Prof. dr hab. inż. Leopold BERKOWSKI, dr inż. Jacek BOROWSKI
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań
Dr inż. Zbigniew RYBAK
Politechnika Poznańska, Poznań

Wpływ struktury na skutki azotowania chromowych stali ledeburytycznych

Część VII. Azotowanie jonowe stali NC11LV nagniatanej po zahartowaniu z wysokiej temperatury, na austenit

The influence of structure on the results of nitriding of ledeburitic chromium steels

Part VII. Ion nitriding of NC11LV steel burnished after hardening from high temperature to austenitic structure

Streszczenie

W artykule przedstawiono siódmą część wyników badań przeprowadzonych w ramach projektu nr 1012/T08C/96/11 finansowanego przez KBN [8], która obejmuje ocenę wpływu obróbki plastycznej powierzchniowej na skutki azotowania jonowego stali NC11LV (D2), o austenitycznej osnowie, po zahartowaniu z wysokiej temperatury 1150 ^{o}C. Próbki nagniatano diamentem z siłą 150 i 400 N, a następnie azotowano w temperaturze 400, 440 i 480 ^{o}C w ciągu czterech godzin. Badania wykazały, że odkształcenie przyspiesza dyfuzję azotu podczas azotowania w niższej temperaturze 400 i 440 ^{o}C, azotowanie w temperaturze 480 ^{o}C niszczy efekt umocnienia zgniotowego. Badania wykazały ponadto, że struktura wpływa na skutki nagniatania stali NC11LV. Wpływ nagniatania na charakterystyki materiałowe stali o austenitycznej osnowie jest większy aniżeli na charakterystyki stali o strukturze martenzytycznej.

Abstract

The paper presents the seventh part of the results of investigation carried out within project no. 1012/T08C/96/11 financed by KBN[8] including evaluation of the influence of surface metal forming on the results of ion nitriding of NC11LV (D2) steel with austenitic matrix after hardening from high temperature (1150 ^{o}C). Specimens were burnished by means of a diamond with a force of 150 N and 400 N and then nitrided at the temperature of 400, 440 and 480 ^{o}C for four hours. The investigation has shown that deformation accelerates the diffusion of nitrogen during nitriding at the lower temperature of 400 and 440 ^{o}C; nitriding at 480 ^{o}C destroys the burnishing effect. The investigation has also shown that the structure influences the results of burnishing NC11LV steel. The influence of burnishing on the material characteristics of austenitic matrix steel is larger than its influence on the characteristics of steel with martensitic structure.

Słowa kluczowe: chromowa stal narzędziowa, nagniatanie, azotowanie, austenit

Key words: *chromium tool steel, burnishing, nitriding, austenite*

1. WSTĘP

W pracy [1] opisano wyniki badań stali NC11LV nagniatanej, po zahartowaniu na martenzyt. W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki badań stali zahartowanej z wysokiej temperatury 1150 ^{o}C, celem otrzymania pseudodwufazowej struktury, zawierającej przede wszystkim austenit szczątkowy i węgliki.

1. INTRODUCTION

The paper [1] describes the results of examination of NC11LV steel burnished after hardening to martensite. This work presents the results of examination of steel hardened from high temperature of 1150 ^{o}C in order to obtain a pseudo-duplex structure containing, first of all, retained austenite and carbides.

Odkształcanie powierzchniowe próbek o austenitycznej osnowie, a więc o znacznie większej podatności do odkształceń plastycznych, dawało nadzieję na uzyskanie interesujących wyników. Dzięki przeprowadzeniu tych badań można było ocenić i porównać dwa skrajne stany strukturalne materiału, różniące się istotnie właściwościami.

Jednakże wstępne próby spęczania stali o austenitycznej osnowie sygnalizowały trudności. Stal zahartowana z wysokiej temperatury silnie się umacniała, a próbki pękały już przy niewielkim gniocie. To wykluczyło możliwość stosowania obróbki plastycznej objętościowej metodą spęczania stali NC11LV o austenitycznej osnowie. Zastosowana metoda nagniatania pozwoliła na przeprowadzenie badań i ocenę skutków nagniatania. Badania dały pozytywne rezultaty [2].

Podczas nagniatania diamentowym nagniatakiem z siłą 400 N uzyskano umocnienie warstwy wierzchniej przekraczające utwardzenie uzyskane po zahartowaniu stali na martenzyt. Twardość warstwy przy powierzchni przekraczała wartość 1000 HV0,1, a po odpuszczeniu w warunkach azotowania jonowego uległa niewielkiemu obniżeniu; twardość próbki nagniatanej z siłą 400 N i odpuszczonej w temperaturze 480 ^{o}C przekraczała nadal 800 HV0,1. Uzyskanie dużego, trwałego umocnienia austenitycznej osnowy [3] poszerza możliwości zastosowania stali NC11LV. Możliwa jest produkcja wyrobów utwardzonych powierzchniowo z ciągliwym rdzeniem lub utwardzanych podczas eksploatacji, podobnie jak to ma miejsce przy wyrobach ze stali Hadfielda.

Opisane w artykule badania miały wykazać, jaki jest wpływ umocnienia na właściwości warstwy wierzchniej stali po azotowaniu jonowym i dać odpowiedź na pytania:

- Czy umocnienie odkształceniowe austenitycznej osnowy stali NC11LV sprzyja dyfuzji azotu?
- Jaki jest wpływ temperatury azotowania jonowego na osłabienie warstwy wierzchniej, uprzednio nagniatanej?

Surface deformation of samples with austenitic matrix and, consequently, ones with much higher plastic deformability allowed for expectation of interesting results. The investigation has enabled two extreme structural states of the material , significantly differing in properties, to be compared.

However, initial trials of upsetting steel with austenitic matrix, gave hints of difficulties. Steel hardened from high temperature got strongly work hardened and the samples cracked at a not too large draft. This has prevented the application of volumetric forming of the NC11LV steel with austenitic matrix by the method of upsetting. The method of burnishing has allowed for performing the investigation and evaluation of the effects of burnishing. The investigation has rendered positive results[2].

