



## Wpływ stanu strukturalnego na skutki obróbki laserowej stali o różnym składzie chemicznym. Część II: Stale konstrukcyjne stopowe

### *Influence of structural state on the effects of laser treatment of steel with different chemical compositions. Part II: Constructional alloy steels*

Leopold Berkowski\*

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

#### Informacje o artykule

Zgłoszenie: 14.02.2019

Recenzja: 12.03.2019

Akceptacja: 30.06.2019

#### ORCID iD

<https://orcid.org/0000-0002-7460-8049>

#### Streszczenie

Praca obejmuje drugą część badań przyczynkowych nad oceną stanu strukturalnego stali o różnym składzie chemicznym w strefie grzania laserowego, realizowanych w Instytucie Obróbki Plastycznej oraz w Instytucie Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej. W pierwszej części [1] badano skutki obróbki laserowej stali węglowych o różnej zawartości węgla; od około 0,04 %C (stal E04J) do 0,8 %C (stal N8E). W niniejszym artykule oceniano podobnie skutki obróbki laserowej pięciu stali konstrukcyjnych o różnym składzie chemicznym (18HGT, 33H3MF, 38HMJ, 40H i 45) w stanie zahartowanym i ulepszonym cieplnie oraz porównano skutki obróbki laserowej stali 33H3MF i 38HMJ (przeznaczonych do azotowania) w stanie przed i po azotowaniu; przy czym grubość warstwy dyfuzyjnej wynosiła około 0,6 mm. Badania wykazały, że twardość po zahartowaniu laserowym zależy przede wszystkim od zawartości węgla w stali, natomiast odporność na odpuszczające działanie temperatury od zawartości węglotwórczych składników stopowych. Stwierdzono ponadto, że – podobnie jak w przypadku stali węglowych – parametry zahartowanego obszaru (głębokość i szerokość warstwy) zmniejszają się ze wzrostem prędkości przemieszczania się wiązki światła lasera. Obserwacje strukturalne wykazały, że warstwa obrobiona cieplnie zawiera różniące się między sobą obszary; strefa, a także liczne drobne pęknięcia ułożone zgodnie z kierunkiem odprowadzenia ciepła oraz (podobnie jak w pracy [1]) szczeliny ułożone prostopadle do powierzchni próbki i pęcherze. Stwierdzono zróżnicowane struktury hartowania w strefie przetopionej. W drugiej części badań oceniono rozkłady twardości warstw azotowanych stali 33H3MF i 38HMJ. Stwierdzono, że różnią się one głębokością utwardzenia i wyraźnie twardością przy powierzchni, a warstwa stali 33H3MF ma w tej części znacznie większą twardość. Zauważono również, że obróbka laserowa niszczy warstwę dyfuzyjną (powierzchniową), powodując powstanie pęcherzy, które w niektórych przypadkach są przyczyną tworzenia się nieciągłości powierzchni, a także że twardość przetopionej warstwy dyfuzyjnej jest o około 400 jednostek HV<sub>0,1</sub> mniejsza od twardości warstwy azotowanej.

**Słowa kluczowe:** stale konstrukcyjne, obróbka laserowa, azotowanie, właściwości warstwy, struktura warstwy

#### Article info

Received: 14.02.2019

Reviewed: 12.03.2019

Accepted: 30.06.2019

#### Abstract

*This paper covers the second part of adjunctive studies assessing the structural state of steel with different chemical compositions in a laser heating zone, conducted at the Metal Forming Institute and at the Institute of Machines and Transportation of the Poznań Uni-*

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

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

**ORCID iD**

<https://orcid.org/0000-0002-7460-8049>

versity of Technology. The first part [1] investigated the effects of laser treatment of carbon steels with varying carbon content; from approx. 0.04 %C (E04J steel) to 0.8 %C (N8E steel). Similarly, this article assesses the effects of laser treatment of five constructional steels with varying chemical compositions (18HGT, 33H3MF, 38HMJ, 40H and 45) in hardened and heat-treated state, and the effects of laser treatment of 33H3MF and 38HMJ steels (intended for nitriding) were compared in pre- and post-nitrided state; where the thickness of the diffusion layer was approx. 0.6 mm. Tests showed that hardness after laser treatment depends, above all, on carbon content in the steel, while resistance to the tempering action of temperature depends on the content of carbide-forming alloying ingredients. Moreover, it was determined that – similarly as in the case of carbon steels – the parameters of the hardened area (depth and width of the layer) decrease as the laser beam's speed of travel increases. Structural observations revealed that the heat-treated layer contains differing areas; the heat-affected zone, and numerous fine cracks oriented in the direction of heat take-off, as well as (similarly as in paper [1]), crevices arranged perpendicularly to the sample's surface, and bubbles. Different hardening structures were observed in the melted zone. In the second part of studies, hardness distributions of nitrided layers of 33H3MF and 38HMJ steels were evaluated. It was determined that they differ in hardening depth, and clearly, in near-surface hardness; and the layer of 33H3MF steel has substantially higher hardness in this layer. It was also observed that laser treatment destroys the diffusion (surface) layer, causing bubbles to form, which are the cause of surface discontinuities in certain cases, as well as that the hardness of the melted diffusion layer is approx. 400 HV0.1 units lower than the hardness of the nitrided layer.

**Keywords:** constructional steels, laser treatment, nitriding, layer properties, layer structure

**1. WPROWADZENIE**

Praca obejmuje drugą część badań przyczynkowych nad oceną stanu strukturalnego stali o różnym składzie chemicznym w strefie grzania laserowego, realizowanych w Instytucie Obróbki Plastycznej oraz w Instytucie Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej. W pierwszej części [1] badano skutki obróbki laserowej, przy zmiennej prędkości przemieszczania się wiązki światła lasera, na siedmiu gatunkach stali niestopowych o różnej zawartości węgla; od około 0,04%C (stal E04J) do 0,8%C (stal N8E). Wykazano, że wzrost zawartości tego składnika powoduje wyraźny wzrost twardości zahartowanej laserowo stali od 314 do 1054 HV0,1 i wpływa na kształt zahartowanej warstwy, a wzrost prędkości przemieszczania się wiązki także na zmniejszenie jej głębokości. Zauważono ponadto, że zawartość węgla wpływa na charakter nieciągłości powstałych w strefie przetopionej, gdyż w stalach o mniejszej zawartości węgla pojawiały się pęcherze, większej – szczeliny.

Niniejszy artykuł obejmuje:

- ocenę skutków obróbki laserowej pięciu stali konstrukcyjnych o różnym składzie chemicznym

**1. INTRODUCTION**

*This paper covers the second part of adjunctive studies assessing the structural state of steel with different chemical compositions in a laser heating zone, conducted at the Metal Forming Institute and at the Institute of Machines and Transportation of the Poznań University of Technology. In the first part [1], the effects of laser treatment, at varying laser beam travel speed, on seven grades of non-alloy steels with varying carbon content – from approx. 0.04%C (E04J steel) to 0.8%C (N8E steel) – were investigated. It was demonstrated that the increase in the content of this ingredient causes a substantial increase in the hardness of laser-hardened steel, from 314 to 1054 HV0.1, and affects the shape of the hardened layer, and an increase in beam travel speed also caused a reduction of this layer's depth. Moreover, it was observed that carbon content affects the nature of discontinuities formed in the melted zone, since bubbles appeared in steels with lower carbon content, and in those with higher content – crevices. This article covers:*

- assessment of the effects of laser treatment of five constructional steels of varying chemical

nym (18HGT, 33H3MF, 38HMJ, 40H i 45) w stanie zahartowanym i ulepszonym cieplnie (w stanie zahartowanym i odpuszczonym),

- porównanie skutków obróbki laserowej stali 33H3MF i 38HMJ (przeznaczonych do azotowania) w stanie przed i po azotowaniu.

