

Wpływ stanu strukturalnego na skutki obróbki laserowej stali o różnym składzie chemicznym. Część III: Stale narzędziowe

Influence of structural state on the effects of laser treatment of steel with different chemical compositions. Part III: Tool steels

Leopold Berkowski* 

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

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 20.08.2019

Recenzja: 10.10.2019

Akceptacja: 20.12.2019

ORCID iD

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

Streszczenie

Praca stanowi trzecią część większej całości, przyczynkowych badań w zakresie technologii laserowych stali o różnym składzie chemicznym. W pierwszych dwóch częściach omówiono skutki obróbki laserowej stali węglowych [1] i konstrukcyjnych stopowych [2]. W pierwszej części pracy wykazano, że wzrost zawartości węgla powoduje wyraźny wzrost twardości zahartowanej laserowo stali, wpływa na kształt warstwy oraz na charakter nieciągłości powstałych w strefie przetopionej. W badaniach prowadzonych w części drugiej potwierdzono znaczenie udziału węgla oraz oceniono wpływ składników stopowych na odpuszczalność stali. Wykazano ponadto, że obróbka laserowa niszczy warstwę dyfuzyjną, azotowaną. Badania, których wyniki zawiera niniejsza praca są owocem współpracy trzech ośrodków badawczych: Instytutu Fraunhofera IPT – Aachen, Instytutu Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej oraz Instytutu Obróbki Plastycznej w Poznaniu. Praca zawiera wyniki badań skutków obróbki laserowej stali NC11LV w stanie wyjściowym (wyżarzonym) i zahartowanym z różnej temperatury, także w warstwach położonych w różnej od siebie odległości. Ponadto praca zawiera ocenę jakości stopowania, z pomocą proszków o różnej zawartości składników stopowych stali przeznaczonej na narzędzia kuźnicze. Struktura wyjściowa stali NC11LV była martenzytyczna z niewielką ilością austenitu szczątkowego po hartowaniu z temperatury 1020°C oraz zawierającą austenit z niewielką ilością węglików po hartowaniu z temperatury 1150°C. Stwierdzono, że twardość stali w strefie przetopionej (około 500 HV_{0,1}) jest zbliżona do twardości stali NC11LV zahartowanej z temperatury 1150°C, a w strefie przejściowej rozrzut wyników pomiarów twardości jest nieregularny; bardziej w strefie hartowania wstępnego z temperatury 1020°C. Natomiast wpływ prędkości przemieszczania się wiązki światła lasera na stan strefy przypowierzchniowej próbki jest podobny jak w pracach [1–2]; wzrost prędkości powoduje zmniejszenie „parametrów” warstwy. Z badań wynika, że obróbka laserowa niezależnie od stanu wyjściowego (temperatury hartowania) nie powoduje korzystnych zmian warstwy wierzchniej stali NC11LV. Pozytywne rezultaty uzyskano natomiast w badaniach nad technologią stopowania narzędzi kuźniczych ze stali WCL. W próbkach stopowanych z pomocą proszku Mo/VC wyznaczono temperaturę odpuszczania stopowanych warstw (600°C), wyższą od temperatury odpuszczania stali szybko tnących. W badaniach nad doborem technologii oceniono piętnaście wariantów, w których zastosowano trzy grupy proszków o różnym składzie chemicznym WC/Co, WC/Co/Cr i Mo/VC w odpowiednim stosunku składników i wielkości dozowania. Przeprowadzono badania strukturalne otrzymanych warstw. Na pod-

* 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

stawie oceny właściwości uzyskanych podczas pomiarów twardości, własności mechanicznych (próby zginania i badań zmęczeniowych) oraz badań odporności na zużycie ścierne, wybrano warunki najlepszej technologii. Zastosowane w badaniach azotowanie – podobnie jak poprzednio – spowodowało pogorszenie jakości warstwy stopowanej.

Słowa kluczowe: stale narzędziowe, obróbka laserowa, stopowanie, warstwa wierzchnia, badanie struktury i właściwości warstwy

Article info

Received: 20.08.2019

Reviewed: 10.10.2019

Accepted: 20.12.2019

ORCID iD

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

Abstract

This article is the third in a series of studies concerning laser treatment technologies applied to steel with different chemical compositions. The effects of laser treatment of carbon steels [1] and constructional alloy steels [2] are discussed in the first two articles. In the first one, it is demonstrated that increasing carbon content results in clear growth of the hardness of laser-hardened steel, affects the shape of the layer and the character of discontinuities forming in the melted zone. In the second, the significance of carbon share was confirmed and the influence of alloying elements on temperability of steel was evaluated. Moreover, it was demonstrated that laser treatment destroys the diffusive, nitrided layer. The test results found here are the fruit of collaboration between three research centers: Fraunhofer Institute for Production Technology IPT – Aachen, Institute of Industrial Machinery and Transportation of Poznań University of Technology and the Metal Forming Institute in Poznań. This article contains results of laser treatment tests performed on NC11LV steel in its initial (annealed) state and hardened at different temperatures, including in layers situated at varying distances from one another. Furthermore, the article provides an evaluation of the quality of alloying by means of powders with varying contents of alloying ingredients of the steel intended for forging tools. The initial structure of NC11LV steel was martensitic with a small amount of residual austenite after hardening at 1020°C, and containing austenite with a small amount of carbides after hardening at 1150°C. It was determined that the hardness of steel in the melted zone (approx. 500 HV0.1) is similar to the hardness of NC11LV steel hardened at 1150°C, and in the transitional zone, the dispersion of hardness measurement results is irregular; more so in the initial hardening zone at 1020 °C. The influence of laser beam travel speed on the state of the specimen's near-surface layer is similar as in articles [1–2]; increasing travel speed reduces the layer's "parameters". Tests show that, regardless of the initial state (hardening temperature), laser treatment does not result in beneficial changes of the surface layer of NC11LV steel. However, positive results were obtained in tests of alloying technology for forging tools made of WCL steel. In specimens alloyed using Mo/VC powder, tempering temperature of the alloyed layers was determined (600°C), higher than the tempering temperature of high-speed tool steels. Fifteen variants were evaluated in tests on the selection of technology, in which three groups of powders with different chemical compositions were applied: WC/Co, WC/Co/Cr and Mo/VC, in the appropriate proportion of ingredients and doses. Structural tests of the layers obtained were carried out. Based on evaluation of properties obtained during hardness measurements, tests of mechanical properties (bending and fatigue tests) as well as abrasion resistance tests, the conditions of the best technology were selected. Nitriding applied in the tests caused the quality of the nitrided layer to deteriorate - similarly as before.

Keywords: tool steels, laser treatment, alloying, surface layer, layer's structure and properties test

1. WPROWADZENIE

Praca stanowi trzecią część badań nad oceną stanu strukturalnego stali o różnym składzie chemicznym w obszarze grzania laserowego, realizowanych w Instytucie Obróbki Plastycznej, w Instytucie Maszyn Roboczych i Transportu

1. INTRODUCTION

This article is the third in a series of studies on evaluation of the structural state of steels with different chemical compositions within the laser heating zone, conducted at the Metal Forming Institute, at the Institute of Industrial Machinery

Politechniki Poznańskiej, a w rozdziale 2.2 badań realizowanych w ramach współpracy międzynarodowej z Fraunhofer – Institut für Produktionstechnologie IPT w Aachen. W pierwszej części [1] oceniono skutki obróbki laserowej ośmiu stali węglowych o różnej zawartości węgla – od 0,04% C (stal E04J) do 0,8% C (stal N8E). Wykazano, że wzrost zawartości tego składnika powoduje wyraźny wzrost twardości zahartowanej laserowo stali, wpływa na kształt zahartowanej warstwy oraz na charakter nieciągłości powstałych w strefie przetopionej.

W części drugiej [2] przeprowadzono badania skutków obróbki laserowej pięciu stali konstrukcyjnych o różnym składzie chemicznym, w stanie zahartowanym i ulepszonym cieplnie (dodatkowe odpuszczanie), w tym dwie z tych stali (33H3MF i 38HMJ) w stanie przed i po azotowaniu. Badania wykazały, że – podobnie jak w pracy [1] – twardość stali po obróbce laserowej zależy przede wszystkim od zawartości węgla, a zmiany „parametrów” warstwy zachodzące pod wpływem zmiany prędkości przesuwania się wiązki lasera są podobne. Natomiast odporność na odpuszczające działanie temperatury zależy od zawartości składników stopowych w stali. Badanie skutków obróbki laserowej stali azotowanych wykazały, że taka obróbka niszczy warstwę dyfuzyjną, powodując powstawanie pęcherzy. Wykazano ponadto, że twardość przetopionej warstwy dyfuzyjnej jest znacznie mniejsza od twardości warstwy azotowanej, nieprzetopionej.

Niniejsza praca zawiera:

- wyniki badania skutków obróbki laserowej stali NC11LV o różnej strukturze, w stanie wyżarzonym i zahartowanym z różnej temperatury;
- ocenę jakości stopowania laserowego stali WCL z pomocą proszków o różnej zawartości składników stopowych.

