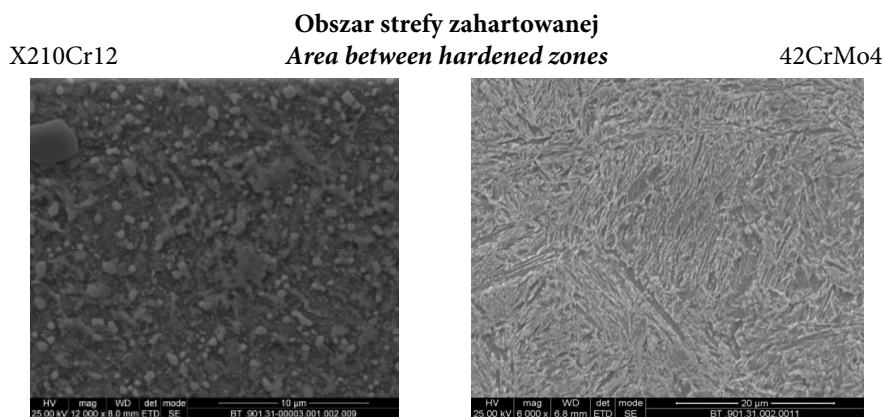
Porównując ze sobą wyniki badań przedstawione w tab. 4 z wynikami tab. 3, zaobserwować można w przypadku nakładania się ścieżek znaczny wpływ ciepła pomiędzy zahartowanymi ścieżkami. Pokrywanie się fragmentu ścieżek umożliwia uzyskanie warstwy zahartowanej do głębokości 0,25 mm. Powyżej tej wartości twardość materiału nie ulega zmianie w odniesieniu do materiału wyjściowego.

Na rys. 9 pokazano struktury stali X210Cr12 i 42CrMo4 w strefie zahartowanej i pomiędzy strefami hartowania (odległość pomiędzy ścieżkami wynosiła 1 mm).

When comparing the test results presented in Tab. 4 with the results in Tab. 3, one can observe a significant effect of heat between hardened lines in the case where lines overlap. Overlapping parts of lines make it possible to achieve a hardened layer up to a depth of 0.25 mm. Above this value, the material's hardness does not change compared to that of the starting material.

Fig. 9 shows the structure of X210Cr12 and 42CrMo4 steel in the hardened zone and between hardening zones (distance between lines equal to 1 mm).





Rys. 9. Struktury stali X210Cr12 oraz 42CrMo4 w strefie zahartowanej i między strefami zahartowanymi

Fig. 9. Structures of X210Cr12 and 42CrMo4 steel in the hardened zone and between hardened zones

Analizując strukturę materiału X210Cr12 zamieszczoną na rys. 9 w miejscu bezpośredniego wpływu wiązki hartowniczej można zaobserwować skrytoiglasty martenzyt i węgliki ledeburytyczne. Natomiast w obszarze pomiędzy ścieżkami hartowniczymi, gdzie nie zaobserwowano wpływu ciepła wiązki lasera, występują węgliki ledeburytyczne. W przypadku materiału 42CrMo4 struktura materiału w strefie zahartowanej (w ścieżce hartowniczej) wykazuje skrytoiglasty martenzyt i drobne wydzielania cementytu, natomiast w strefie nachodzenia się na siebie wiązek – gruboiglasty martenzyt oraz drobne wydzielania cementytu.

Z przeprowadzonych badań wynika, że w przypadku stali 42CrMo4 obszar pomiędzy ścieżkami hartowniczymi został zahartowany do wartości powyżej 500 HV 0,1. Dla stali narzędziowej X210Cr12 nałożenie się ścieżek na siebie w odległości 1 mm jest niewystarczające. W celu potwierdzenia wyników badań nakładania się na siebie ścieżek dla stali X210Cr12 wymagane jest przeprowadzenie kolejnych prób oraz dokładne przeanalizowanie otrzymanych wyników.

Uzyskane wyniki badań mogą znaleźć zastosowanie m.in. podczas hartowania powierzchniowego narzędzi typu matryce oraz stemple.

4. WNIOSKI

- Temperatura hartowania z wykorzystaniem lasera diodowego stali X210Cr12 wynosi 1050°C, a stali 42CrMo4 – 960°C

Analysis of the material's structure, shown in Fig. 9, for X210Cr12 material, in the area of the hardening beam's direct effect, reveals cryptoaciform martensite and ledeburite carbides, and ledeburite carbides are present in the area between hardening paths where the effect of laser beam heat was not observed. In the case of 42CrMo4 material, the structure of the material in the hardened zone (in the hardening line) exhibits semiaciform martensite and fine cementite precipitations, and in the beam overlap area – coarseaciform martensite and fine cementite precipitations.