Doświadczenia przeprowadzono, zachowując takie same jak poprzednio [1], warunki naświetlania laserowego. Badania miały dać odpowiedź na następujące pytania:

- jak wpływa skład chemiczny stali konstrukcyjnych na skutki obróbki laserowej, przy różnym czasie naświetlania wiązką światła lasera, na twardość, strukturę i budowę warstwy wierzchniej?
- Jakie są skutki obróbki laserowej azotowanych stali konstrukcyjnych 33H3MF i 38HMJ?

## 2. WYNIKI BADAŃ

### 2.1. Stale konstrukcyjne o różnym składzie chemicznym

Celem badań [2] była ocena właściwości wybranych stali konstrukcyjnych po hartowaniu laserowym z przetopieniem, które podobnie jak w pracy [1] przeprowadzono przy zastosowaniu różnych prędkości przemieszczania się wiązki promieniowania (16, 24, 36, 64 i 96 mm/s), a więc przy zmieniającym się czasie naświetlania. Hartowanie przeprowadzono przy użyciu lasera technologicznego firmy TRUMPF w Laboratorium Techniki Laserowej Politechniki Poznańskiej. Stosowano moc i szerokość wiązki światła lasera, odpowiednio 1300 W i 1 mm. Z każdej stali naświetlano po dwie próbki. Jedną z nich, po hartowaniu, odpuszczano w temperaturze 450°C w ciągu jednej godziny, drugą pozostawiono w stanie zahartowanym.

composition (18HGT, 33H3MF, 38HMJ, 40H and 45) in hardened state and heat-treated state (hardened and tempered),

- comparison of the effects of laser treatment of 33H3MF and 38HMJ steel (intended for nitriding) in pre- and post-nitriding state.

Experiments were carried out with preservation of the same conditions of laser exposure as previously [1]. Tests were to provide an answer to the following questions:

- how does the chemical composition of constructional steels influence the effects of laser treatment, for different times of exposure to the laser beam, on the hardness, structure and morphology of the surface layer?
- What are the effects of laser treatment of nitrided constructional steels 33H3MF and 38HMJ?

## 2. TESTS RESULTS

### 2.1. Constructional steels with different chemical compositions

The goal of tests [2] was to assess the properties of selected constructional steels after laser hardening with melting, which was conducted with the application of different laser beam travel speeds (16, 24, 36, 64 and 96 mm/s), and hence, different exposure times, similarly as in article [1]. Hardening was performed using a technological laser from TRUMPF at the Laser Technology Laboratory of the Poznań University of Technology. The applied power and width of the laser beam were, respectively, 1300 W and 1 mm. Two samples of each steel were laser-treated. After hardening, one of them was tempered at 450°C over one hour, and the second was left in hardened state.

Tab. 1. Skład chemiczny stali konstrukcyjnych 18HGT, 33H3MF, 38HMJ, 40H i 45

Tab.1. Chemical composition of constructional steels 18HGT, 33H3MF, 38HMJ, 40H and 45

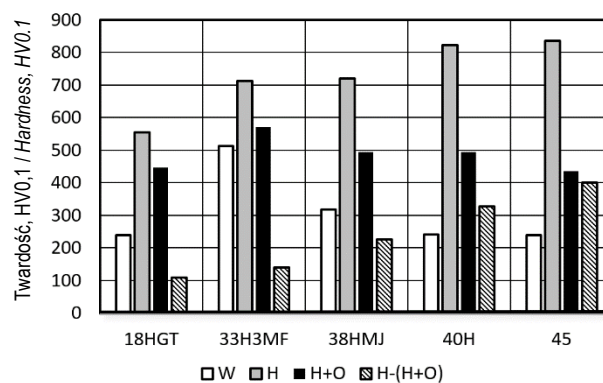
Skład chemiczny w % / Chemical composition in %								
Stal / Steel	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ti	Al
18HGT	0,20	0,94	0,33	1,10	—	—	0,065	—
33H3MF	0,31	0,65	0,30	2,50	0,41	0,27	—	—
38HMJ	0,37	0,47	0,31	1,54	0,31	—	0,035	0,94

Skład chemiczny w % / Chemical composition in %								
Stal / Steel	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ti	Al
40H	0,44	0,62	0,31	0,93	—	—	—	—
45*	0,42–0,50	0,50–0,80	Max 0,40	Max 0,40	Max 0,10	—	-	—

\*- Składniki stali wg. PN/EN 10083-2 / \*- Steel ingredients according to PN/EN 10083-2

Skład chemiczny badanych stali podano w tab. 1. Skład stali stopowych podano wg atestu hutniczego, stal 45 według PN/EN – 10083 – 2. Wybrano stale konstrukcyjne o różnym przeznaczeniu: jedną stal do nawęglania 18HGT, dwie stale do azotowania 33H3MF i 38HMJ oraz dwie popularne, o zbliżonych właściwościach – stal o podwyższonej zawartości chromu (40H) i stal węglową (45). Skutki obróbki laserowej – na próbkach zahartowanych oraz zahartowanych i odpuszczonych – oceniano metodą pomiaru twardości (HV0,1), za pomocą twardościomierza ZWICK 3212. Tym sposobem mierzono szerokość i głębokość ścieżki strefy grzania laserowego, przy czym szerokość w odległości 0,03 mm od powierzchni próbki. Ponadto przeprowadzono obserwacje struktury warstw przy pomocy mikroskopu świetlnego.

The chemical compositions of the tested steels are given in Tab. 1. Compositions of alloy steels were given according to metallurgical attestations, and of 45 steel according to PN/EN – 10083 – 2. Constructional steels with different purposes were selected: one steel for carburization 18HGT, two steels for nitriding 33H3MF and 38HMJ, and two popular steels with similar properties – steel with elevated chromium content (40H) and carbon steel (45). The effects of laser treatment – on hardened samples and hardened and tempered samples – were assessed by means of hardness measurement (HV0.1) using a ZWICK 3212 hardness tester. In this manner, the width and depth of the laser heating zone's path was measured, where width was measured at a distance of 0.03 mm from the sample's surface. Furthermore, layer structures were observed under a light microscope.