W pierwszej części pracy próbowano wykorzystać obróbkę laserową do ulepszania powierzchni stali narzędziowej chromowej do pracy na zimno, w drugiej przytoczono fragment badań realizowanych wspólnie z Instytutem Fraunhofera, obejmujących ocenę różnych wariantów stopowania laserowego (z pomocą proszków) stali do pracy na gorąco oraz ocenę wpływu azotowania jonowego tak stopowanych warstw.

and Transportation of Poznań University of Technology, and the tests described in section 2.2 were performed in international collaboration with Fraunhofer – Institut für Produktionstechnologie IPT in Aachen. The first article [1] investigated the effects of laser treatment of eight carbon steels with varying carbon content – from 0.04 %C (E04J steel) to 0.8 %C (N8E steel). It was demonstrated that increasing carbon content results in clear growth of the hardness of laser-hardened steel, affects the shape of the layer and the character of discontinuities forming in the melted zone.

In the second article [2], laser treatment tests of five constructional steels with different chemical compositions, in hardened and heat-treated state (additional tempering), including two of these steels (33H3MF and 38HMJ) in pre- and post-nitrided state. Tests showed – similarly as in article [1] – that the hardness of steel after laser treatment depends, above all, on carbon content, and changes in layers’ “parameters” occurring under the influence of laser beam travel speed changes are similar. Meanwhile, resistance to the tempering influence of temperature depends on the content of alloying elements in the steel. Tests of the effects of laser treatment on nitrided steels showed that such treatment destroys the diffusive layer, causing bubbles to form. Furthermore, it was demonstrated that the hardness of the melted diffusive layer is substantially lower than the hardness of the nitrided, unmelted layer.

This article contains:

- *results of laser treatment tests of NC11LV steel with different structures, in annealed state and hardened states at different temperatures;*
- *evaluation of the quality of laser alloying of WCL steel by means of powders with different contents alloying elements.*

The first part of this article is an attempt to apply laser treatment for improvement of the surface of chromium cold work tool steel, the second cites a part of the tests conducted in collaboration with the Fraunhofer Institute, covering evaluation of different laser alloying variants (using powders) of hot-work tool steel, as well as evaluation of the influence of ion nitriding on layers alloyed in this manner.

2. WYNIKI BADAŃ

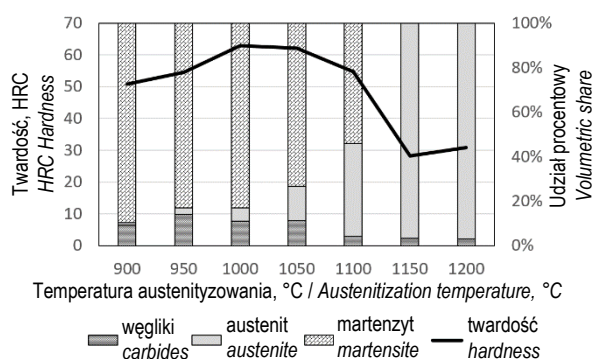
2.1. Badania stali narzędziowej do pracy na zimno NC11LV

Stan strukturalny stali przed obróbką laserową zależy od warunków wstępnej obróbki cieplnej. Stal NC11LV charakteryzuje się tym, że po jej zahartowaniu w wysokiej temperaturze możliwe jest otrzymanie prawie dwufazowej struktury – austenit szcążkowy i węgliki chromowe.

2. TEST RESULTS

2.2. Tests of NC11LV cold-work tool steel

The structural state of the steel prior to laser treatment depends on the conditions of preliminary heat treatment. NC11LV steel is characterized by the ability to obtain a nearly biphasic structure after hardening at high temperature – residual austenite and chromium carbides.

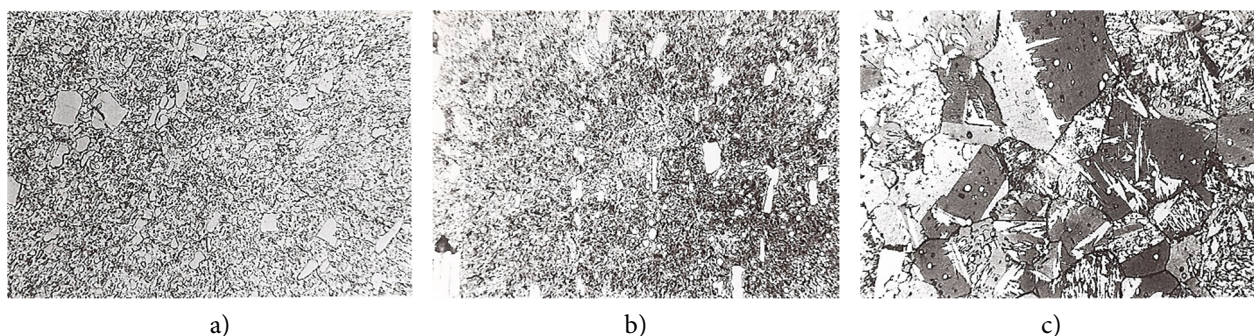


Rys. 1. Wpływ temperatury austenitzowania na skład fazowy oraz na twardość stali NC11LV

Fig. 1. Influence of austenitization temperature on the phasic structure and hardness of NC11LV steel

Na rys. 1 [3] przedstawiono zależność wpływu temperatury austenitzowania w ciągu 10 minut na skład fazowy określony metodą rentgenowską oraz na twardość stali NC11LV. Z rysunku wynika, że od temperatury austenitzowania 1150°C struktura składa się z dwóch faz, austenitu i węglików, których udział (około 2%) i twardość – od tej temperatury – prawie nie ulegają zmianie. Z rysunku wynika ponadto, że maksimum twardości zahartowanej stali mieści się w przedziale temperatury austenitzowania 1000–1060°C.

Fig. 1 [3] presents the dependency of the influence of austenitization temperature over 10 minutes on the phasic structure, determined using the X-ray method, and on the hardness of NC11LV steel. The figure shows that, starting from austenitization temperature 1150°C, the structure consists of two phases, austenite and carbides, the share (approx. 2%) and hardness of which remain nearly unchanged starting from this temperature. The figure also shows that the maximum of the hardened steel's hardness falls within the austenitization temperature interval: 1000–1060°C.



Rys. 2. Struktura stali NC11LV przed obróbką laserową w stanie: wyżarzonym (a), po zahartowaniu z temperatury 1020°C (b) i 1150°C (c); pow. 500x

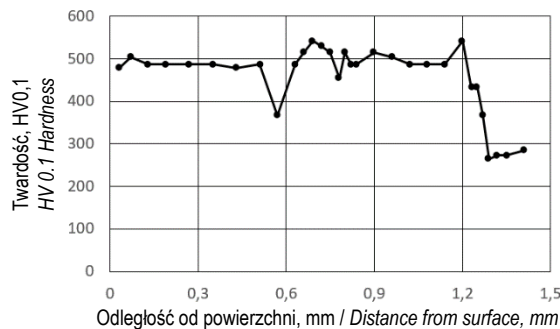
Fig. 2. Structure of NC11LV steel prior to laser treatment: annealed (a), hardened at 1020°C (b) and 1150°C (c); mag. 500x

Przedmiotem badań [4] były próbki, wałki o wymiarach $\phi 20 \times 100$ mm, w stanie wyżarzonym oraz zahartowanym w temperaturze 1020 i 1150°C. Zależność na rys. 1 dała podstawę wyboru takiej właśnie temperatury. Struktury stali NC11LV przed obróbką laserową pokazano na rys. 2. Skład chemiczny badanej stali w stanie dostawy, w postaci prętów kutych, o średnicy 24 mm, był następujący: 1,65% C; 0,27% Si; 0,30% MN; 0,029% P; 0,025% S; 11,9% Cr; 0,85% Cu; 0,90% Mo; 0,17% Ni; 0,020% Ti; 0,01% Al; 0,71% V.

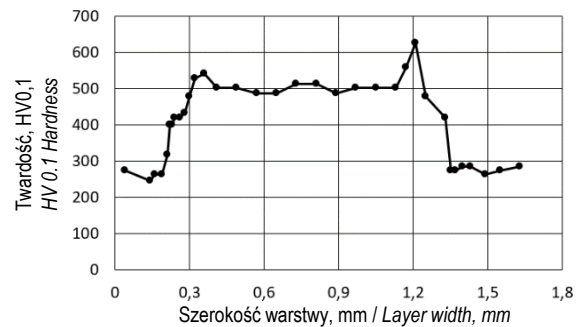
Obróbkę laserową (hartowanie laserowe z przetopieniem) stali przeprowadzono przy prędkościach przemieszczania się wiązki światła lasera 16, 24, 32, 64 i 96 mm/s; przy zmieniającym się czasie naświetlania, jak w pracach [1–2]. Zastosowano laser technologiczny firmy TRUMPF. Obróbkę przeprowadzono w Laboratorium Techniki Laserowej Politechniki Poznańskiej, stosując moc i szerokość wiązki światła lasera, odpowiednio – 1300 W i 1 mm. Skutki obróbki laserowej na próbkach wyżarzonych oraz zahartowanych w temperaturze 1020 i 1150°C oceniano metodą pomiaru twardości HV0,1 z pomocą twardościomierza ZWICK-3212; mierzono szerokość i głębokość ścieżki, strefy grzania laserowego, jak w pracach [1–2].

The test subjects [4] were specimens, cylinders with dimensions $\phi 20 \times 100$ mm, annealed as well as hardened at temperatures 1020 and 1150°C. The dependency in Fig. 1 provided the basis for choosing this temperature. Structures of NC11LV steel prior to laser treatment are shown in Fig. 2. The chemical composition of the tested steel in delivered state, in the form of forged rods 24 mm in diameter, was as follows: 1.65% C; 0.27% Si; 0.30% MN; 0.029% P; 0.025% S; 11.9% Cr; 0.85% Cu; 0.90% Mo; 0.17% Ni; 0.020% Ti; 0.01% Al; 0.71% V.