In burnishing with a diamond burnisher with a force of 400 N, work hardening of the surface layer has been obtained in excess of that obtained after the steel had been hardened to martensite. The hardness of the surface layer exceeded the value of 1000 HV0.1 and got slightly reduced after tempering in the conditions of ion nitriding; the hardness of a sample burnished with a force of 400 N and tempered at 480 ^{o}C was still above 800 HV0.1. The achievement of high, permanent work hardening of austenitic matrix [3] extends the possibilities of application of the NC11LV steel. It is possible to manufacture surface hardened products with ductile roots, as well as ones hardened in exploitation as is the case in products made of Hadfield steel.

The investigation described in the paper was to show what is the influence of work hardening on the properties of steel surface layer after ion nitriding and to give answers to the following questions:

- *Is deformation hardening of austenitic matrix of NC11LV steel advantageous for the diffusion of nitrogen?*
- *What is the influence of ion nitriding temperature on weakening of the surface layer that had been burnished?*

2. MATERIAŁ BADANY I OBRÓBKA PRÓBEK

Materiałem badanym była stal NC11LV - jak w pracy [1] – o następującym składzie chemicznym, w %:

C - 1,65; Cr - 11,9; Si - 0,27; Mn - 0,30;
P - 0,029; S - 0,025; Mo - 0,9; V - 0 ,71.

Próbki zahartowano z temperatury 1150 ^{o}C, wybranej na podstawie badań [4] wpływu warunków austenityzowania (czasu i temperatury) na strukturę i własności stali. Czas austenityzowania wynosił 10 minut. Takie warunki obróbki gwarantowały otrzymanie pseudodwufazowej struktury, złożonej z węglików, austenitu szczątkowego i śladowej zawartości fazy α.

Nagniatanie – podobnie jak w pracy [1] – wykonano z pomocą diamentowego nagniatak, przy obciążeniu 150 i 400 N. Pozostałe parametry obróbki były następujące: posuw p = 0,025 mm/obr oraz liczba obrotów n = 460 obr/min. Celem porównania grubości warstwy dyfuzyjnej, próbki nagniatano z dwóch stron, do połowy średnicy.

Azotowanie jonowe przeprowadzono w piecu typu JONIMP produkcji krajowej, w temperaturze 400, 440 i 480 ^{o}C w ciągu 4 godzin. Z uwagi na mniejszą odpuszczalność stali NC11LV temperatura azotowania była niższa od zalecanej dla stali szybkotnącej i stali do pracy na gorąco.

3. WYNIKI BADAŃ

Podobnie jak w pracy [1], skutki azotowania oceniano metodą pomiaru twardości oraz z pomocą mikroskopu świetlnego i elektronowego, skaningowego. Zawartość azotu w przypowierzchniowych strefach próbki wyznaczono z pomocą mikroanalizy rentgenowskiej, metodą liniową, wyznaczając azot w odstępach, co 5 μm.

2. MATERIAL UNDER INVESTIGATION AND TREATMENT OF SAMPLES

The material under investigation was NC11LV steel – as in paper [1] – with the following chemical composition (%):

C - 1.65; Cr - 11.9; Si - 0.27; Mn - 0.30;
P - 0.029; S - 0.025; Mo - 0.9; V - 0.71.

The samples were hardened from the temperature of 1150 ^{o}C selected on the basis of investigation of the influence of austenitizing conditions (time and temperature) on the steel structure and properties [4]. Austenitizing time was 10 minutes. Such conditions of treatment guaranteed obtaining pseudo-duplex structure consisting of carbides, retained austenite and traces of phase α.

Burnishing – similar to that in paper [1] – has been performed by means of a diamond burnisher with the loads of 150 and 400 N. The other parameters of the treatment were as follows: travel, p = 0.025 mm/rev. and the speed, n = 460 rpm. In order to compare the thickness of the diffusion layer, the samples were burnished on two sides, up to a half of the diameter.

Ion nitriding has been performed in a furnace type JONIMP, made in Poland, at the temperature of 400, 440 and 480 ^{o}C for four hours. Due to lower temperability of NC11LV steel, the nitriding temperature was lower than that recommended for high-speed steel and hot work steel.

3. INVESTIGATION RESULTS

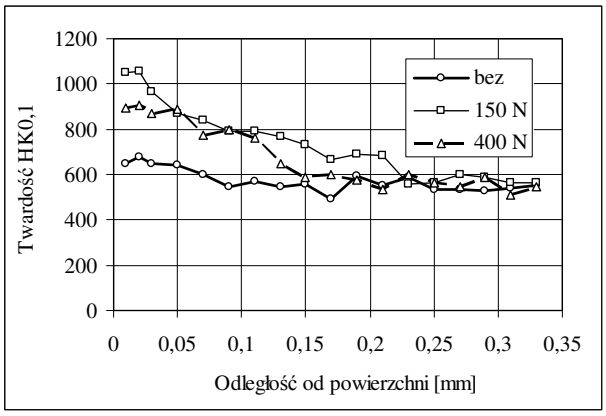
Like in work [1], the effects of nitriding have been evaluated by the method of hardness measurement and by means of an optical and an electronic scanning microscope. The nitrogen content in the surface zones of samples was determined by means of x-ray microanalysis, by the linear method determining nitrogen at 5 μm intervals.

3.1. Azotowanie próbek o austenitycznej osnowie

Profile rozkładu twardości próbek ze stali NC11LV o osnowie austenitycznej, azotowanych jonowo w różnej temperaturze, pokazano na rysunkach 1-3, a na rysunkach 5-7 odpowiednie zmiany zawartości azotu w warstwie wierzchniej stali. Z porównania rozkładów twardości przedstawionych na rys. 1, próbek azotowanych w niższej temperaturze (400 ^{o}C) wynika, że nagniatanie – niezależnie od wielkości nacisku – powoduje nieznaczne zmiany twardości. Niewielkie utwardzenie warstwy stwierdzono na próbkach poddanych powierzchniowej obróbce plastycznej. Z porównania zawartości azotu w warstwie wierzchniej wynika jednak (rys. 5), że odkształcenie plastyczne intensyfikuje dyfuzję azotu w tej temperaturze. Podobne tendencje zauważono na próbce azotowanej w temperaturze 440 ^{o}C (rys. 6), choć rozkłady twardości próbek azotowanych w tej temperaturze (rys. 2) były prawie jednakowe. Stwierdzono więc, że wzrost twardości próbek spowodowany azotowaniem nie równoważy spadku twardości spowodowanego odpuszczającym działaniem temperatury.