Rys. 1. Twardość stali 18HGT, 33H3MF, 38HMJ, 40H i 45 w stanie wyjściowym (W) oraz po obróbce laserowej w stanie hartowanym (H), hartowanym i odpuszczonym (H+O) oraz spadek twardości po odpuszczaniu stali H–(H+O)

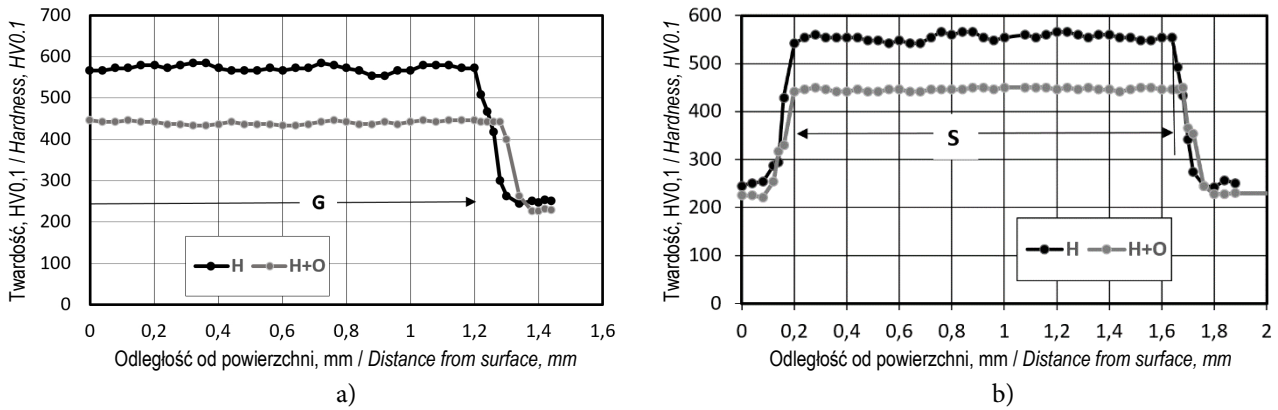
Fig. 1. Hardness of 18HGT, 33H3MF, 38HMJ, 40H and 45 steels in initial state (W) and after laser treatment in hardened state (H), hardened and tempered state (H+O), and hardness drop after tempering of steel H–(H+O)

Na rys. 1 przedstawiono uśrednione wyniki badań twardości pięciu stali konstrukcyjnych (18HGT, 33H3MF, 38HMJ, 40H i 45) w stanie wyjściowym (po wyżarzaniu lub ulepszonym), zahartowanych wiązką światła lasera oraz po odpuszczeniu w temperaturze 450°C w ciągu jednej godziny. Twardość po hartowaniu laserowym zależy przede wszystkim od zawartości węgla w stali; im większa zawartość tego składnika,

Fig. 1 shows averaged results of hardness tests performed on five constructional steels (18HGT, 33H3MF, 38HMJ, 40H and 45) in initial state (after annealing or heat treatment), hardened with laser beam, and after tempering at 450°C over one hour. Hardness after laser hardening depends, above all, on the carbon content in the steel; the greater the content of this ingredient, the higher the hardness – as in article [1]. Mean-

tym większa twardość – jak w pracy [1]. Natomiast odporność na odpuszczające działanie temperatury od udziału (odpowiednio) węglotwórczych składników stopowych. Wynika to z porównania „spadków” twardości po odpuszczeniu stali; H-(H+O).

while, resistance to the tempering action of temperature depends on the share (respectively) of carbide-forming alloying ingredients. This arises from the comparison of hardness “drops” after steel tempering; H-(H+O).

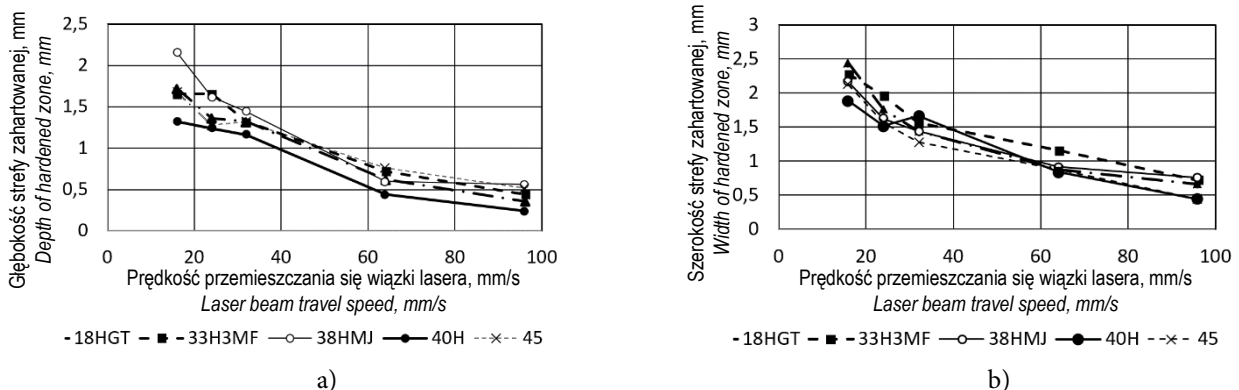


Rys. 2. Parametry warstwy zahartowanej stali 18HGT: a) twardość od powierzchni (G), b) twardość na szerokości warstwy w odległości 0,03 mm od powierzchni (S); prędkość przemieszczania się wiązki światła lasera – 32 mm/s

Fig. 2. Parameters of hardened layer of 18HGT steel: a) hardness from surface (G), b) hardness on width of layer at a distance of 0.03 mm from the surface (S); laser beam travel speed – 32 mm/s

Podobnie jak w pracy [2], wyznaczono grubość G i szerokość S obszaru zahartowanego. Wybrano stal 18HGT, którą hartowano z prędkością przemieszczania się wiązki lasera 32 mm/s. Na rys. 2 podano przykład, zmianę twardości na głębokości (a) i szerokości warstwy wierzchniej (b). W podobny sposób, lecz przy różnych prędkościach, wyznaczono rozkłady twardości pozostałych stali.

Similarly as in paper [2], the thickness G and width S of the hardened area were determined. 18HGT steel was selected and hardened at a beam travel speed of 32 mm/s. Fig. 2 presents an example of hardness change over the depth (a) and width of the surface layer (b). Hardness distributions of the other steels were determined similarly, but at different travel speeds.

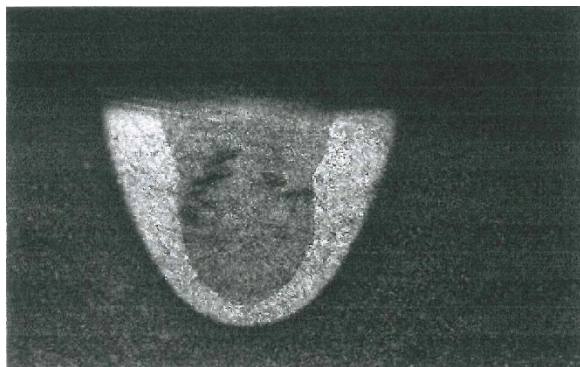


Rys. 3. Wpływ prędkości przemieszczania się wiązki światła lasera na grubość (a) i szerokość (b) warstwy zahartowanej stali 18HGT, 33H3MF, 38HGT, 40H i 45

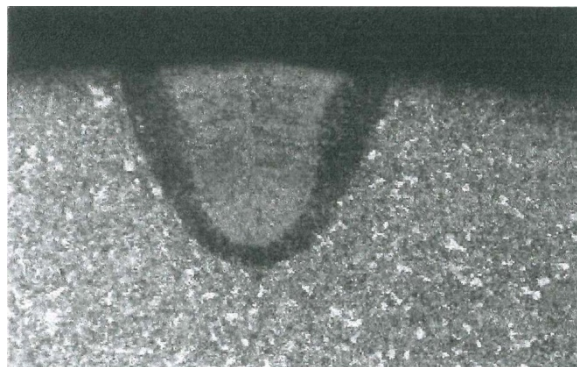
Fig. 3. Influence of laser beam travel speed on the thickness (a) and width (b) of the hardened layer of 18HGT, 33H3MF, 38HGT, 40H and 45 steels

Na rys. 3 przedstawiono zmiany grubości zahartowanej i twardości warstwy pięciu wybranych stali konstrukcyjnych. Z rysunku wynika, że zarówno grubości, jak i szerokości warstwy zahartowanej maleje ze wzrostem prędkości przemieszczania się wiązki promieniowania laserowego.