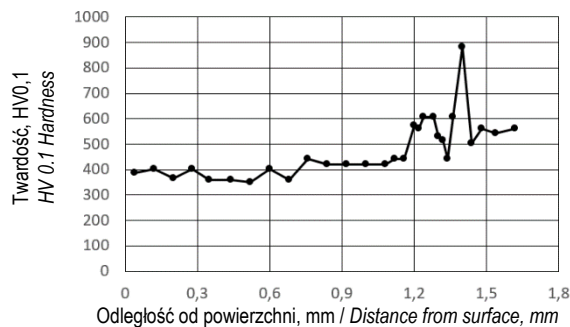
Laser treatment (laser hardening with melting) of steel was performed at laser beam travel speeds of 16, 24, 32, 64 and 96 mm/s; with a variable exposure time, as in article [1–2]. A technological laser from TRUMPF was applied. Laser treatment was carried out at the Laser Technologies Laboratory of Poznań University of Technology, using laser beam power and width of, respectively, 1300 W and 1 mm. The effects of laser treatment of specimens, annealed and hardened at temperatures 1020 and 1150°C, were evaluated by HV0.1 hardness measurement using a ZWICK-3212 hardness tester; the width and depth of the track and laser heat-affected zones were measured, as in articles [1–2].



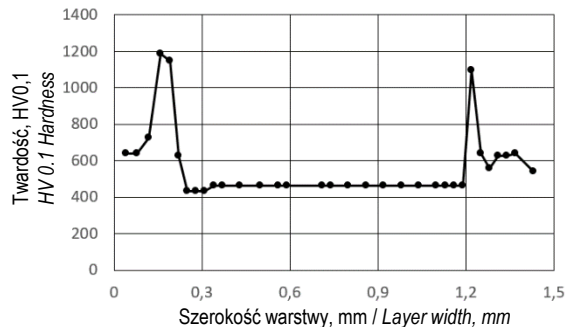
a)



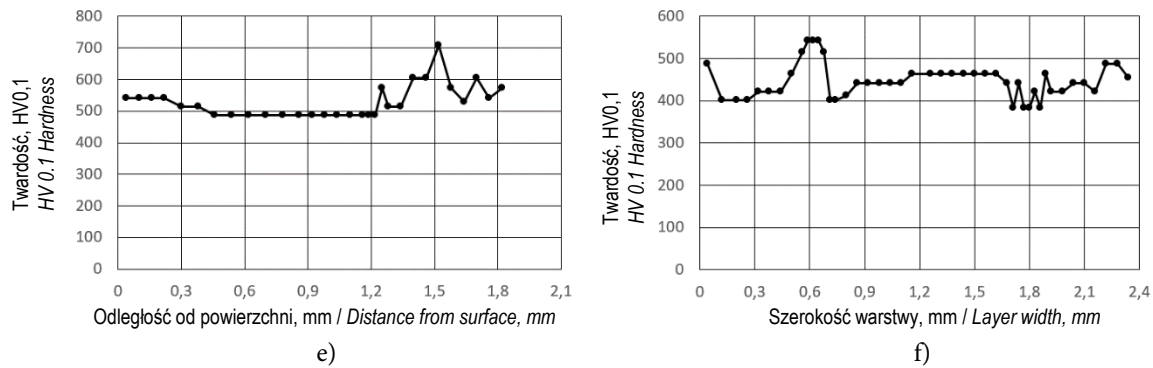
b)



c)



d)

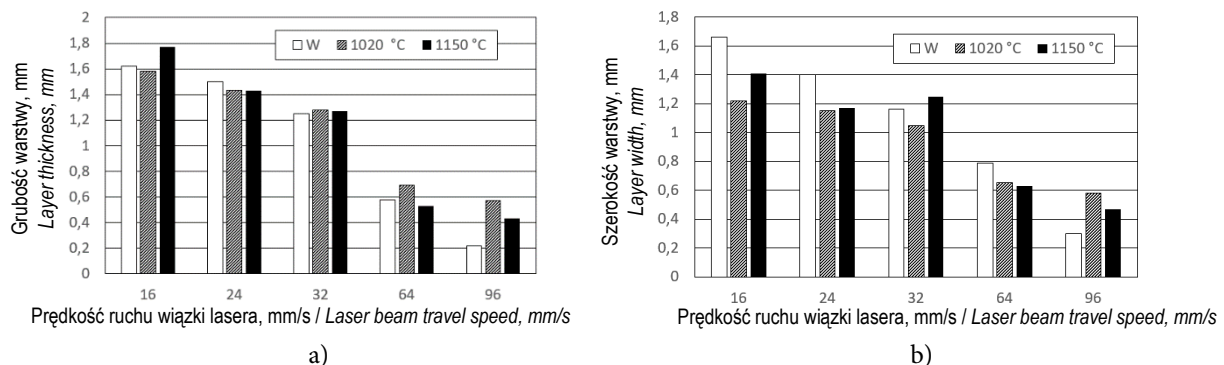


Rys. 3. Wymiary warstwy obróbjonej stali NC11LV: stan wyżarzony (a i b), po zahartowaniu z temperatury 1020°C (c i d) i 1150°C (e i f); parametry warstwy: grubość (a, c i e) oraz szerokość (b, d i f)

Fig. 3. Dimensions of treated layer of NC11LV steel: annealed (a and b), after hardening at 1020°C (c and d) and 1150°C (e and f). Layer parameters: thickness (a, c and e) and width (b, d and f)

Na rys.3 pokazano (przykładowo) profile twardości warstw stali NC11LV po hartowaniu laserowym z prędkością przemieszczania się wiązki światła lasera 32 mm/s: w stanie: wyżarzonym (a i d), zahartowanym z temperatury 1020°C (b i e) oraz z temperatury 1150°C (c i f). Z rysunku wynika, że twardość stali w strefie przetopionej (około 500 HV0,1) jest zbliżona do twardości stali zahartowanej z temperatury 1150°C, lecz niższa od twardości stali zahartowanej z temperatury 1020°C. Nieregularne zmiany twardości zaszły w strefie przejściowej, gdzie niezależnie od stanu strukturalnego stali przed obróbką laserową, w wąskim obszarze warstwy, występuje struktura zawierająca różne ilości martenzytu. Widać ponadto, że najwyraźniejsze różnice w strefie przejściowej występują w stali NC11LV zahartowanej wstępnie z temperatury 1020°C (rys. 3c).

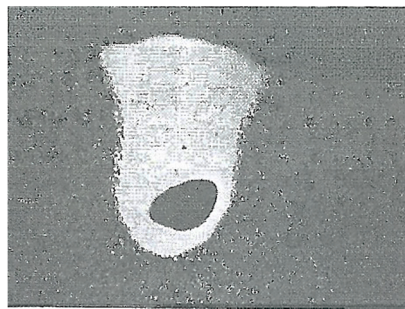
Fig. 3 shows (examples of) hardness profiles of NC11LV steel layers after laser treatment at laser beam travel speed 32 mm/s: annealed (a and d), hardened at 1020°C (b and e) and at 1150°C (c and f). The figure shows that the hardness of steel in the melted zone (approx. 500 HV0.1) is similar to the hardness of steel hardened at 1150°C but lower than the hardness of steel hardened at 1020°C. Irregular changes in hardness occurred in the transitional zone, where a structure containing different amounts of martensite formed in a narrow area of the layer, regardless of the steel's structural state prior to laser treatment. It can also be seen that the most distinct differences in the transitional zone occur in NC11LV steel preliminarily hardened at 1020°C (Fig. 3c).



Rys. 4. Wpływ prędkości przemieszczania się wiązki światła lasera na parametry warstwy obróbjonej laserowo stali NC11LV (w stanie wyżarzonym i po zahartowaniu z temperatury 1020°C i 1150°C): grubość (a) i szerokość w odległości 0,1 mm od powierzchni próbki (b)

Fig. 4. Influence of laser beam travel speed on the parameters of the laser-treated layer of NC11LV steel (annealed and hardened at temperatures 1020°C and 1150°C): thickness (a) and width at distance 0.1 mm from surface of specimen (b)

Na rys. 4 przedstawiono zmiany parametrów warstwy – grubości (a) i szerokości (b), mierzonej w odległości 0,1 mm od powierzchni próbki – w zależności od prędkości przemieszczania się wiązki światła lasera (czasu naświetlania powierzchni próbek). Z rysunku wynika – podobnie jak w pracach [1–2] – że wzrost prędkości przemieszczania się wiązki powoduje zmniejszenie obydwu „parametrów”, niezależnie od stanu strukturalnego (wyjściowego) próbki. Pewne nieregularności w ocenie szerokości warstwy (rys. 4b) wynikają prawdopodobnie z błędu pomiaru tego parametru.



Rys. 5. Pęcherz w warstwie zahartowanej laserowo stali NC11LV; prędkość przemieszczania się wiązki światła lasera 24 mm/s; pow. 50x

Fig. 5. Bubble in the laser-hardened layer of NC11LV steel; laser beam travel speed 24 mm/s; mag. 50x

Z badań wynika, że obróbka laserowa stali NC11LV, bez względu na stan wyjściowy materiału, nie powoduje korzystnych zmian warstwy wierzchniej. Struktura warstwy przetopionej zawiera duże ilości austenitu, bliskiej strukturze stali zahartowanej z temperatury 1150°C. Stąd stosunkowo mała twardość (ok. 450 HV0,1), oraz – podobnie jak w pracach [1–2] – zwłaszcza przy hartowaniu z małą prędkością poruszania się wiązki światła lasera, pojawiające się pęcherze. Na rys. 5 pokazano pęcherz w warstwie wierzchniej stali NC11LV (przed obróbką w stanie wyżarzonym) zahartowanej laserowo z prędkością poruszania się wiązki 24 mm/s.