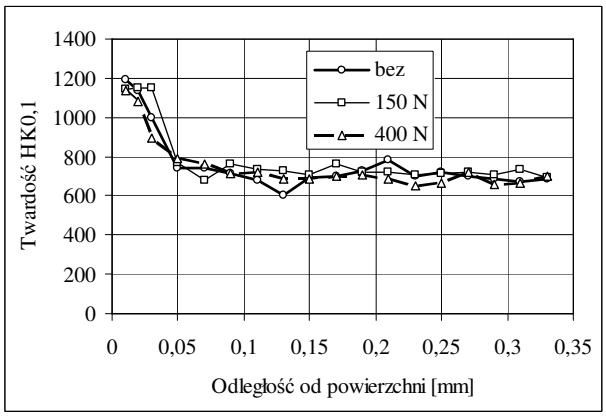
3.1. Nitriding samples with austenitic matrix

The hardness distribution profiles of NC11LV steel samples with austenitic matrix, ion nitrided at various temperatures, has been shown in figures 1-3 while figures 5-7 show the corresponding changes of nitrogen content in the surface layer of the steel. The comparison of the hardness distributions of samples nitrided at the lower temperature (400 ^{o}C) indicates that burnishing, regardless of the force magnitude, causes slight changes of hardness. Slight hardening of the layer has been found on samples subjected to surface plastic working. However, the comparison of nitrogen content in the surface layer shows (fig. 5) that plastic strain intensifies nitrogen diffusion at this temperature. Similar tendencies have been observed on a sample nitrided at 440 ^{o}C (fig. 6) although the hardness distributions of samples nitrided at that temperature were almost the same. It has been stated, therefore, that the increase of sample hardness due to nitriding does not balance hardness drop due to the tempering action of temperature.



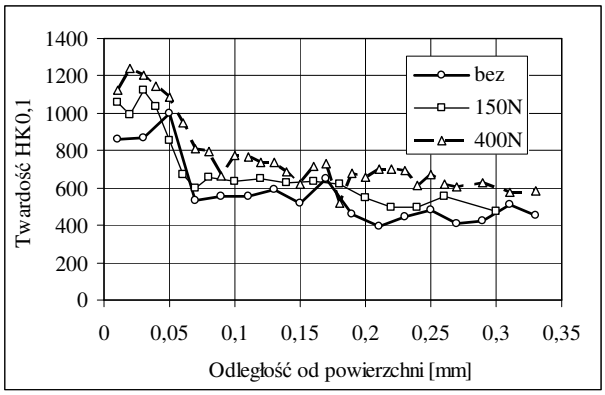
Rys. 1. Twardość warstwy wierzchniej próbek ze stali NC11LV azotowanych jonowo w temperaturze 400 ^{o}C w ciągu 4 godzin. Próbki zahartowane z temperatury 1150 ^{o}C, (bez) - nieodkształcone i (N) - nagniatane z siłą 150 i 400 N

Fig. 1. Surface layer hardness of NC11LV steel samples ion nitrided at 400 ^{o}C for 4 hours. Samples quenched from 1150 ^{o}C, (bez) - without deformation and (N) - burnished with the force of 150 and 400 N



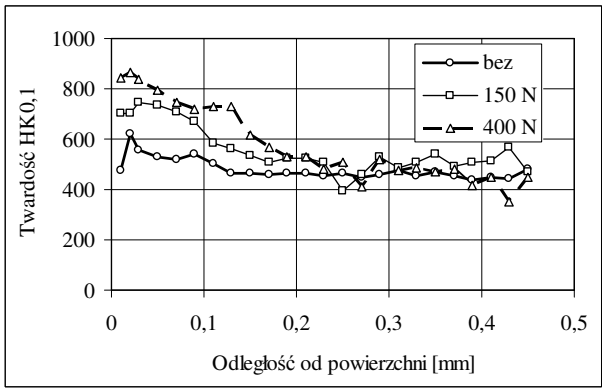
Rys. 2. Twardość warstwy wierzchniej próbek ze stali NC11LV azotowanych jonowo w temperaturze 440 ^{o}C w ciągu 4 godzin. Próbki zahartowane z temperatury 1150 ^{o}C, (bez) - nieodkształcone i (N) - nagniatane z siłą 150 i 400 N

Fig. 2. Surface layer hardness of NC11LV steel samples ion nitrided at 440 ^{o}C for 4 hours. Samples quenched from 1150 ^{o}C, (bez) - without deformation and (N) - burnished with the force of 150 and 400 N



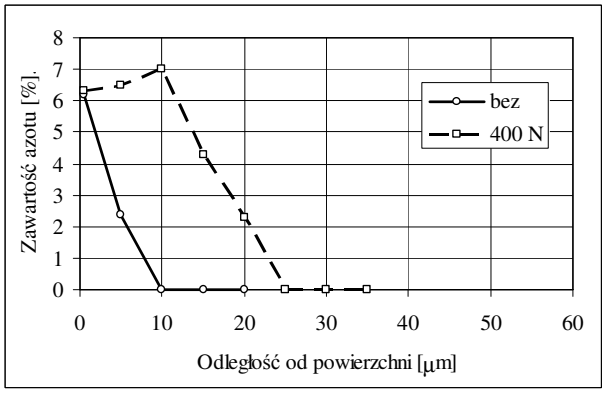
Rys. 3. Twardość warstwy wierzchniej próbek ze stali NC11LV azotowanych jonowo w temperaturze 480 °C w ciągu 4 godzin. Próbki zahartowane z temperatury 1150 °C, (bez) - nieodkształcone i (N) - nagniatane z siłą 150 i 400 N

Fig. 3. Surface layer hardness of NC11LV steel samples ion nitrided at 480°C for 4 hours. Samples quenched from 1150 °C, (bez) - without deformation and (N) - burnished with the force of 150 and 400 N