*Fig. 3 shows changes of hardened thickness and layer hardness of the five selected constructional steels. The figure shows that both thicknesses and widths of the hardened layer decrease as laser beam travel speed increases.*



a)



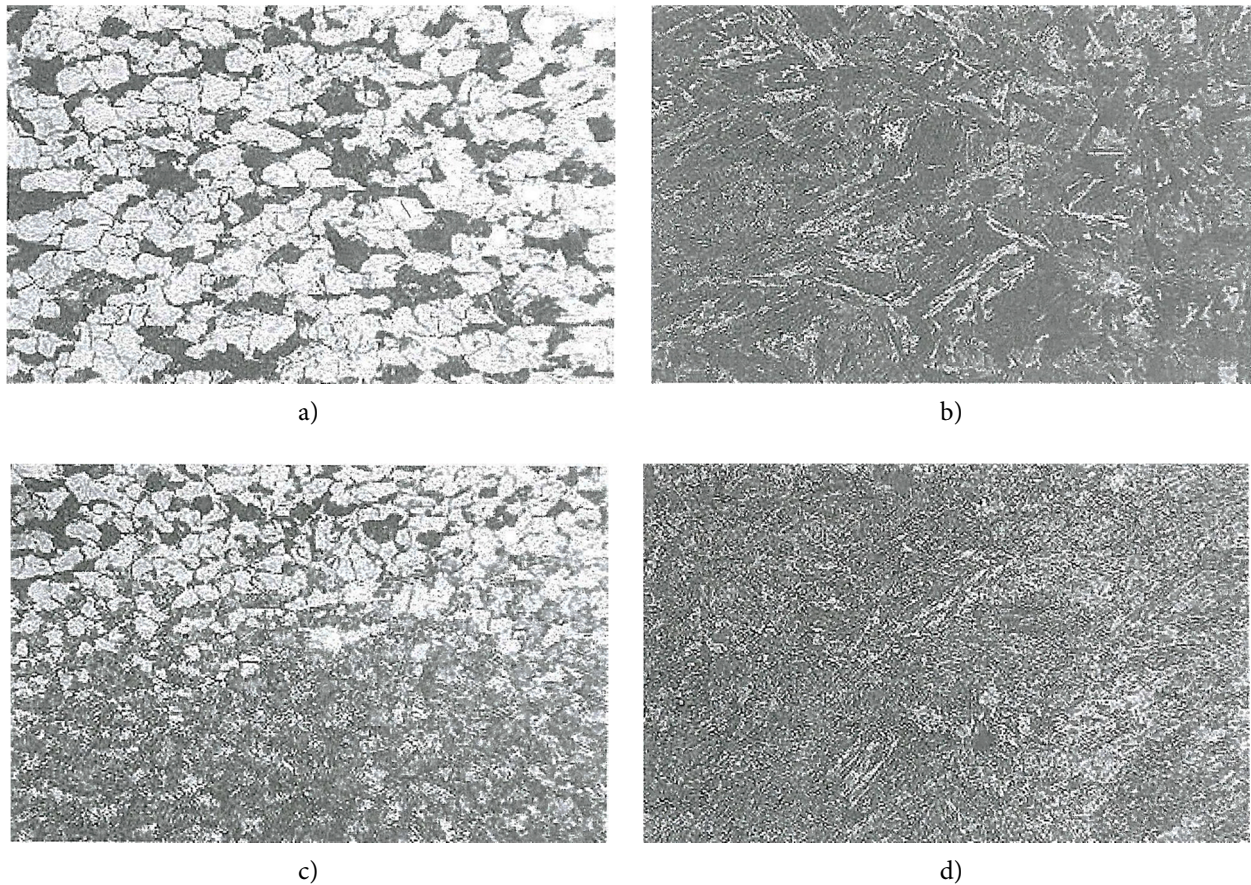
b)

Rys. 4. Warstwy stali 33H3MF (a) i 40H (b) zahartowane z prędkością przemieszczania się wiązki lasera 64 mm/s (przykład); pow. 5x

*Fig. 4. Layers of 33H3MF (a) and 40H steel (b) hardened at a laser beam travel speed of 64 mm/s (example); mag. 5x*

Badane materiały należą do popularnych stali konstrukcyjnych o ferrytyczno-perlitycznej strukturze, różniących się w stanie wyżarzonym ilością i budową cementytu. Po obróbce laserowej – po zahartowaniu z przetopieniem – warstwa obrobiona cieplnie zawiera dwa różniące się między sobą obszary. W części przetopionej występuje martenzyt, w pozostałej, nieprzetopionej – martenzyt ze zmieniającym się udziałem ferrytu. Na rys. 4 porównano warstwy zahartowane wiązką lasera stali 33H3MF (a) i 40H (b). Widoczne są dwie zahartowane strefy, reagujące odmiennie na działanie tego samego odczynnika (3% Nital). W strefie „martenzytycznej” stali 33H3MF widoczne są drobne pęknięcia, ułożone zgodnie z kierunkiem odprowadzania ciepła. W innych warstwach, także pozostałych badanych stali, zaobserwowano (podobnie jak w pracy [1]) nieciągłości w postaci szczelin ukierunkowanych prostopadle do powierzchni próbki. Wynika to z działania naprężeń powstałych podczas chłodzenia zakrzepniętej części warstwy. Zaobserwowane pęcherze wynikają prawdopodobnie z kumulacji gazów w ciekłym metalu. Zauważono ponadto, że najwięcej nieciągłości występowało w przetopionej strefie stali 33H3MF, najmniej – w stali 18HGT.