2.2. Azotowanie stopowanej laserowo stali narzędziowej do pracy na gorąco WCL

Projekt pt. „Badania nad polepszeniem trwałości narzędzi do obróbki plastycznej”, realizowano w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu, wspólnie z Instytutem Fraunhofera IPT

Fig. 4 shows changes in the layer's parameters – thickness (a) and width (b), measured at a distance of 0.1 mm from the specimen's surface – depending on laser beam travel speed (exposure time of surface). The figure shows – similarly as in articles [1–2] – that increasing laser beam travel speed decreases both “parameters”, regardless of the specimen's structural (initial) state. Certain irregularities in evaluation of layer width (Fig. 4b) are probably due to the error of measurement of this parameter.

Tests show that laser treatment of NC11LV steel does not result in beneficial changes of the surface layer, regardless of the material's initial state. The structure of the melted layer contains large amounts of austenite, similar in structure to steel hardened at 1150°C. Hence the relatively low hardness (approx. 450 HV0.1), and similarly as in articles [1–2], the bubbles that formed, particularly during hardening at low laser beam travel speed. Fig. 5 shows a bubble in the surface layer of NC11LV steel (prior to treatment in annealed state), laser-hardened at beam travel speed 24 mm/s.

2.2. Nitriding of laser-alloyed WCL hot-work tool steel

The project, titled “Research on improving the lifetime of metal forming tools”, was realized at the Metal Forming Institute in Poznań in collaboration with the IPT Fraunhofer Institute in

w Aachen – Niemcy. Celem projektu [5] była technologia stopowania laserowego narzędzi do obróbki plastycznej na gorąco, ocena wpływu kombinacji udziału składników stopowych (mieszanki proszków stosowanych w tym procesie) oraz dodatkowo azotowania jonowego na właściwości warstwy wierzchniej stali WCL. Technologia taka jest technologią złożoną, co wymagało rozwiązania kilku problemów i uzyskania odpowiedzi na następujące pytania:

- Jaki jest wpływ stopowania laserowego i azotowania jonowego na strukturę i właściwości mechaniczne (w próbie zginania) stali WCL?
- Jak wpływa zmiana składu chemicznego warstwy wierzchniej oraz parametrów obróbki na ww. własności?
- Czy technologia złożona, wiążąca obróbkę laserową z azotowaniem jest lepsza od technologii składowych, stopowania laserowego i azotowania jonowego?

Program badań obejmował metaloznawczą ocenę skutków obróbki i weryfikację technologii poprzez ocenę trwałości narzędzi w toku ich eksploatacji. Materiałem badanym były krążki jednakowej grubości ze stali WCL, wycięte z pręta o średnicy 90 mm. Skład chemiczny stali był następujący: C – 0,37%; Si – 1,15%; Mn – 0,38%; P – 0,02%; S – 0,007%; Cu – 0,16%; Ni – 0,28%; Al – 0,087%; Cr – 6,2%; Mo- 1,32%; V – 0,42%; Ti – 0,0051%.

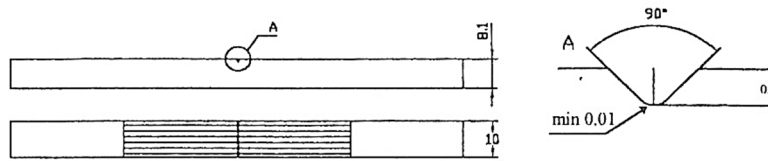
Obróbka cieplna w piecu z regulowaną atmosferą polegała na hartowaniu próbek z temperatury 1000°C i dwukrotnym odpuszczaniu w temperaturze 560 i 530°C, odpowiednio – 4 i 3 godziny. Twardość po takiej obróbce wynosiła około 54 HRC. Azotowanie jonowe przeprowadzono w piecu typu JONIMP produkcji krajowej, w atmosferze azotu i wodoru, w temperaturze 500°C. Czas wytrzymywania w atmosferze azotującej wynosił 6 godzin. Obróbkę laserową przeprowadzono w Instytucie Fraunhofera, stosując moc i szerokość wiązki światła lasera, odpowiednio – 2000 W i 0,8 mm, prędkość przemieszczania – 500 mm/min.

Aachen – Germany. The goal of the project [5] was laser-alloying technology for hot-work tools, evaluation of the influence of combinations of alloying element proportions (mixtures of powders used in this process), and additionally, of ion nitriding, on the properties of the surface layer of WCL steel. Such technology is complex, which required solving several problems and answering the following questions:

- *What is the influence of laser alloying and ion nitriding on the structure and mechanical properties (in bending test) of WCL steel?*
- *How do change of the surface layer's chemical composition and treatment parameters affect the above properties?*
- *Is complex technology combining laser treatment with nitriding better than the constituent technologies, laser alloying and ion nitriding?*

The test program covered metallographic evaluation of the effects of treatment and verification of technologies through evaluation of tool lifetime over the course of their operation. The tested material was WCL steel in the form of disks of identical thickness, cut from a rod 90 mm in diameter. The chemical composition of the steel was as follows: C – 0.37%; Si – 1.15%; Mn – 0.38%; P – 0.02%; S – 0.007%; Cu – 0.16%; Ni – 0.28%; Al – 0.087%; Cr – 6.2%; Mo- 1.32%; V – 0.42%; Ti – 0.0051%.

Heat treatment in a furnace with a regulated atmosphere involved hardening specimens at 1000°C and two-fold tempering at temperatures 560 and 530°C, for 4 and 3 hours, respectively. Hardness after such treatment was approx. 54 HRC. Ion nitriding was performed in a domestically manufactured JONIMP furnace, in a nitrogen and hydrogen atmosphere, at 500°C. The holding time in the nitriding atmosphere was 6 hours. Laser treatment was performed at the Fraunhofer Institute using beam power and width, accordingly – 2000 W and 0.8 mm, travel speed – 500 mm/min.



Rys. 6. Próbkę do badania własności mechanicznych

Fig. 6. Specimen for testing of mechanical properties

Próbki do badań właściwości mechanicznych, o przekroju 8,1 x 10 mm i długości 90 mm (rys. 6) wykonane były z krążka o takiej średnicy. Na rysunku zaznaczono obszar stopowania laserowego. By zlokalizować pęknięcie próbki, zastosowano karb o promieniu 0,01 mm i głębokości 0,1 mm. Badania obejmowały analizę metalograficzną oraz badania własności mechanicznych:

- twardość z pomocą twardościomierza firmy ZWICK-3212;
- próbę trójpunktowego zginania przy prędkości 500 mm/min i rozstawie podpór 40 mm;
- próbę niskocyklowego zmęczenia przy obciążeniu siłami 11; 10,5; 10 i 9,5 kN i rozstawie podpór 70 mm.

Część pracy realizowanej w INOP [5–6] obejmowała badania nad określeniem optymalnej temperatury odpuszczania stali stopowanej mieszaniną Mo-VC oraz badania nad doбором technologii stopowania laserowego narzędzi kuźniczych.

2.2.1. Badania nad doбором optymalnej temperatury odpuszczania stali stopowanej mieszaniną Mo-VC

W badaniach nad technologią stopowania mieszaniną Mo-VC optymalizowano „dawkę” mieszaniny oraz temperaturę odpuszczania po obróbce laserowej. Przewidywano znaczny wzrost twardości po odpuszczaniu w temperaturze przekraczającej temperaturę odpuszczania stali szybko tnących.

Na próbkach zahartowanej laserowo oraz na próbkach zahartowanych laserowo i odpuszczonych w temperaturze 560, 600 i 640°C w ciągu dwóch godzin, przeprowadzono badania twardości HV1 (uśrednione) w trzech strefach warstwy:

Specimens for tests of mechanical properties, 8.10x10 mm in cross-section and 90 mm in length (Fig. 6) were made from a disk of such a diameter. The laser alloying area is marked on the figure. To localize cracking of the specimen, a notch with a 0.01 mm radius and depth of 0.1 mm was applied. Tests covered metallographic analysis and tests of mechanical properties:

- *hardness using a ZWICK-3212 hardness tester,*
- *three-point bending test at speed 500 mm/min and support spacing 40 mm,*
- *low-cycle fatigue test under loads of 11; 10.5; 10 and 9.5 kN and support spacing 70 mm.*

Part of the work done at the Metal Forming Institute [5–6] involved research on determining the optimal tempering temperature of steel alloyed with a Mo-VC mixture as well as research on selection of laser alloying technology for forging tools.

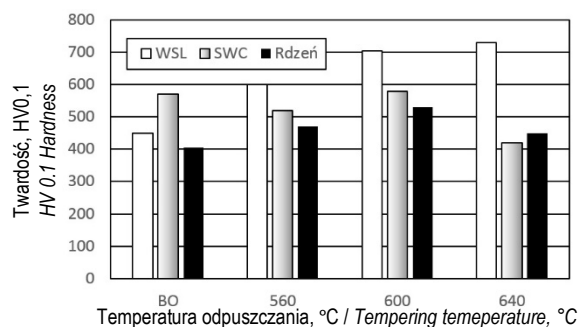
2.2.1. Research on selection of optimal tempering temperature for steel alloyed with Mo-VC mixture

In research on the technology of alloying with Mo-VC mixture, the “dose” of the mixture and tempering temperature following laser treatment were optimized. Substantial growth of hardness was predicted after tempering at temperatures exceeding the tempering temperatures of high-speed tool steels.