Conducted studies show that, in the case of 42CrMo4 steel, the area between hardening lines was hardened to a value above 500 HV 0.1. For X210Cr12 tool steel, a 1 mm overlap of lines is insufficient. In order to confirm the results of studies of overlapping lines on X210Cr12 steel, more tests and thorough analysis of obtained results are required.

The obtained test results may find applications during surface hardening of die and stamp tools, among others.

4. CONCLUSIONS

- *The diode laser hardening temperature is 1050°C for X210Cr12 steel and 960°C for 42CrMo4 steel, and this temperature*

- i jest ona średnio o 100°C wyższa w porównaniu z temperaturą, z której się hartuje materiał podgrzewając go w piecu.
- W celu uzyskania warstwy zahartowanej pojedynczej ścieżki do głębokości 0,8 mm, przy posuwie 5 mm/s, należy dla stali X210Cr12 przyjąć moc lasera 2,5 kW. W przypadku stali 42CrMo4 przy analogicznych parametrach moc lasera powinna wynosić 2,4 kW.
 - Przy jednomilimetrowym pokrywaniu się ścieżek możliwe jest uzyskanie w strefie oddziaływania ciepła (na głębokości do 0,025 mm) twardości hartowanego materiału powyżej 500 HV 0,1.
 - Wyniki pomiaru twardości oraz wyniki obserwacji struktury (martenzytycznej) w strefie wpływu ciepła, zarówno w ścieżce hartowniczej, jak i w strefie pokrywania się ścieżek, świadczą o zahartowaniu materiału.

is 100°C higher on average than the temperature at which the material is hardened in a furnace.

- *In order to achieve a hardened layer of a single line up to a depth of 0.8 mm, at a feed rate of 5 mm/s, 2.5 kW laser power must be accepted for X210Cr12 steel. In the case of 42CrMo4 steel, laser power should be 2.4 kW for analogous parameters.*
- *It is possible to achieve a material hardness above 500 HV 0.1 in the heat-affected zone (up to a depth up to 0.025 mm) with 1 mm of overlap between lines.*
- *The results of hardness measurements and the results of structure (martensitic) observations in the heat-affected zone and in the line overlap area indicate that the material was hardened.*

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy statutowej Instytutu Obróbki Plastycznej w Poznaniu nr BT .901.31.03 pt. „Badania innowacyjnych technologii obróbki plastycznej blach, tłoczeniem i kształtowaniem obrotowym, prowadzących do uzyskania wyrobów o skomplikowanych kształtach i pożądanymi właściwościami eksploatacyjnymi za pomocą prób technologicznych i symulacji nowoczesnymi metodami komputerowymi”.

LITERATURA

- [1] Klimpel, Andrzej, Borek, Aleksander. 2013. „Laserowa obróbka cieplna części maszyn i urządzeń.” *Stal Met. Nowe Technol.* 9/10: 26-36,.
- [2] Klimpel, Andrzej. 2008. „Spawalnicze technologie laserowe. Przykłady zastosowania lasera diodowego dużej mocy.” *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach* 5: 35–40.
- [3] ALOtec Dresden GmbH. 2014. *ALOTec Dresden GmbH. Technologia.* <http://www.alotec.de/pl/technologie.html>.
- [4] Pawłowicz, Wojciech. 2011. „Hartowanie diodowym laserem dużej mocy.” *Mechanik* 3: 41–43.
- [5] Němeček, Stanislav. 2011. „Laser surface treatment of tools and machine parts.” *Inżynieria powierzchni* 4: 27–33.

ACKNOWLEDGEMENTS

Tests were conducted within the framework of a statutory research project of the Metal Forming Institute in Poznan no. BT 901.31.03 titled “Research on innovative sheet-working technologies, stamping and rotary swaging, leading to the achievement of products with complicated shapes and desired operating properties by means of technological tests and modern computer simulations”.

REFERENCES

- [1] Klimpel, Andrzej, Borek, Aleksander. 2013. „Laserowa obróbka cieplna części maszyn i urządzeń.” *Stal Met. Nowe Technol.* 9/10: 26-36,.
- [2] Klimpel, Andrzej. 2008. „Laser welding technologies. Examples of application of high power diode lasers.” *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach* 5: 35–40.
- [3] ALOtec Dresden GmbH. 2014. *ALOTec Dresden GmbH. Technologia.* <http://www.alotec.de/pl/technologie.html>.
- [4] Pawłowicz, Wojciech. 2011. „Quench hardening treatment by means of high power diode laser.” *Mechanik* 3: 41–43.
- [5] Němeček, Stanislav. 2011. „Laser surface treatment of tools and machine parts.” *Inżynieria powierzchni* 4: 27–33.