*The tested materials are among popular constructional steels with a ferritic-pearlitic structure, differing in the amount and structure of cementite in annealed state. After laser treatment – hardening with melting – the heat-treated layer contains two differing areas. Martensite is present in the melted part, and in the remaining, unmelted part – martensite with a varying share of ferrite. Fig. 4 compares laser-hardened layers of 33H3MF(a) and 40H(b) steel. Two hardened zones are visible, reacting differently to the action of the same reagent (3% Nital). In the “martensitic” zone of 33H3MF steel, fine cracks are visible, oriented according to the direction of heat take-off. In other layers, including those of the other tested steels, discontinuities were observed (similarly as in paper [1]) in the form of crevices oriented perpendicularly to the sample’s surface. This is due to the action of stresses generated during cooling of the solidified part of the layer. Observed bubbles are most probably the result of gas accumulation in the liquid metal. Moreover, it was observed that the most discontinuities were present in the melted zone of 33H3MF steel, and the least in 18HGT steel.*

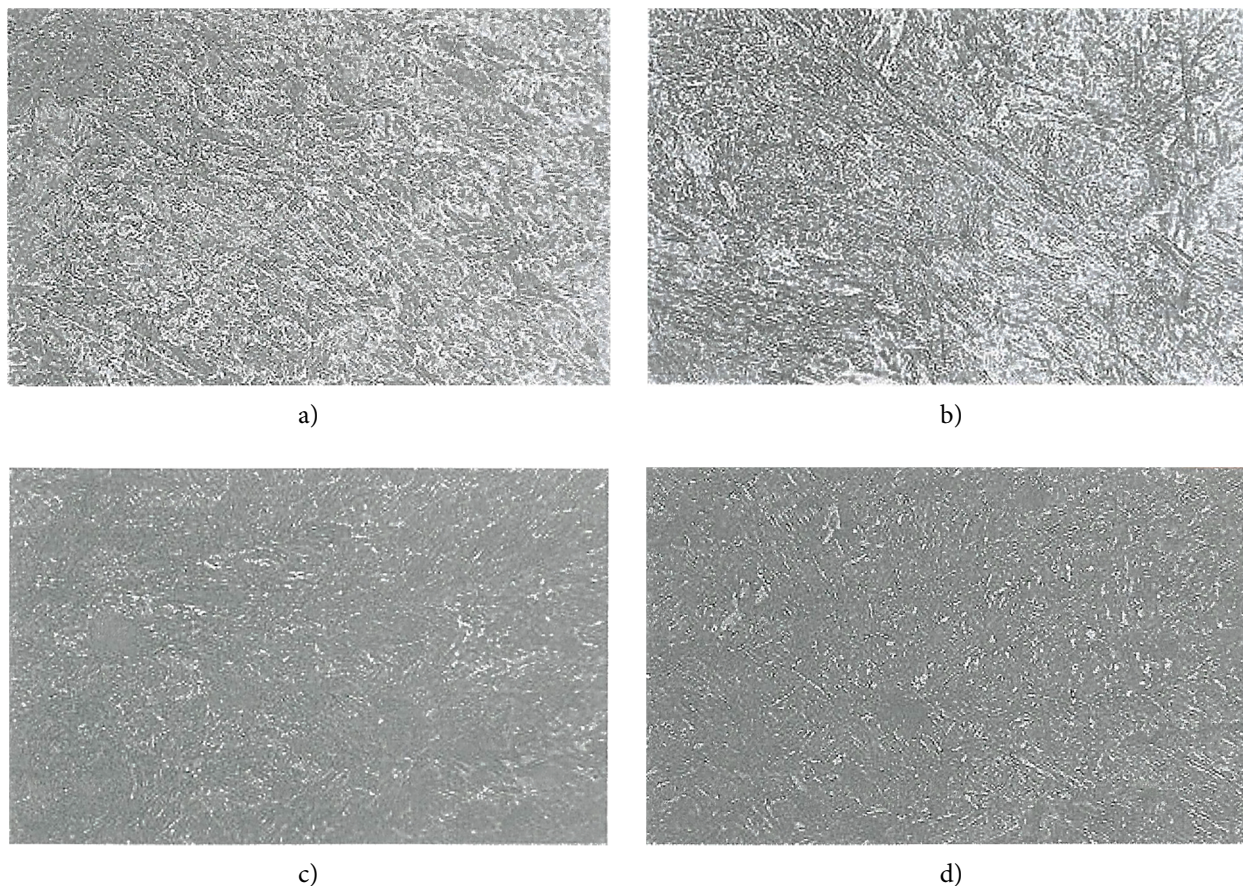


Rys. 5. Struktury stali 18HGT: a) w stanie wyżarzonym i po obróbce laserowej z prędkością przemieszczania się wiązki lasera 16 mm/s; b) po zahartowaniu z przetopieniem, c) w strefie przejściowej, d) po zahartowaniu i odpuszczaniu (450°C, 1h); pow. 500 x

Fig. 5. Structures of 18HGT steel: a) in annealed state and after laser treatment with laser beam travel speed 16 mm/s; b) after hardening with melting, c) in transitional zone, d) after hardening and tempering (450°C, 1h); mag. 500 x

Istotne różnice strukturalne po obróbce laserowej i odpuszczaniu (w temperaturze 450°C w ciągu jednej godziny) zaobserwowano w zahartowanych strefach warstwy wierzchniej stali 18HGT (rys. 5). Struktura stali po wyżarzaniu złożona jest z ziaren perlitu i cementytu (rys. 5a). W strefie (b), zahartowanej z przetopieniem, widoczne są kryształy niskowęglowego martenzytu (rys. 5b). W strefie przejściowej (rys. 5c) występuje częściowo zahartowany perlit oraz struktura stanu wyjściowego – ferryt z perlitem. Po odpuszczeniu (d) struktura iglasta martenzytu w pewnym stopniu zanika (rys. 5d). Pojawiają się natomiast drobne wydzielania cementytu.

Significant structure differences were observed in hardened zones of the surface layer of 18HGT steel (Fig. 5) after laser treatment and tempering (at 450°C over one hour). The structure of the steel after annealing consists of pearlite and cementite grains (Fig. 5a). In zone (b), hardened and melted, low-carbon martensite crystals are visible (Fig. 5b). Partially hardened pearlite and the structure of the initial state – ferrite with pearlite – are present in the transitional zone (Fig. 5c). After tempering (d), the aciform structure martensite disappears to a certain extent (Fig. 5d). At the same time, fine cementite precipitates appear.



Rys. 6. Struktury stali 33H3MF, 38HMJ, 40H i 45 po zahartowaniu z przetopieniem, z prędkością przemieszczania się wiązki światła lasera 16 mm/s; pow. 500 x  
 Fig. 6. Structures of 33H3MF, 38HMJ, 40H and 45 steel after hardening with melting, at laser beam travel speed 16 mm/s; mag. 500 x

Rys. 6 przedstawia struktury zahartowanych stali w strefie przetopionej. Stal 33H3MF (a) ma strukturę martenzytyczną ze śladami dendrytów, które obserwowano także w strukturze tej stali po odpuszczeniu w temperaturze 450°C. Struktura stali 38HMJ (b) w tej strefie jest iglasta i nie wykazuje obecności dendrytów, podobnie jak dwóch pozostałych stali 40H (c) i 45 (d), lecz widoczne kryształy martenzytu są drobniejsze od poprzednich. Zaobserwowano ponadto, że struktury hartowania w strefie przetopienia, po odpuszczaniu, choć na ogół niej wyrażnie skutkiem wydzielenia cementytu, zachowują pierwotny charakter.

## 2.2. Obróbka laserowa stali azotowanych

Badano skutki hartowania laserowego azotowanych stali konstrukcyjnych 33H3MF i 38HMJ [3]. Obróbkę laserową prowadzono przy zachowaniu tych samych warunków jak w punkcie 2.1.