HV1 (averaged) hardness was measured in laser-hardened specimens and specimens that were laser-hardened and tempered at 560, 600 and 640 °C over two hours, in three zones of the layer: in the laser-alloyed layer, in the heat-affected

w warstwie stopowanej laserowo, w strefie wpływu ciepła oraz w rdzeniu próbki. Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresach.

zone, and in the core of the specimen. Results of measurements are shown in charts.



Rys. 7. Średnia twardość HV1 w różnych strefach próbek stopowanych laserowo mieszaniną Mo-VC w stanie zahartowanym oraz zahartowanym i odpuszczonym w temperaturze 560, 600 i 640°C; BO – bez odpuszczania, WSL – warstwa stopowana laserowo, SWC – strefa wpływu ciepła

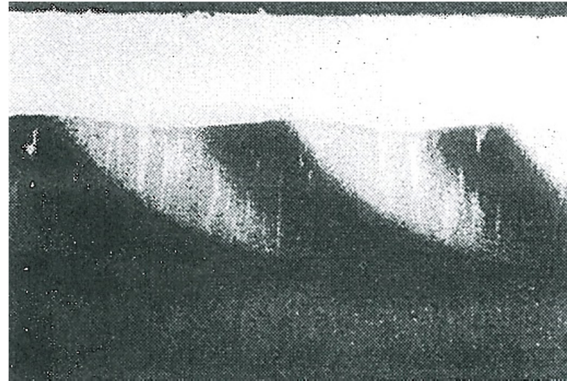
Fig. 7. Mean HV1 hardness in different zones of specimens laser-alloyed with Mo-VC mixture in hardened state and hardened and tempered at temperatures 560, 600 and 640°C; BO – no tempering, WSL – laser-alloyed layer, SWC – heat-affected zone.

Z rys. 7 wynika, że twardość warstwy stopowanej mieszaniną Mo-VC próbek ze stali WCL jest wyraźnie mniejsza od twardości w warstwie przejściowej, zahartowanej bez przetopienia. Odpuszczanie w temperaturze 560°C spowodowało wyraźny wzrost twardości w warstwie przetopionej. Jednakże największy wzrost twardości w tej strefie stwierdzono na próbce odpuszczonej w temperaturze 640°C, lecz zbyt duży spadek twardości w rdzeniu i w strefie wpływu ciepła spowodowały, że w dalszych badaniach zastosowano temperaturę odpuszczania 600°C, pozwalającą zachować dostateczną twardość, także w tych strefach.

Wyniki pomiarów twardości informują o zjawiskach zachodzących w strefach warstwy. Mała twardość stopowanej i zahartowanej strefy, a potem jej wzrost ze wzrostem temperatury odpuszczania w zakresie 560–640°C wskazuje na dużą zawartość austenitu szczytkowego, a największa twardość po odpuszczaniu w temperaturze 640°C, że odporność na odpuszczające działanie temperatury tej strefy jest większa od odporności stali szybko tnących, co zwiększa obszar zastosowania tej technologii na narzędzia do pracy na gorąco. Nieregularne zmiany twardości w strefie wpływu ciepła spowodowane są nakładaniem się dwóch frontów grzania.

Figure 7 shows that the hardness of the layer alloyed with Mo-VC mixture, in a specimen made of WCL steel, is clearly lower than the hardness in the transitional layer, hardened without melting. Tempering at 560°C resulted in a distinct increase in hardness in the melted layer. However the highest growth of hardness in this zone was noted in the specimen tempered at 640°C, but the excessive hardness drop in the core and in the heat-affected zone led to the application of 600°C as the tempering temperature in further tests, making it possible to preserve sufficient hardness in these zones also.

Hardness measurement results inform of the phenomena occurring in zones of the layer. The low hardness of the alloyed and hardened zone, followed by its growth as tempering temperature increased within the range of 560–640°C, indicates the high content of residual austenite, and the highest hardness after tempering at 640°C indicates that the resistance of this zone to the tempering action of temperature is greater than the resistance of high-speed tool steels, which widens the area of this technology's applications to hot-work tool steels. Irregular hardness changes in the heat-affected zone are caused by the overlap of two heating fronts.



Rys. 8. Struktura próbki stopowanej mieszaniną Mo/VC, nieodpuszczonej; pow. 50x

Fig. 8. Structure of specimen alloyed with Mo/VC mixture, not tempered; mag. 50x

Na rys. 8 widać białą, nietrawiącą się strefę laserowego stopowania oraz strefę wpływu ciepła z nakładającymi się frontami grzania. Różnice w trawieniu tego obszaru wynikają z odmiennych przemian fazowych zachodzący podczas grzania i chłodzenia, w miejscach o różnej temperaturze. Odpuszczanie spowodowało wyraźne zmniejszenie tych różnic.

2.2.2. Badania nad doбором odpowiedniej technologii

W badaniach zastosowano technologie stopowania przedstawione w tab. 1. Technologia oznaczona numerem 1 jest hartowaniem laserowym bez stopowania (bez udziału proszku). Do niej porównywano technologie stopowania laserowego (hartowanie z przetopieniem), przy zastosowaniu proszków o różnym składzie chemicznym. Proszek pierwszej grupy zawierał węgiel wolframu i kobalt w stosunku 88:12. W grupie WC/Co/Cr odpowiedni stosunek wynosił – 86:10:4, a w grupie Mo/VC – 2:1. Liczby poza oznaczeniami składników oznaczają krotność dozowania (działek) proszku. Celem porównania obróbki laserowej z tradycyjną obróbką cieplną, oceniano właściwości stali WCL obróbjonej cieplnie oraz obróbjonej cieplnie i azotanowanej jonowo.

Fig. 8 shows a white, non-etching zone of laser alloying and the heat-affected zone with overlapping heating fronts. Differences in the etching of this area arise from the differing phase transitions occurring during heating and cooling at sites with different temperatures. Tempering clearly reduced these differences.

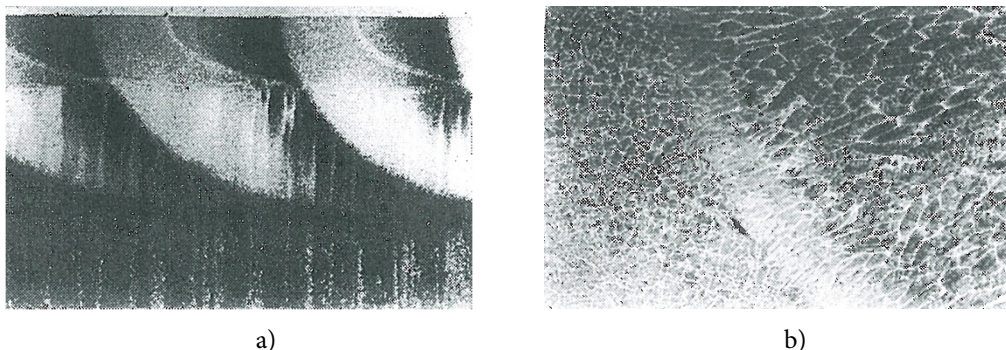
2.2.2. Research on selection of appropriate technology

The alloying technologies presented in Tab. 1 were applied in research. The technology designated number 1 is laser hardening without alloying (without the involvement of powder). It was compared to laser alloying technologies (hardening with melting) with the application of powders having different chemical compositions. The powder in the first group contained tungsten carbide and cobalt in the proportion 88:12. In the WC/Co/Cr group, the corresponding proportion was 86:10:4, and in the Mo/VC group – 2:1. Besides designations of ingredients, numbers signify the number of powder doses. To compare laser treatment with traditional heat treatment, the properties of heat-treated as well as heat-treated and ion nitrided WCL steel were evaluated.

Tab. 1. Technologie zastosowane w badaniach

Tab. 1. Technologies applied in research

Bez stopowania <i>Without alloying</i>	Stopowanie laserowe, rodzaj proszku / <i>Laser alloying, powder type</i>		
	WC/Co	WC/Co/Cr	Mo/VC
1) HL 14) HO ₁ 15) HO ₁ A	2) WC/Co 3 3) WC/Co 6 4) WC/Co 6 O ₂ 5) WC/Co 6 A 6) WC/Co 9	7) WC/Co/Cr 3 8) WC/Co/Cr 6 9) WC/Co/Cr 6 A 10) WC/Co/Cr 9 O ₂ 11) WC/Co/Cr 9 O ₂ A	12) Mo/VC O ₂ 13) Mo/VC O ₂ A
HL – hartowanie laserowe; O ₁ – odpuszczanie 560 i 530°C/odpowiednio 4 i 3 h; O ₂ – odpuszczanie 600°C/2h; A – azotowanie jonowe 500°C/6h HL – laser hardening; O ₁ – tempering 560 and 530°C/ 4 and 3 h accordingly; O ₂ – tempering 600°C/2h; A – ion nitriding 500°C/6h			

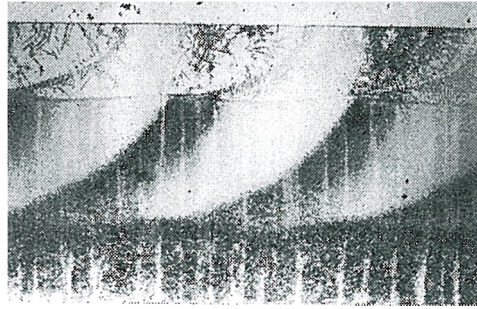


Rys. 9. Struktura warstwy próbki ze stali WCL zahartowanej laserowo, pow. 50x (a) i stopiona część tej warstwy (b) z widocznym frontem grzania; pow. 500x