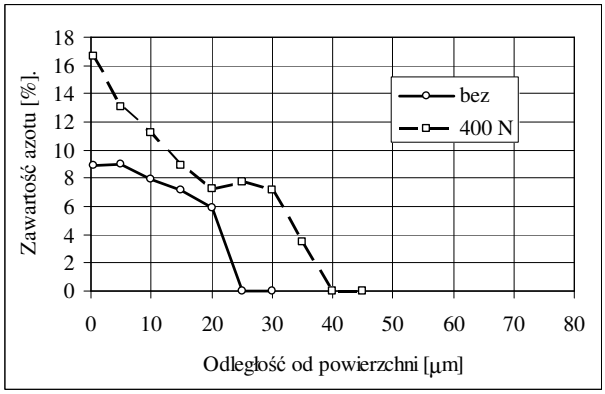
Rys. 4. Twardość warstwy wierzchniej próbek ze stali NC11LV odpuszczanych w temperaturze 480 °C w ciągu 4 godzin. Próbki zahartowane z temperatury 1150 °C, (bez) - nieodkształcone i (N) - nagniatane z siłą 150 i 400 N

Fig. 4. Surface layer hardness of NC11LV steel samples tempered at 480°C for 4 hours. Samples quenched from 1150°C, (bez) - without deformation and (N) - burnished with the force of 150 and 400 N



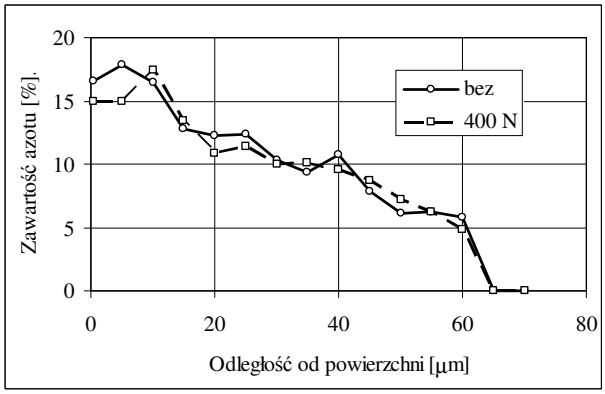
Rys. 5. Zawartość azotu w warstwie wierzchniej próbek ze stali NC11LV azotowanych jonowo w temperaturze 400 °C w ciągu 4 godzin. Próbki zahartowane z temperatury 1150 °C, (bez) - nieodkształcone oraz (N) - nagniatane z siłą 400 N

Fig. 5. Nitrogen content in the surface layer of NC11LV steel samples ion nitrided at 400°C for 4 hours. Samples quenched from 1150°C, (bez) - without deformation and (N) - burnished with the force of 400 N



Rys. 6. Zawartość azotu w warstwie wierzchniej próbek ze stali NC11LV azotowanych jonowo w temperaturze 440 °C w ciągu 4 godzin. Próbki zahartowane z temperatury 1150 °C, (bez) - nieodkształcone oraz (N) - nagniatane z siłą 150 i 400 N

Fig. 6. Nitrogen content in the surface layer of NC11LV steel samples ion nitrided at 440°C for 4 hours. Samples quenched from 1150°C, (bez) - without deformation and (N) - burnished with the force of 150 and 400 N



Rys. 7. Zawartość azotu w warstwie wierzchniej próbki ze stali NC11LV azotowanych jonowo w temperaturze 480 °C w ciągu 4 godzin. Próbki zahartowane z temperatury 1150 °C, (bez) - nieodkształcone oraz (N) - nagniatane z siłą 400 N

Fig. 7. Nitrogen content in the surface layer of NC11LV steel samples ion nitrided at 480°C for 4 hours. Samples quenched from 1150°C, (bez) - without deformation and (N) - burnished with the force of 400 N

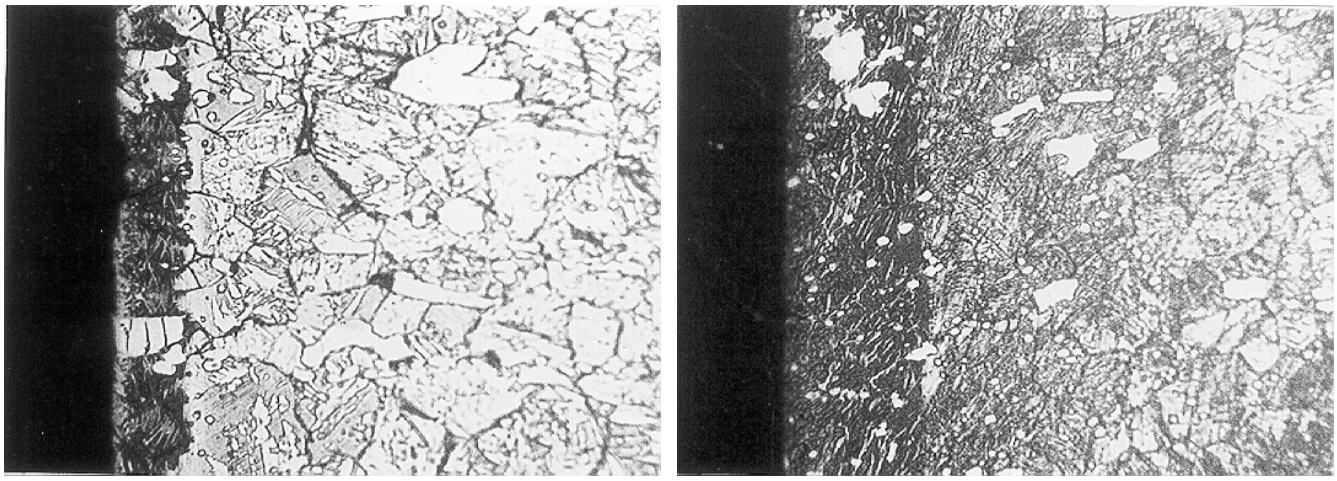
W próbce azotowanej jonowo w temperaturze 480 °C (rys. 3) nastąpił niewiele większy spadek twardości warstwy. Podobne rozkłady twardości warstwy wystąpiły w próbce wytrzymywanej w tej temperaturze, lecz izolowanej od azotującej atmosfery (rys. 4). Można zatem wnioskować, że wpływ azotowania jonowego na profil twardości stali NC11LV o austenitycznej strukturze jest niewielki. Z rysunku 7 wynika ponadto, że w temperaturze azotowania 480 °C znika wpływ nagniatania; rozkłady zawartości azotu próbek nagniatanych i bez nagniatania prawie się pokrywają.