Fig. 6 shows the structures of hardened steels in the melted zone. 33H3MF steel (a) has a martensitic structure with traces of dendrites, which were also observed in the structure of this steel after tempering at 450°C. The structure of 38HMJ steel (b) in this zone is aciform and does not exhibit the presence of dendrites, similarly as in the two other steels 40H (c) and 45 (d), however visible martensite crystals are finer than previously. Furthermore, it was observed that hardening structures in the melted zone maintain their original character after tempering, although they are generally less distinct as a result of cementite precipitates.

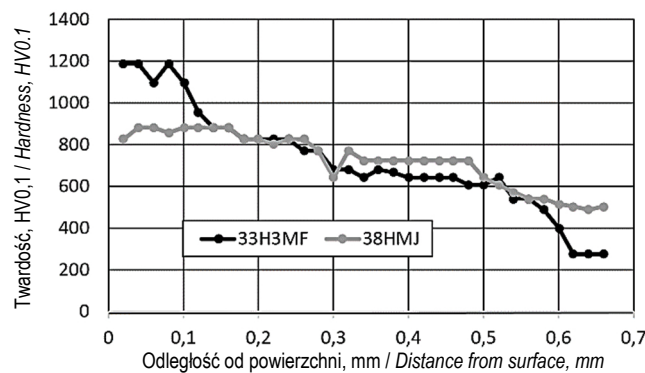
## 2.2. Laser treatment of nitrided steels

The effects of laser hardening of nitrided constructional steels 33H3MF and 38HMJ were investigated [3]. Laser treatment was performed applying the same conditions as in section 2.1. Two



Obrabiano po dwie próbki z każdej stali. Przed obróbką stale znajdowały się w stanie dostawy hutniczej; stal 38HMJ w stanie wyżarzonym, 33H3MF – po ulepszeniu cieplnym. Po jednej próbce z każdej stali azotowano gazowo na głębokość około 0,6 mm. Po hartowaniu laserowym, na zglądach prostopadłych do powierzchni próbki, mierzono twardość HV0,1 i przeprowadzono obserwację struktury. Z uwagi na charakterystyczne zmiany zahartowanej warstwy, pomiary przeprowadzono w odległości 0,3 mm od powierzchni (w warstwie azotowanej) i 0,7 mm poza tą warstwą.

*samples of each steel were treated. Prior to treatment, steels were found in the state as-delivered from the steel mill; 38HMJ steel in annealed state, 33H3MF – after heat treatment. One sample of each steel was gas nitrated to a depth of approx. 0.6 mm. After laser hardening, HV0.1 hardness was measured on polished sections perpendicular to the sample's surface and observations of the structure were conducted. Due to characteristic changes of the hardened layer, measurements were carried out at a distance of 0.3 mm from the surface (in the nitrated layer) and 0.7 mm outside of this layer.*

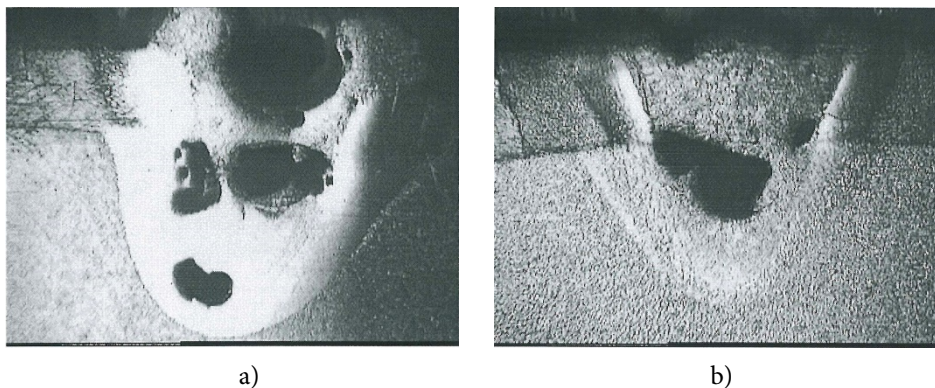


Rys. 7. Rozkład twardość warstwy azotowanej stali 33H3MF i 38 HMJ

*Fig. 7. Hardness distribution of the nitrated layer of 33H3MF and 38 HMJ steel*

Z przedstawionej na rys. 7 zależności twardości od odległości od powierzchni wynika, że przy jednakowych warunkach azotowania, warstwy dyfuzyjne badanych stali wyraźnie się różnią. Stal 33H3MF, o większej zawartości węglotwórczych składników stopowych, zawiera przy powierzchni cienką, bardzo twardą warstewkę, prawdopodobnie azotku  $\epsilon$ . W stali 38HMJ takiej warstewki nie zaobserwowano.

*The function of hardness with respect to distance from the surface presented in Fig. 7 shows that, for identical nitriding conditions, the diffusion layers of the tested steels differ significantly. 33H3MF steel, with a higher content of carbide-forming alloying ingredients, has a thin, very hard film near the surface, probably made up of  $\epsilon$  nitride. No such film was observed in 38HMJ steel.*

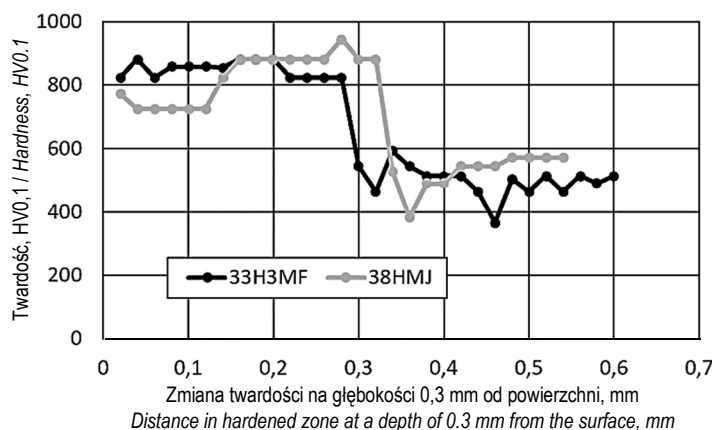


Rys. 8. Struktura warstwy zahartowanej laserowo stali 33H3MF (a) i 38HMJ (b);  
prędkość przesuwania się wiązki światła laserowego – 16 mm/s; pow. 20 x

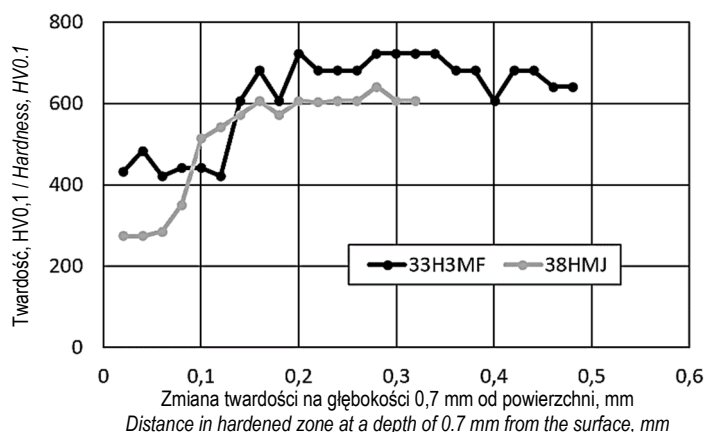
*Fig. 8. Structure of laser-hardened layer of 33H3MF (a) and 38HMJ steel (b); laser beam travel speed – 16 mm/s; mag. 20 x*

Obróbka laserowa – niezależnie od zastosowanej prędkości przemieszczania się wiązki – niszczy w warstwach próbek ze stali 33H3MF warstwę dyfuzyjną. W strefie przetopionej tworzyły się pęcherze, które w niektórych przypadkach spowodowały przerwanie warstwy wierzchniej. Na rys. 8 pokazano strefę zahartowania z przetopieniem stali 33H3MF (a) i stali 38HMJ (b) po obróbce laserowej z prędkością przesuwania się wiązki 16 mm/s.