Fig. 9. Structure of layer of laser-hardened WCL steel specimen, mag. 50x (a) and melted part of this layer (b) with visible heating front; mag. 500x

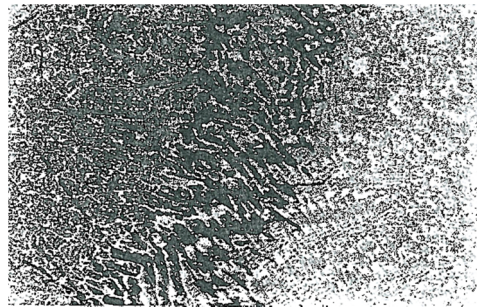
Na rys. 9a pokazano strukturę warstwy zahartowanej z przetopieniem stali WCL, bez stopowania. Zarówno strefa przetopiona, jak i strefa zahartowana bez przetopienia prezentują fronty wpływu ciepła przekazanego z wiązki światła lasera. Słabiej trawiące się warstwy to martenzyt ze znaczącą zawartością austenitu szczytkowego. Ponadto widoczne jest „gradientowe przejście” od tej strefy w kierunku, gdzie odpuszczające działanie temperatury było największe. Podobne skutki grzania laserowego można zauważyć w strefie zahartowanej bez przetopienia. Na rys. 9b pokazano struktury przetopionej strefy z widocznym fragmentem stykających się frontów grzania. Widać ponadto, że struktura jest miejscami dendrytyczna, ukierunkowana zgodnie z kierunkiem odprowadzenia ciepła.

Fig. 9a shows the structure of the WCL steel layer hardened with melting but without alloying. Both the melted zone and the zone hardened without melting present fronts of the effect of heat transmitted from the laser beam. The more weakly etched layers are martensite with substantial residual austenite content. Moreover, a “gradient transition” is visible from this zone in the direction in which the tempering action of temperature was greatest. Similar effects of laser heating can be observed in the zone hardened without melting. Fig. 9b shows the structure of the melted zone with a visible fragment of contacting heating fronts. It can also be seen that the structure is dendritic in some places, oriented according to the direction of heat take-off.



Rys. 10. Struktura próbki ze stali WCL stopowanej laserowo proszkiem WC/Co-3; pow. 50x

Fig. 10. Structure of WCL steel specimen, laser alloyed with WC/Co-3 powder; mag. 50x

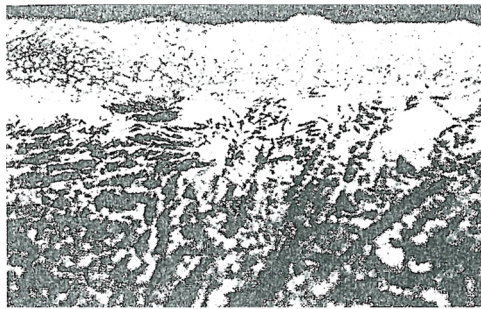


Rys. 11. Struktura warstwy stopowanej laserowo proszkiem WC/Co/Cr-6. Pow. 500x

Fig. 11. Structure of layer laser alloyed with WC/Co/Cr-6 powder. Mag. 500x

Na rys. 10 pokazano strukturę próbki stopowanej proszkiem WC/Co-3. Widoczne są trzy strefy strukturalne: stopowana, zahartowana bez przetopienia i strefa wpływu ciepła, o obniżonej twardości w stosunku do stanu wyjściowego (po obróbce cieplnej). Różnica polega na tym, że w strefie stopowanej pojawiła się dodatkowo (skutkiem wydzielania) łatwiej trawiąca się strefa wpływu ciepła. Wyraźniejsze różnice strukturalne w tym obszarze widać (przy powiększeniu 500x) na rys. 11, w warstwie próbki stopowanej laserowo proszkiem WC/Co/Cr-6. Pokazana struktura jest typowo dendrytyczna z widocznym frontem wpływu ciepła. Azotowanie jonowe podobnie obrabionych próbek spowodowało powstanie ziarnistej struktury. Strukturę warstwy stopowanej laserowo proszkiem WC/Co-6 i azotowanej jonowo pokazano na rys. 12. Badania wykazały ponadto, że warstwy azotowane przy powierzchni stopowanej mają mniejszą grubość od warstwy azotowanej bez stopowania.

Fig. 10 shows the structure of the specimen alloyed with WC/Co-3 powder. Three structural zones are visible: alloyed, hardened without melting, and heat-affected zone, with reduced hardness compared to the initial state (after heat treatment). The difference is that a more easily etched heat-affected zone additionally appeared (as a result of precipitation) in the alloyed zone. More distinct structural differences in this area can be seen (at 500x magnification) in Fig. 11, in the layer of the specimen laser-alloyed with WC/Co/Cr-6 powder. The structure shown is typically dendritic, with a visible front of the effect of heat. Ion nitriding of similarly treated specimens resulted in the formation of a grainy structure. The structure of the layer laser-alloyed with WC/Co-6 powder and ion nitrided is shown in fig. 12. Tests also showed that nitrided layers have lower thickness near the alloyed surface than layers nitrided without alloying.



Rys. 12. Struktura warstwy stopowanej laserowo według technologii WC/Co-6, azotowanej jonowo; pow. 500x

Fig. 12. Structure of the layer laser-alloyed according to WC/Co-6 technology, ion-nitrided; mag. 500x

Rentgenostrukturalna analiza fazowa wykazała, że w próbkach stopowanych mieszaniną WC/Co i WC/Co/Cr (oprócz martenzytu i austenitu) występują węgliki chromowe Cr_3C i Cr_3C_2 , a w warstwie stopowanej proszkiem Mo/VC także węgliki molibdenu i wanadu (MoC i V_2C). W próbkach azotowanych, oprócz azotków γ' i ϵ , w warstwach stopowanych mieszaniną proszków WC/Co/Cr stwierdzono niewielkie ilości azotków CrN lub Cr_2N , a stopowanych mieszaniną Mo/VC – azotki wanadu (VN) i molibdenu ($Mo_{16}N_7$). Badania wykazały zależność skutków azotowania jonowego od metody stopowania.

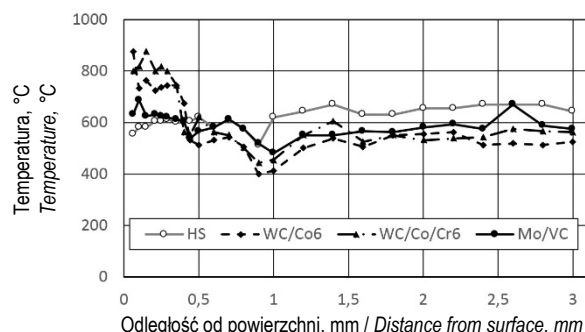
Jednakże o wyborze „optymalnej technologii stopowania” zadecydował – w pewnym stopniu – ranking określonych właściwości mechanicznych, zwłaszcza własności wytrzymałościowych i wynik badań odporności na ścieranie przeprowadzonych w Instytucie Fraunhofera w Aachen. Średnie wyniki pomiarów twardości, wyznaczonych w odległości 0,1 mm od powierzchni, wykazały, że najmniejszą twardość, zbliżoną do twardości rdzenia próbek po obróbce cieplnej, otrzymano po zahartowaniu laserowym bez stopowania; niewiele większą twardość wykazały próbki stopowane mieszaniną Mo/VC. Azotowanie wyraźnie zwiększyło twardość przy powierzchni; zależnie od rodzaju mieszaniny zastosowanej przy stopowaniu, przyrost twardości wynosił od 70 do 130 HV1. Stopowanie mieszaniną proszku WC/Co w niewielkim stopniu wpłynęło na twardość, natomiast stopowanie mieszaniną proszku WC/Co/Cr przy większej ilości proszku i azotowaniu spowodowało wyraźny wzrost twardości. Wykazano ponadto, że stopowanie laserowe spowodowało wzrost twardości na głębokości

X-ray structural phase analysis showed that chromium carbides Cr_3C and Cr_3C_2 are present in specimens alloyed with the WC/Co and WC/Co/Cr mixture (besides martensite and austenite), and molybdenum and vanadium carbides (MoC and V_2C) also occur in the layer alloyed with Mo/VC powder. In nitrided specimens, besides γ' and ϵ nitrides, small amounts of CrN or Cr_2N nitrides were observed in layers alloyed with the WC/Co/Cr powder mixture, and in those alloyed with Mo/VC mixture – vanadium nitrides (VN) and molybdenum nitrides ($Mo_{16}N_7$). Tests showed a dependency between the effects of ion nitriding and the alloying method.

However, the choice of “optimal alloying technology” was decided by – to a certain extent – the ranking of specific mechanical properties, particularly strength properties and the result of abrasion resistance tests performed at the Fraunhofer Institute in Aachen. Mean results of hardness measurements, determined at a distance 0.1 mm from the surface, showed that the lowest hardness, similar to the hardness of the core of specimens after heat treatment, was obtained after laser hardening without alloying; and specimens alloyed with Mo/VC mixture displayed a hardness that was not much greater. Nitriding clearly increased hardness near the surface; depending on the type of mixture applied during alloying, the hardness increase ranged from 70 to 130 HV1. Alloying with the WC/Co powder mixture affected hardness only slightly, while alloying with WC/Co/Cr powder mixture caused a substantial increase in hardness at higher powder doses and with nitriding. Moreover, it was demonstrated that laser alloying caused hardness to increase at a depth of 0.4 mm from the surface,

0,4 mm od powierzchni, przy czym ilość proszku stosowanego przy stopowaniu nie miała, w tym przypadku istotnego znaczenia, a odpuszczanie nie spowodowało istotnych zmian profilu twardości warstwy.

where the amount of powder used during alloying did not have great significance in this case, and tempering did not cause significant changes of the layer's hardness profile.