Na rys. 8 pokazano struktury warstwy azotowanej w temperaturze 440 °C, a na rys. 9 – azotowanej w temperaturze 480 °C. W obydwu przypadkach porównywano próbki nagniatane z większym gniotem 400 N, z próbkami nie obrabianymi powierzchniowo. Z porównania wynika, że nagniatanie próbki azotowanej w niższej temperaturze 440 °C (rys. 8) wpływa wyraźnie na grubość warstwy dyfuzyjnej. Podobne, wyraźne różnice grubości warstwy stwierdzono na próbkach azotowanych w temperaturze 400 °C.

In the sample ion nitrided at 480 °C, (fig. 3), only a slightly larger drop of the layer hardness has taken place. Similar layer hardness distributions occurred ion the sample kept at that temperature but isolated from the nitriding atmosphere (fig. 4). The conclusion is, therefore, that ion nitriding has a small influence on the hardness profile of NC11LV steel with austenitic matrix. Fig 7 indicates, too, that the influence of burnishing disappears at the nitriding temperature of 480 °C; the nitrogen content distributions of burnished samples and the ones without burnishing are almost the same.

Fig. 8 shows the structure of the layer nitrided at 440 °C and fig. 9 - the structure of the layer nitrided at 480 °C. In both cases, samples burnished with a larger draft of 400 N were compared to ones without surface treatment. The comparison indicates that burnishing of a sample nitrided at a lower temperature (440 °C) (fig. 8) significantly influences the thickness of the diffusion layer. Similar, clear differences of the layer thickness have been found in samples nitrided at 400 °C.

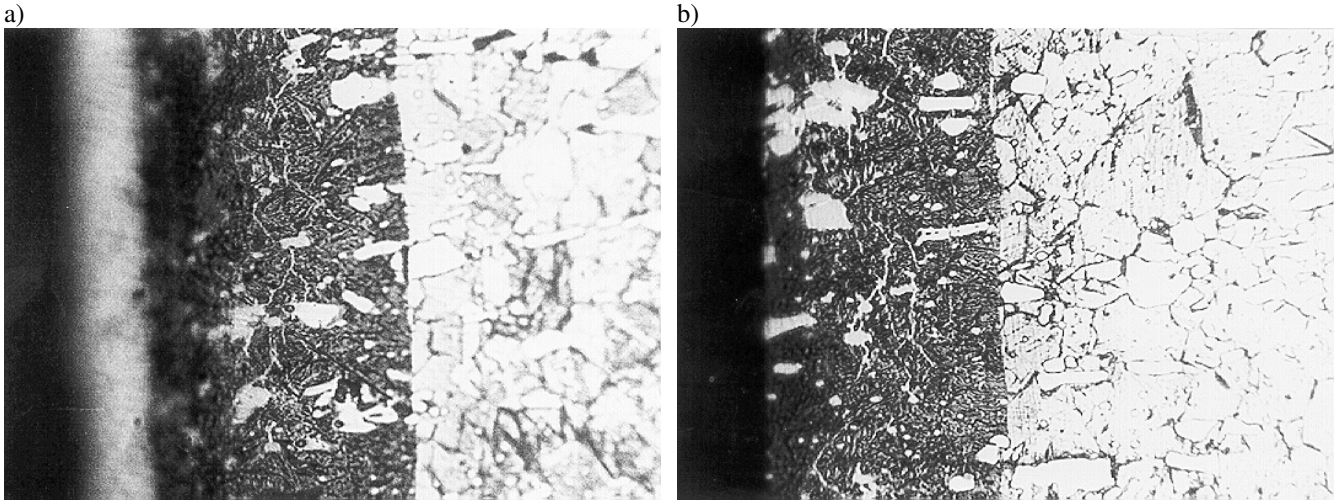
a) b)



Rys. 8. Struktury warstwy dyfuzyjnej próbki ze stali NC11LV zahartowanej z temperatury 1150 °C po azotowaniu jonowym w temperaturze 440 °C: a - bez nagniatania, b – nagniatanie z siłą 400 N. Pow. 500 x

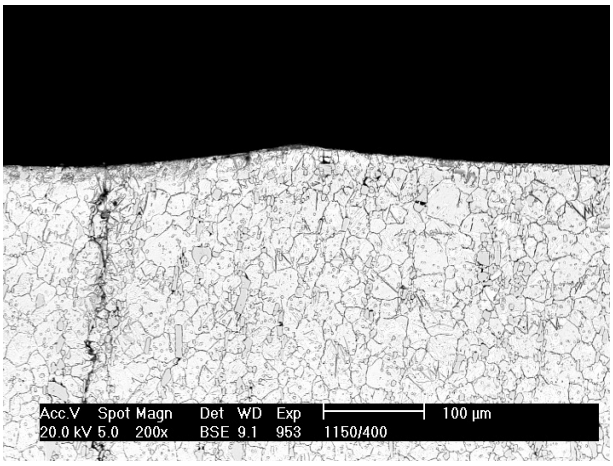
Fig. 8. Structures of the diffusion layer of NC11LV steel samples quenched from 1150 °C after ion nitriding at 440 °C: a – without burnishing, b – burnished with the force of 400 N. Magnification 500 x

a) b)



Rys. 9. Struktury warstwy dyfuzyjnej próbki ze stali NC11LV zahartowanej z temperatury 1150 °C po azotowaniu jonowym w temperaturze 480 °C: a - bez nagniatania, b – nagniatanie z siłą 400 N. Pow. 500 x