*Laser treatment – regardless of the applied beam travel speed – destroys the diffusion layer in layers of 33H3MF steel samples. Bubbles formed in the melted zone, causing interruption of the surface layer in certain cases. Fig. 8 shows the hardening zone with melting of 33H3MF steel (a) and 38HMJ steel (b) after laser treatment at beam travel speed 16 mm/s.*



Rys. 9. Twardość warstwy, w odległości 0,3 mm do powierzchni, stali 33H3MF i 38HMJ zahartowanych laserowo przy prędkości przesuwania się wiązki światła lasera – 16 mm/s  
 Fig. 9. Hardness of layer at a distance of 0.3 mm from the surface in 33H3MF and 38HMJ steels laser-hardened at beam travel speed – 16 mm/s



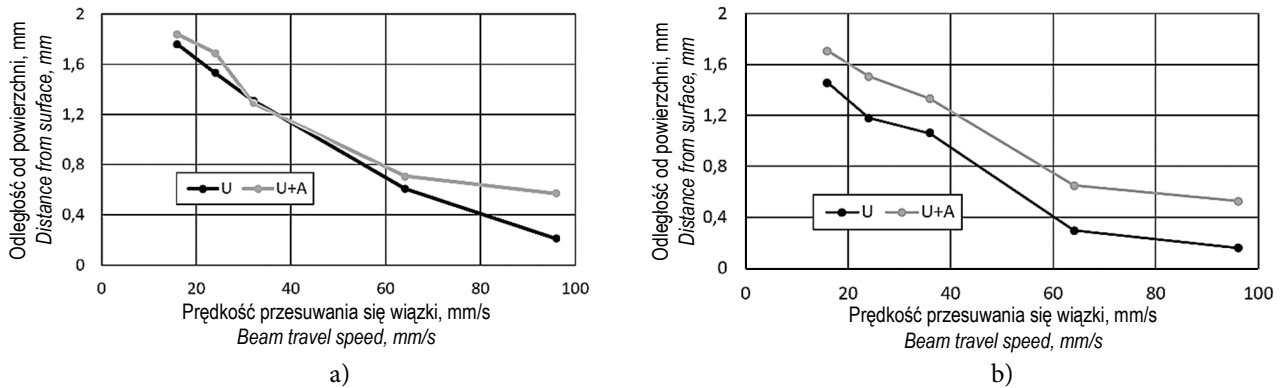
Rys. 10. Twardość warstwy, w odległości 0,7 mm do powierzchni, stali 33H3MF i 38HMJ zahartowanych laserowo przy prędkości przesuwania się wiązki światła lasera – 16 mm/s  
 Fig. 10. Hardness of layer at a distance of 0.7 mm from the surface in 33H3MF and 38HMJ steels laser-hardened at beam travel speed – 16 mm/s

Na próbkach zahartowanych przy prędkości 16 mm/s przeprowadzono pomiary twardości HV0,1 w odległości 0,3 mm (rys. 9) i 0,7 mm (rys. 10) od powierzchni. Z rys. 9 wynika, że twar-

*Measurements of HV0.1 hardness were carried out on samples hardened at a speed of 16 mm/s, at a distance of 0.3 mm (Fig. 9) and 0.7 mm (Fig. 10) from the surface. Figure 9 shows that the*

dość przetopionej, zahartowanej warstwy jest o około 400 jednostek HV<sub>0,1</sub> mniejsza od twardości warstwy azotowanej, przy niewielkiej różnicy twardości obydwu stali w poszczególnych strefach. W strefie na głębokości 0,7 mm od powierzchni (rys. 10) stal 33H3MF ma w obszarze zahartowanym większą twardość niż stal 38HMJ.

hardness of the melted, hardened layer is approx. 400 HV<sub>0.1</sub> units lower than the hardness of the nitrided layer, with a small difference in the hardness of both steels in individual zones. In the zone at a depth of 0.7 mm from the surface (Fig. 10), 33H3MF steel has a higher hardness in the hardened area than 38HMJ steel.



Rys. 11. Głębokość zahartowania laserowego, w zależności od prędkości przemieszczania się wiązki światła lasera, stali 33H3MF (a) i 38HMJ (b); U – stal wyżarzona lub ulepszona cieplnie, U+A – i dodatkowo azotowana

Fig. 11. Depth of laser hardening, depending on laser beam travel speed, of 33H3MF (a) and 38HMJ steel (b); U – annealed or heat-treated steel, U+A – with additional nitriding

Zależność głębokości zahartowania stali 33H3MF i 38HMJ od prędkości przemieszczania się wiązki lasera pokazano na rys. 11. Stwierdzono, że strefa zahartowana stali azotowanej sięga nieco głębiej niż stali w stanie ulepszonym (wyżarzonym). Widać to wyraźnie w przypadku stali 38HMJ (rys. 11b), gdyż – niezależnie od prędkości przesuwania się wiązki światła lasera – głębokość utwardzenia stali po zahartowaniu laserowym jest o 0,2 mm większa.

The function of hardening depth of 33H3MF and 38HMJ steel with respect to laser beam travel speed is shown in Fig. 11. It was determined that the hardening zone of nitrided steel reaches slightly deeper than in steel in heat-treated (annealed) state. This can clearly be seen in the case of 38HMJ steel (Fig. 11b), since – regardless of the laser beam travel speed – the depth of steel hardening after laser hardening is greater by 0.2 mm.

### 3. PODSUMOWANIE

Artykuł prezentuje drugą część wyników badań skutków obróbki laserowej; w tym przypadku wybranych pięciu stali konstrukcyjnych 18HGT, 33H3MF, 38HMJ, 40H i 45. Przed obróbką stale znajdowały się w stanie dostawy; wyżarzonym hutniczo lub, jak w przypadku stali 33H3MF, w stanie ulepszonym cieplnie. Stale 33H3MF i 38HMJ zostały dodatkowo azotowane, a grubość warstwy dyfuzyjnej po azotowaniu wynosiła około 0,6 mm.

Badania wykazały, że twardość po zahartowaniu laserowym – podobnie jak w pracy [1] –

### 3. SUMMARY

This article presents the second part of the results of investigations regarding the effects of laser treatment; in this case, of five selected constructional steels: 18HGT, 33H3MF, 38HMJ, 40H and 45. Prior to treatment, steels were found in as-delivered state; annealed at the steel mill, or, as in the case of 33H3MF steel, in heat-treated state. 33H3MF and 38HMJ steels were additionally nitrided, and the thickness of the diffusion layer after nitriding was approx. 0.6 mm.