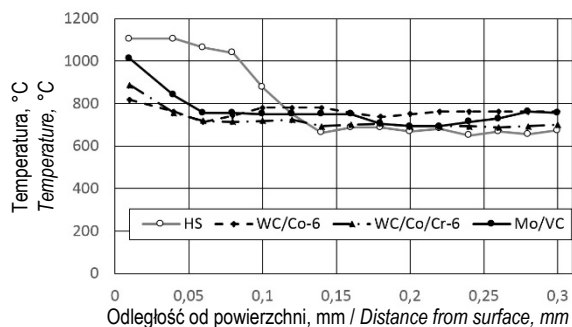


Rys. 13. Profile twardości próbek obrobionych laserowo: hartowanych laserowo (HS) oraz stopowanych proszkami WC/Co-6, WC/Co/Cr-6 i Mo/VC

Fig. 13. Hardness profiles of laser-treated specimens: laser-hardened (HS) and alloyed with WC/Co-6, WC/Co/Cr-6 and Mo/VC powders

Na rys. 13 porównano profile twardości „reprezentantów” każdej grupy stopowania. Z porównania wynika, że największą twardość przy powierzchni wykazała warstwa stopowana według technologii WC/Co/Cr, a najmniejszą według technologii Mo/VC. Hartowanie laserowe stali WCL bez stopowania spowodowało spadek twardości.

Fig. 13 compares the hardness profiles of “representatives” of each alloying group. The comparison shows that the layer alloyed according to WC/Co/Cr technology showed the highest hardness near the surface, and the one alloyed using Mo/VC technology showed the lowest hardness. Laser hardening of WCL steel without alloying resulted in a drop in hardness.



Rys. 14. Profile twardości próbek obrobionych laserowo i po azotowaniu: hartowanych laserowo (HS) oraz stopowanych proszkami WC/Co-6, WC/Co/CR-6 i MO/VC

Fig. 14. Hardness profiles of laser-treated and nitrided specimens: laser-hardened (HS) and alloyed with WC/Co-6, WC/Co/CR-6 and MO/VC powders

Pomiary twardości próbek azotowanych wykonano na odległości mniejszej: 0,3 mm od powierzchni (rys. 14). Z rysunku wynika istotny wpływ składu chemicznego warstwy na dyfuzję azotu; najmniejszy w warstwie stopowanej mieszaniną proszku Mo/VC. Na takiej warstwie – skutkiem azotowania – uzyskano wzrost twardości

Hardness measurements of nitrided specimens were performed at a lesser distance, 0.3 mm, from the surface (Fig. 14). The figure shows the significant influence of the layer's chemical composition on nitrogen diffusion; the lowest being in the layer alloyed with Mo/VC powder mixture. In such a layer – as a result of nitriding – an

o około 250 jednostek HV0,1. Badania wykazały ponadto, że warstwa azotowana próbki obrabianej cieplnie (bez stopowania) jest najgrubsza (około 0,1 mm), a stopowane laserowo mają mniejszą grubość. Wniosek – stopowanie opóźnia dyfuzję azotu.

Podstawą wyboru najlepszej technologii były badania własności mechanicznych w statycznej próbie zginania oraz w badaniach zmęczeniowych, niskocyklowe. Badania przeprowadzono na próbkach z naciętym karbem, jak na rys. 6, przy zastosowaniu maksymalnej prędkości traversu maszyny wytrzymałościowej, by zbliżyć się do warunków pracy narzędzi na prasie. Próbki pękały krucho, więc jako wskaźniki jakości materiału przyjęto siłę maksymalną, maksymalne ugięcie oraz tak zwaną ciągliwość, energię łamania odniesioną do przekroju próbki. Z badań wynikało, że najlepsze własności w tym badaniu miały próbki obrabiane cieplnie w sposób tradycyjny. Z próbek stopowanych laserowo wyróżniały się próbki obrabiane z dodatkiem mieszaniny proszków WC/Co/Cr. Azotowanie spowodowało wyraźne pogorszenie własności próbek.

W badaniach zmęczeniowych otrzymano duże rozrzuty wyników pomiarów. Dlatego jako ostateczny wskaźnik właściwości technologicznych, przy ustalonych warunkach badań, przyjęto średnią wartość cykli do zniszczenia próbek. Na podstawie takiego porównania stwierdzono najlepszy wynik dla technologii stopowania proszkiem WC/Co-6. Drugie miejsce zajmowała obróbka laserowa bez stopowania. Azotowanie – podobnie jak poprzednio – pogorszyło właściwości stali.

Tworząc pewnego rodzaju ranking właściwości (skutków badań) twardości, własności z próby zginania i próby zmęczeniowej, a także wyników badań odporności na ścieranie, starano się wybrać technologie obróbki narzędzi do plastycznego kształtowania na gorąco. Najskuteczniejsze według przyjętych kryteriów okazało się stopowanie mieszkanką WC/Co/Cr-6. Drugie miejsce zajęła technologia z tej samej grupy – WC/Co/Cr-9, trzecie – WC/Cr-6 z odpuszczaniem. Ostatnie miejsca zajęły technologie stopowania proszkiem Mo/VC.

increase of hardness by approx. 250 HV0.1 units was obtained. Tests also showed that the nitrided layer of the heat-treated specimen (without alloying) is the thickest (approx. 0.1 mm), and laser-alloyed layers have lower thickness. The conclusion being that alloying delays nitrogen diffusion.

The basis for selection of the best technology were tests of mechanical properties in static bending tests and in low-cycle fatigue tests. Tests were performed on notched specimens, as in Fig. 6, with the application of the maximum cross-bar speed on the strength tests; to approach the working conditions of tools on a press. Specimens underwent brittle fracture, so maximum force, maximum deflection, and so-called ductility, breaking energy divided by specimen cross-section, were adopted as the indicators of material quality. Tests showed that traditionally heat-treated specimens had the best properties in this regard. Among the laser-alloyed specimens, those treated with the addition of WC/Co/Cr powder mixture were distinct. Nitriding caused clear deterioration of specimens' properties.

Large dispersions of measurement results were obtained in fatigue tests. This is why the mean value of cycles until specimen destruction was adopted as the final indicator of technological properties, under the established test conditions. Based on this comparison, the best result was determined for alloying technology employing WC/Co-6 powder. Laser treatment without alloying took second place. Nitriding – similarly as before – worsened the steel's properties.

By creating a ranking of properties (test results), hardness, properties from bending and fatigue tests, as well as the results of abrasion resistance tests, an attempt was made to select technologies for treatment of tools for hot metal forming. Alloying with WC/Co/Cr-6 mixture turned out to be the most effective according to the adopted criteria. A technology from the same group – WC/Co/Cr-9 – took second place, and WC/Cr-6 with tempering took third. Alloying technologies employing Mo/VC powder came in the last places.

3. PODSUMOWANIE

Praca stanowi trzecią i ostatnią część badań nad obróbką laserową realizowanych w Instytucie Obróbki Plastycznej, przy współdziałaniu Instytutu Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej oraz Instytutu Fraunhofera IPT Aachen – Niemcy. W pierwszych dwóch częściach oceniano wpływ obróbki laserowej na właściwości stali węglowych [1] oraz stali stopowych o różnym składzie chemicznym [2]. Wykazano, że wzrost zawartości węgla – niezależnie od gatunku stali – powoduje wzrost twardości warstwy zahartowanej laserowo stali i wpływa na charakter nieciągłości powstałych w przetopionej strefie, a wzrost prędkości przemieszczania się wiązki światła lasera na budowę, powoduje zmniejszenie „parametrów” warstwy. Natomiast składniki stopowe wpływają na odpuszczalność takich warstw. Wykazano ponadto, że obróbka laserowa niszczy warstwę dyfuzyjną, azotowaną.

W niniejszej części oceniano wpływ obróbki laserowej na strukturę i właściwości stali narzędziowych – do pracy na zimno NC11LV oraz stali przeznaczonej na narzędzia kuźnicze (WCL). Stal NC11LV obrabiano laserowo w stanie wyżarzonym i zahartowanym w skrajnie różnej temperaturze austenitowania. Struktura stali po zahartowaniu z temperatury 1020°C była martenzytyczna z niewielką ilością austenitu szczątkowego, po zahartowaniu z temperatury 1150°C zawierała austenit z niewielką ilością węglików. Otrzymane po hartowaniu laserowym warstwy są podobne i w strefie przetopionej mają zbliżoną twardość (około 500 HV0,1), zbliżoną do twardości stali po zahartowaniu z temperatury 1150°C. Twardość w strefie przejściowej jest bardzo nieregularna, bardziej w próbkach zahartowanych wstępnie z temperatury 1020°C. Stwierdzono ponadto, że wzrost prędkości wiązki światła laserowego powoduje podobnie – jak w pracach [1–2] – zmniejszenie parametrów warstwy. Również w tym przypadku, przy malejącej prędkości przemieszczania się wiązki, pojawiły się pęcherze.