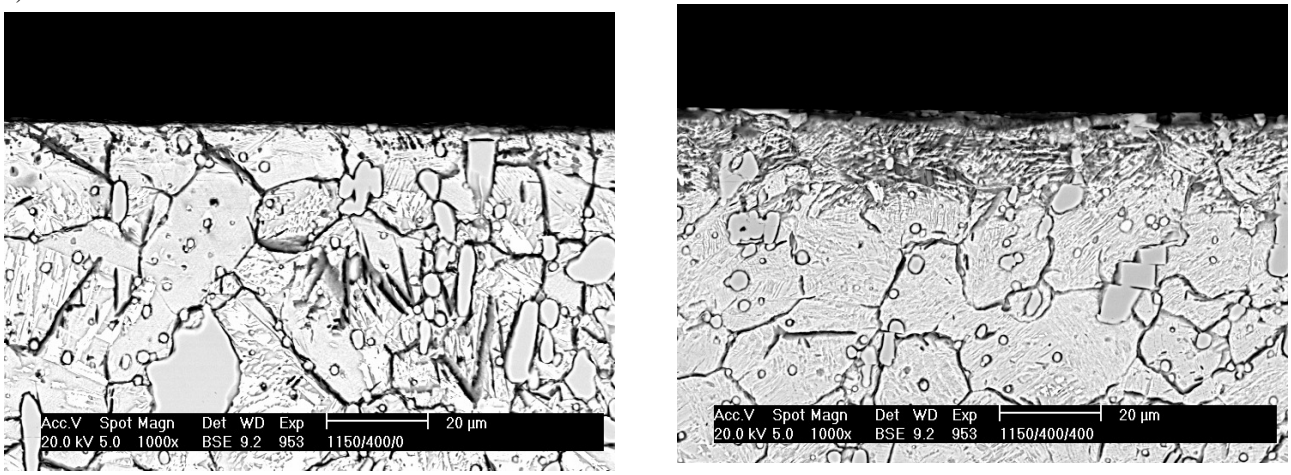
Fig. 9. Structures of the diffusion layer of NC11LV steel sample hardened from 1150 °C after ion nitriding at 480 °C: a – without burnishing, b – burnished with the force of 400 N. Magnification 500 x



Rys. 10. Przejście pomiędzy częścią odkształconą i nieodkształconą próbki ze stali NC11LV zahartowanej z temperatury 1150 °C i azotowanej jonowo w temperaturze 400 °C, mikroskop skaningowy. Pow. 200 x

Fig. 10. Transition between deformed and undeformed part of the specimen of NC11LV steel after hardening from 1150 °C and after ion nitriding at 400 °C, scanning electron microscope, magnification 200 x

a) b)



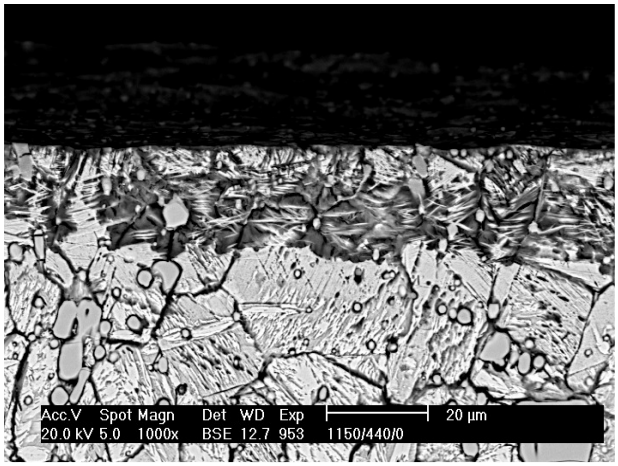
Rys. 11. Struktura warstwy dyfuzyjnej próbki ze stali NC11LV zahartowanej z temperatury 1150 °C po nagniataniu z siłą 400 N: a - bez azotowania, b - po azotowaniu jonowym w temperaturze 400 °C. Mikroskop skaningowy. Pow. 1000 x

Fig. 11. Structure of the diffusion layer of an NC11LV steel sample hardened from 1150 °C, after burnishing with the force of 400 N: a - without nitriding, b - after ion nitriding at 400 °C. Scanning microscope, magnification 1000 x

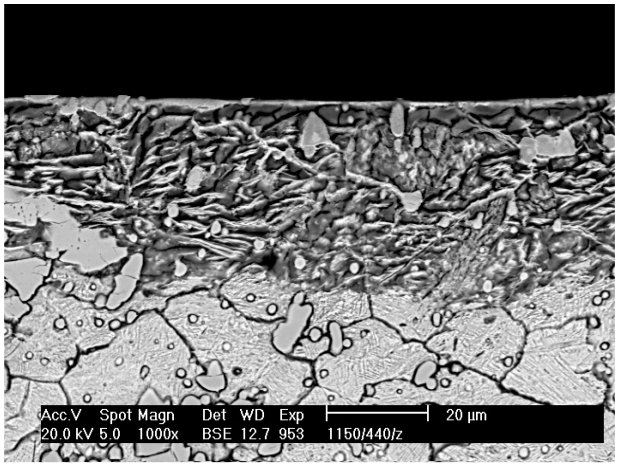
Na rysunku 10 pokazano fragment miejsca przejścia od nagniatanej do nienagniatanej części próbki. W części nagniatanej słabo widoczna jest cienka warstewka dyfuzyjna, a w części nieodkształconej warstwa ta jest niewyraźna. Wyraźniejsza różnica występuje z porównania struktury, z pomocą mikroskopu skaningowego przy dużym powiększeniu (rys. 11). Wzrost grubości warstwy dyfuzyjnej po nagniataniu widać wyraźnie na próbkach azotowanych przy temperaturze 440 °C (rys. 12). Natomiast odpowiednie fragmenty warstwy próbki azotowanej w temperaturze 480 °C były prawie jednakowe. Na rys. 13 pokazano fragment próbki azotowanej w temperaturze 480 °C (przy mniejszym powiększeniu) w obszarze „przejścia" różnych obróbek (nagniatanie – nie nagniatanie). Te same fragmenty próbek obserwowane z pomocą mikroskopu skaningowego (rys. 14) wykazały również podobne struktury i zbliżone grubości warstw po azotowaniu w temperaturze 480 °C. Ponadto, w warstwie nagniatanej, zaobserwowano więcej pękniętych węglików pierwotnych.