Tests showed that hardness after laser hardening – similarly as in article [1] – depends, above

zależy przede wszystkim od zawartości węgla w stali, a odporność na odpuszczające działanie temperatury, od zawartości węglotwórczych składników stopowych. Stwierdzono ponadto, że podobnie jak w przypadku stali węglowych [1] parametry zahartowanego obszaru (głębokość i szerokość warstwy) zmniejszają się ze wzrostem prędkości przemieszczania się wiązki światła lasera.

Obserwacje strukturalne wykazały, że warstwa po obróbce laserowej zawiera różniące się obszary. W części przetopionej występuje martenzyt, a w pozostałej – zahartowanej z temperatury niższej od temperatury topienia – martenzyt ze zmieniającym się udziałem ferrytu. Budowa tych struktur zależy od zawartości składników stopowych w stali. Strefa przetopiona zawiera w wielu przypadkach liczne, drobne pęknięcia, ułożone zgodnie z kierunkiem odprowadzenia ciepła. Podobnie – jak wykazano w pracy [1] – występują szczeliny ułożone prostopadle do powierzchni próbki oraz pęcherze. Stwierdzono, że struktury w strefie przetopionej są zróżnicowane. Struktura stali 18HGT zawiera nisko-węglowy martenzyt, a stal 33H3MF strukturę martenzytyczną ze śladami dendrytów, których brak w strukturze stali 38HMJ. Struktura pozostałych stali 40H i 45 jest martenzytyczna, drobniejsza, a kryształy martenzytu są ledwo widoczne.

W drugiej części badań oceniono wstępnie rozkłady twardości warstwy azotowanych stali 33H3MF i 38HMJ. Stwierdzono, że różnią się one głębokością utwardzenia i wyraźnie twardością przy powierzchni. Warstwa stali 33H3MF ma znacznie większą twardość, spowodowaną prawdopodobnie występowaniem fazy  $\epsilon$ .

Badania wykazały, że obróbka laserowa niszczy warstwę dyfuzyjną (powierzchniową), powodując powstanie pęcherzy, które w niektórych przypadkach są przyczyną tworzenia się nieciągłości powierzchni, zwłaszcza w stali 33H3MF. Wykazano ponadto, że twardość przetopionej warstwy dyfuzyjnej jest o około 400 jednostek HV0,1 mniejsza od twardości warstwy azotowanej, a strefa zahartowana stali azotowanej sięga głębiej aniżeli strefa w stali tylko ulepszonej (rys. 11).

Przedstawione w części pierwszej [1] i drugiej (niniejszej) wyniki badań zawierają ocenę skutków obróbki laserowej (hartowania z przeto-

*all, on carbon content in the steel, while resistance to the tempering action of temperature depends on the content of carbide-forming alloying ingredients. Moreover, it was determined that, similarly as in the case of carbon steels [1], the parameters of the hardened area (depth and width of the layer) decrease as the laser beam's speed of travel increases.*

*Structural observations revealed that the layer contains differing areas after laser treatment. Martensite is present in the melted part, and in the remaining part – hardened from a temperature lower than the melting point – martensite with a varying share of ferrite. The morphology of these structures depends on the content of alloying ingredients in steel. The melted part contains numerous, fine cracks, oriented according to the direction of heat take-off, in many cases. Similarly – as demonstrated in article [1] – crevices arranged perpendicularly to the sample's surface and bubbles are present. It was determined that structures in the melted zone are varied. The structure of 18HGT steel contains low-carbon martensite, and 33H3MF steel contains a martensitic structure with traces of dendrites, which are absent in the structure of 38HMJ steel. The structure of the other steels, 40H and 45, is martensitic, finer, and martensite crystals are barely visible.*

*In the second part of studies, hardness distributions of nitrided layers of 33H3MF and 38HMJ steels were preliminarily evaluated. It was determined that they differ in hardening depth, and clearly, in near-surface hardness. The layer of 33H3MF steel has substantially higher hardness, probably due to the presence of the  $\epsilon$  phase.*

*Tests showed that laser treatment destroys the diffusion (surface) layer, causing bubbles to form, which are the cause of formation of surface discontinuities in certain cases, particularly in 33H3MF steel. Moreover, it was demonstrated that the hardness of the melted diffusion layer is approx. 400 HV0.1 units lower than the hardness of the nitrided layer, and the hardening zone of nitrided steel reaches deeper than the zone in steel that has only been heat-treated (Fig. 11).*

*The test results presented in the first part [1] and the second part (this one), include assessment of the effects of laser treatment (hardening with melting) of carbon steels and selected construc-*

pieniem) stali węglowych oraz wybranych stopowych stali konstrukcyjnych. W kolejnej, trzeciej części – obejmującej podobną problematykę – zaprezentowane będą wyniki badań nad obróbką laserową wysokostopowych stali narzędziowych do pracy na zimno i na gorąco [4].

## PODZIĘKOWANIA

Badania zrealizowano w ramach pracy własnej.

## LITERATURA

- [1] Berkowski L. 2018. „Wpływ stanu strukturalnego na skutki obróbki laserowej stali o różnym składzie chemicznym. Część I: Stale węglowe”. *Obróbka Plastyczna Metali* 29 (2): 127–138.
- [2] Staśkiewicz B. 2003. *Wpływ składu chemicznego wybranych stali konstrukcyjnych na skutki obróbki laserowej*. Praca dyplomowa. Poznań: Politechnika Poznańska.
- [3] Mąkosa P. 1999. *Obróbka laserowa stali konstrukcyjnych*. Praca dyplomowa. Poznań: Politechnika Poznańska.
- [4] Berkowski L., A. Żaboklicki. 1997. „Badania nad zastosowaniem techniki laserowej w obróbce roboczych powierzchni narzędzi kuźniczych”. *Obróbka Plastyczna Metali* 8 (3): 19–26.
- [5] Kusiński J. 2000 *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*. Kraków: Wydawnictwo Naukowe AKAPIT.

*tional alloy steels. In the next, third part – concerning similar subject matter – the results of studies on laser treatment of highly alloyed tool steels for cold and hot work will be presented [4].*

## ACKNOWLEDGEMENTS

*Research carried out as a part of the Metal Forming Institute Work Program.*

## REFERENCES

- [1] Berkowski L. 2018. „Influence of structural state on the effects of laser treatment of steel with different chemical compositions. Part I: Carbon steels”. *Obróbka Plastyczna Metali* 29 (2): 127–138.
- [2] Staśkiewicz B. 2003. *Wpływ składu chemicznego wybranych stali konstrukcyjnych na skutki obróbki laserowej*. Praca dyplomowa. Poznań: Politechnika Poznańska.
- [3] Mąkosa P. 1999. *Obróbka laserowa stali konstrukcyjnych*. Praca dyplomowa. Poznań: Politechnika Poznańska.
- [4] Berkowski L., A. Żaboklicki. 1997. „Badania nad zastosowaniem techniki laserowej w obróbce roboczych powierzchni narzędzi kuźniczych”. *Obróbka Plastyczna Metali* 8 (3): 19–26.
- [5] Kusiński J. 2000 *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*. Kraków: Wydawnictwo Naukowe AKAPIT.