W badaniach nad stopowaniem narzędzi kuźniczych oceniano piętnaście wariantów technologicznych, w których zastosowano trzy grupy proszków o różnej zawartości składników stopo-

3. SUMMARY

This article is the third and last in a series of studies on laser treatment conducted at the Metal Forming Institute in collaboration with the Institute of Industrial Machinery and Transportation of Poznań University of Technology and the IPT Fraunhofer Institute in Aachen – Germany. The first two articles evaluate the influence of laser treatment on the properties of carbon steels [1] and alloy steels with different chemical compositions [2]. It was shown that an increase in carbon content – regardless of the grade of steel – causes the hardness of the laser-hardened steel layer to increase and affects the character of discontinuities forming in the melted zone, while increased beam travel speed affects the structure, reducing the layer’s “parameters”. Meanwhile, alloying elements affect the temperability of such layers. Moreover, it was demonstrated that laser treatment destroys the diffusive, nitrided layer.

This article evaluates the influence of laser treatment on the structure and properties of tool steels – cold-work NC11LV and steel intended for forging tools (WCL). NC11LV steel was laser-treated in annealed and hardened states at extremely different austenitization temperatures. The structure of the steel after hardening from 1020°C was martensitic with a small amount of residual austenite, and after hardening from 1150°C, it contained austenite with a low amount of carbides. Layers obtained after laser hardening are similar and have similar hardness in the melted layer (approx. 500 HV0.1), which is close to the hardness of the steel after hardening from 1150°C. Hardness in the transitional zone is more irregular, more so in specimens preliminarily hardened from 1020°C. Furthermore, it was determined that an increase of laser beam travel speed results in the reduction of layer parameters, just as in articles [1 and 2]. Also in this case, bubbles formed at decreasing beam travel speed.

Fifteen technological variants were evaluated in research on alloying of forging tools, in which three groups of powders with varying contents of alloying ingredients were applied: WC/Co, WC/Co/Cr and Mo/VC in the appropriate propor-

wych: WC/Co, WC/Co/Cr i Mo/VC w odpowiednim stosunku i różnej wielkości porcji dozowania. Oprócz stopowania zastosowano hartowanie laserowe stali WCL bez stopowania celem porównania skutków ww. technologii. W niektórych wariantach zastosowano dodatkowe odpuszczanie i azotowanie jonowe.

Skutki obróbki laserowej to nakładające się fronty działania ciepła i struktura warstwowa; przy powierzchni strefa przetopiona o zmieniającym się skutkiem stopowania składzie chemicznym oraz strefa wpływu ciepła o zmiennej strukturze i różnej twardości. Całość warstwy z „gradientowym” wpływem temperatury odpuszczania. Porównanie wyników pomiarów twardości, własności mechanicznych i odporności na ścieranie pozwoliło wybrać najlepszą technologię stopowania narzędzi kuźniczych: stopowanie mieszaniną WC/Co/Cr-6. Na drugim miejscu znalazła się technologia z tym samym układem składników, lecz o większej dawce – 9. Najlepsze własności w badaniach zmęczeniowych wykazały próbki stopowane proszkiem WC/Co oraz próbki obrobione laserowo bez udziału składników stopowych. Azotowanie jonowe spowodowało pogorszenie właściwości stopowanych warstw, co potwierdziły badania trwałości narzędzi (wkładek) do kucia kołków stosowanych do stabilizacji szyn. Podczas badania trwałości narzędzi potwierdzono wyniki rankingu; uzyskano następujące, średnie ilości odkutych haków: stopowanie mieszaniną WC/Co/Cr – 56 300 odkuwek, WC/Co – 46 050 odkuwek, a WC/Co z dodatkowym azotowaniem jonowym – 38 275 odkuwek, z czego dwie matryce wycofano na skutek pojawienia się pęknięć. Trwałość pozostałych dwóch matryc azotowanych jonowo była największa i wynosiła 57 350 odkuwek. Narzędziami obrobionymi tradycyjnie i azotowanymi jonowo odkuto średnio 45 470 haków.

Badaniami trwałości narzędzi – doświadczenia w INOP – zakończono prace nad doskonaleniem technologii stali narzędziowych stosowanych na narzędzia do obróbki plastycznej. Podczas realizacji projektów podjęto badania serii narzędzi do obróbki plastycznej na gorąco w warunkach przemysłowych, lecz wyniki tych badań nie były zadowalające.

tions and different doses. Besides alloying, laser hardening of WCL steel without alloying was applied for comparison with the effects of the aforementioned technologies. In certain variants, additional tempering and ion nitriding were applied.

The effects of laser treatment are overlapping fronts of heat action and a layered structure; near the surface – melted zone with changing chemical composition as a result of alloying and heat-affected zone of varying structure and hardness. The whole layer has a “gradient” influence of tempering temperature. Comparison of the results of hardness measurements, mechanical properties and abrasion resistance made it possible to select the best technology for alloying forging tools: alloying with WC/Co/Cr-6 mixture. The technology with the same configuration of ingredients but with a higher dose – 9, came in second place. Specimens alloyed with WC/Co powder and specimens laser-treated without the involvement of alloying elements showed the best properties in fatigue tests. Ion nitriding caused deterioration of the properties of alloyed layers, as confirmed by tests of the lifetime of tools (inserts) for forging of pegs used for rail stabilization. The results of the ranking were confirmed during the lifetime test; the following mean amounts of forged hooks were obtained: alloying with WC/Co/Cr mixture – 56,300 forgings, WC/Co – 46,050 forgings, and WC/Co with additional ion nitriding – 38,275 forgings, of which two were withdrawn due to the appearance of cracks. The lifetimes of the remaining two ion-nitrided dies were the highest, at 57,350 forgings. 45,470 hooks were forged, on average, by tools traditionally treated and ion-nitrided.

Tool lifetime tests – experiments at the Metal Forming Institute – concluded work on the improvement of tool steel technologies applied to metal forming tools. A series of metal forming tools were tested in hot work under industrial conditions over the course of realization of projects, but the results of these tests were not satisfactory.

PODZIĘKOWANIA

Pierwszą część badań (badanie stali narzędziowej do pracy na zimno NC11LV) zrealizowano w ramach pracy własnej; drugą – w ramach projektu „Untersuchungen zur Standmengenverbesserung von Umformwerkzeugen” (koordynator projektu: Fraunhofer Mangement-Gesellschaft mbH, München).

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] Berkowski L. 2018. „Wpływ stanu strukturalnego na skutki obróbki laserowej stali o różnym składzie chemicznym. Część III: Stale konstrukcyjne stopowe”. *Obróbka Plastyczna Metali* 29 (2): 127–138.
- [3] Berkowski L. i in. 1999. Projekt badawczy nr 1012/T08C/96/11 – Podstawy technologii wytwarzania narzędzi z wykorzystaniem dyfuzji azotu w odkształconych, wysokochromowych stalach ledeburytycznych. Poznań: Instytut Obróbki Plastycznej.
- [4] Berkowski L. 2000. „Badania nad doborem technologii obróbki narzędzi z ledeburytycznej stali chromowej”. *Obróbka Plastyczna Metali* 11 (3): 45–55.
- [5] Ograbek M. 1999: „Obróbka laserowa stali narzędziowych”. Praca dyplomowa. Poznań: Politechnika Poznańska.
- [6] Berkowski L. 1996. Projekt badawczy Untersuchungen von Umformwerkzeugen. Part II: Investigation on the improvement of plastic working tool durability. Aachen–Poznań, June 1996.
- [7] Berkowski L. 1997. „Właściwości warstw stopowanych laserowo na stali narzędziowej”. WCL Seminarium pt. Technika laserowa w obróbce powierzchniowej narzędzi kuźniczych. Poznań–Aachen 26–27 maja 1997, 49–71.

ACKNOWLEDGEMENTS

First part of the research (tests of NC11LV cold-work tool steel steel) was carried out as a part of the Metal Forming Institute Work Programme; the second part was carried out within the project „Untersuchungen zur Standmengenverbesserung von Umformwerkzeugen” (project coordinator: Fraunhofer Mangement-Gesellschaft mbH, München).

REFERENCES

- [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] Berkowski L. 2018. „Wpływ stanu strukturalnego na skutki obróbki laserowej stali o różnym składzie chemicznym. Część III: Stale konstrukcyjne stopowe”. *Obróbka Plastyczna Metali* 29 (2): 127–138.
- [3] Berkowski L. i in. 1999. Projekt badawczy nr 1012/T08C/96/11 – Podstawy technologii wytwarzania narzędzi z wykorzystaniem dyfuzji azotu w odkształconych, wysokochromowych stalach ledeburytycznych. Poznań: Instytut Obróbki Plastycznej.
- [4] Berkowski L. 2000. „Badania nad doborem technologii obróbki narzędzi z ledeburytycznej stali chromowej”. *Obróbka Plastyczna Metali* 11 (3): 45–55.
- [5] Ograbek M. 1999: „Obróbka laserowa stali narzędziowych”. Praca dyplomowa. Poznań: Politechnika Poznańska.
- [6] Berkowski L. 1996. Projekt badawczy Untersuchungen von Umformwerkzeugen. Part II: Investigation on the improvement of plastic working tool durability. Aachen–Poznań, June 1996.
- [7] Berkowski L. 1997. „Właściwości warstw stopowanych laserowo na stali narzędziowej”. WCL Seminarium pt. Technika laserowa w obróbce powierzchniowej narzędzi kuźniczych. Poznań–Aachen 26–27 maja 1997, 49–71.