Figure 10 shows a fragment of the transition from the burnished part of the sample to the part without deformation. In the burnished part, there is a thin diffusion layer; in the undeformed part the layer is unclear. A more clear difference can be seen in the comparison of the structure with the use of a scanning microscope with large magnification (fig. 11). Increase of the diffusion layer thickness after burnishing is clearly visible on the samples nitrided at 440 °C (fig. 12). Corresponding fragments of the diffusion layer of a sample nitrided at 480 °C were almost identical. Fig. 13 shows a fragment of a sample nitrided at 480 °C (with less magnification) in the area of "transition" of different treatments (burnished – not burnished). The same fragments of samples examined by means of a scanning microscope (fig. 14) have also shown similar structures and layer thicknesses after nitriding at 480 °C. Moreover, in the burnished layer, more cracked primary carbides have been found.

a)

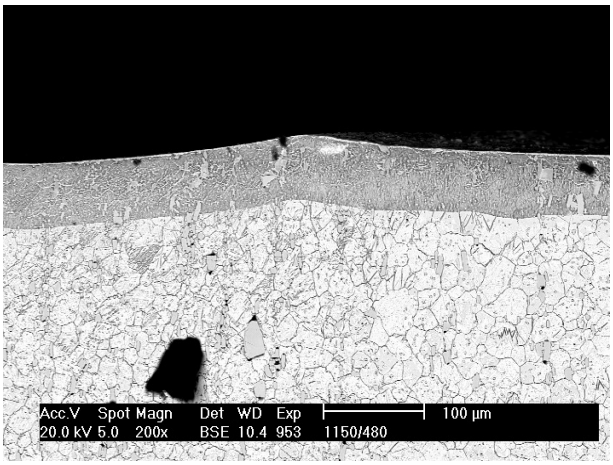


b)



Rys. 12. Struktury warstwy dyfuzyjnej próbki ze stali NC11LV zahartowanej z temperatury 1150 °C po azotowaniu jonowym w temperaturze 440 °C: a - bez nagniatania, b – nagniatanie z siłą 400 N. Mikroskop skaningowy. Pow. 1000 x

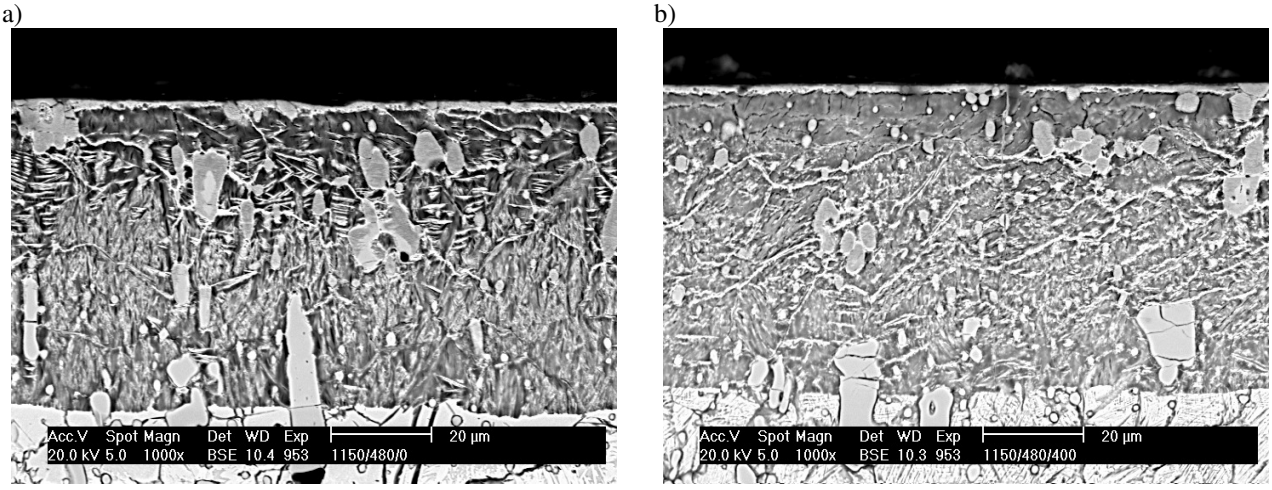
Fig. 12. Structures of the diffusion layer of an NC11LV steel sample hardened from 1150 °C, after ion nitriding at 440 °C: a – without burnishing, b – after burnishing with the force of 400N. Scanning microscope. Magnification 1000 x



Rys. 13. Przejście pomiędzy częścią odkształconą i nieodkształconą próbki ze stali NC11LV zahartowanej z temperatury 1150 °C i azotowanej jonowo w temperaturze 480 °C, mikroskop skaningowy. Pow. 200 x

Fig. 13. Transition between the deformed and undeformed part of an NC11LV steel sample hardened from 1150 °C and ion nitrided at 480 °C; scanning microscope, magnification 200 x

a) b)



Rys. 14. Struktury warstwy dyfuzyjnej próbki ze stali NC11LV zahartowanej z temperatury 1150 °C po azotowaniu jonowym w temperaturze 480 °C: a - bez nagniatania, b – nagniatanie z siłą 400 N. Mikroskop skaningowy. Pow. 1000 x

Fig. 14. Structures of the diffusion layer of an NC11LV steel sample hardened from 1150 °C and ion nitrided at 480 °C: a – without burnishing, b – burnished with the force of 400N. Scanning microscope. Magnification 1000 x

3.2. Wpływ struktury na dyfuzję azotu

Badania wykazały, że struktura wpływa na dyfuzję azotu w stali NC11LV. Skutkiem tego zmieniają się profile rozkładu twardości i zawartość azotu w warstwie dyfuzyjnej. Na rysunku 15 pokazano zmiany twardości warstwy dyfuzyjnej próbek o różnej strukturze osnowy, azotowanych w temperaturze 400 °C. Z porównania charakterystyk wynika, że w próbce ze stali o osnowie martenzytycznej twardość warstwy azotowanej, zahartowanej i nagniatanej,

3.2. The influence of structure on nitrogen diffusion

Investigation has shown that structure influences nitrogen diffusion in NC11LV steel. Due to that the profiles of hardness distribution and nitrogen content in the diffusion layer change. In figure 15 one can see the changes of the diffusion layer hardness in samples of various matrix structures, nitrided at 400 °C. The comparison of the characteristics indicates that, in the sample of martensitic

rośnie szybciej niż w próbce tylko zahartowanej. Natomiast w próbce zahartowanej z wyższej temperatury (o austenitycznej osnowie) spadek twardości spowodowany odpuszczającym działaniem temperatury kompensuje, w pewnym stopniu, wzrost twardości spowodowany azotowaniem, zatem zmiany twardości są łagodniejsze.

Podwyższenie temperatury azotowania jonowego likwiduje, w znacznym stopniu, skutki umocnienia (rys. 16 i 17). Różnice twardości w próbkach zahartowanych z temperatury 1150 ^{o}C wynikają z właściwości próbki. Większa twardość próbki nagniatanej, jak na rys. 17, może być spowodowana podwyższoną stopowością osnowy, a także większym udziałem węglików w strefie obserwacji. Badana stal NC11LV, wytopu konwencjonalnego, charakteryzuje się bowiem dużą segregacją składu chemicznego.

Porównując zawartość azotu w warstwie dyfuzyjnej (rys. 18) można stwierdzić, że odkształcenie plastyczne – niezależnie od stanu strukturalnego osnowy – powoduje wzrost udziału tego pierwiastka w warstwie azotowanej. Z rysunku wynika ponadto, że dyfuzja azotu w austenicie przebiega wolniej aniżeli w próbce o martenzytycznej osnowie.

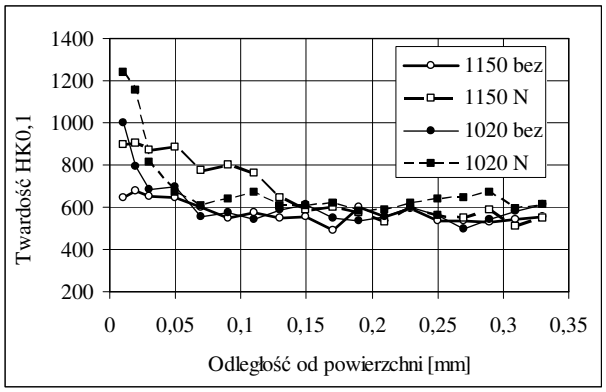
Podobne tendencje utrzymują się w przypadku próbek azotowanych w temperaturze 440 ^{o}C (rys. 19), lecz jedynie w przypadku próbek o austenitycznej osnowie. Stwierdzono ponadto, że dyfuzja azotu w próbce o takiej strukturze osnowy, po azotowaniu w wyższej w wyższej temperaturze 480 ^{o}C (rys. 20), nie zależy od odkształcenia. Rozkłady twardości są, w granicach błędu pomiarowego, podobnie jak w stali zahartowanej na martenzyt, mimo iż próbki z austenityczną osnową mają nieco większą zawartość azotu w warstwie wierzchniej. Z badań wynika, że struktura osnowy wpływa na profil twardości oraz na zawartość azotu w warstwie dyfuzyjnej po azotowaniu w niższej temperaturze. Wykazano ponadto, że wpływ odkształcenia plastycznego na charakterystyki stali NC11LV o austenitycznej osnowie jest większy niż w przypadku stali zahartowanej na martenzyt.

matrix steel, the hardness of the nitrided layer hardened and burnished, increases quicker than in the sample which had been only hardened. On the other hand, in the sample hardened from a higher temperature (with austenitic matrix), the drop of hardness due to the tempering effect of temperature, is compensated, to an extent, by the hardness increase due to nitriding, and therefore hardness changes are smaller.

Increase of the ion nitriding temperature nullifies, to a significant extent, the effects of work hardening (fig. 16 and 17). The hardness differences in the samples hardened from 1150 ^{o}C result from the sample properties. The higher hardness of the burnished sample, as in fig. 17, can be caused by higher content of alloy components in the matrix, as well as by a higher content of carbides in the zone under examination. The investigated NC11LV steel, of conventional melt is characterized by large segregation of the chemical composition.

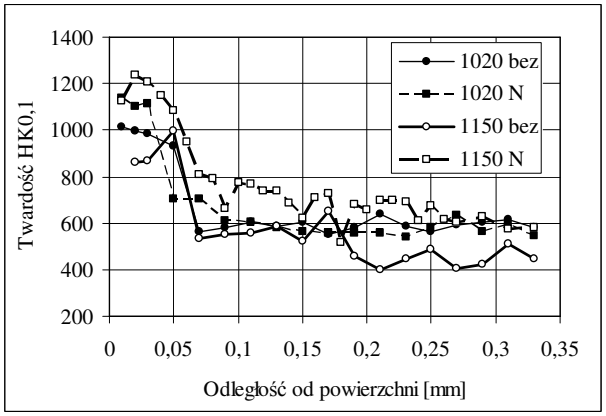
Comparing the content of nitrogen in the diffusion layer (fig. 18), one can see that plastic deformation, regardless of the structural state of the matrix, causes increase of the element in the nitrided layer. The figure indicates too, that the diffusion of nitrogen in austenite is slower than in the sample with martensitic matrix.

Similar tendencies are found in samples nitrided at 440 ^{o}C (fig. 19), but only in the case of the ones with austenitic matrix. It has also been found that nitrogen diffusion in a sample with such matrix structure, nitrided at a higher temperature of 480 ^{o}C (fig. 20), does not depend on deformation. Hardness distributions are within the range of measurement error, similar to those in steel quenched to martensite in spite of the fact that samples with austenitic matrix have slightly higher nitrogen content in the surface layer. Investigations indicate that the structure of matrix influences the hardness profile and the nitrogen content in the diffusion layer after nitriding at a lower temperature. It has also been shown that the influence of plastic strain on the characteristics of NC11LV steel with austenitic matrix is stronger than in the case of steel quenched to martensite.



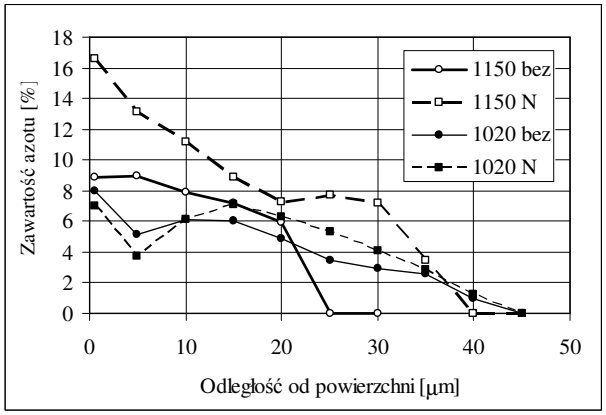
Rys. 15. Twardość warstwy wierzchniej próbek ze stali NC11LV azotowanych jonowo w temperaturze 400 °C w ciągu 4 godzin. Próbki zahartowane z temperatury 1020 i 1150 °C, (bez) - nieodkształcone i (N) - nagniatane z siłą 400 N

Fig. 15. Hardness of the surface layer of NC11LV steel after ion nitriding at 400°C for 4 hours. Samples quenched from 1020 and 1150°C, (bez) - without deformation and (N) - burnished with the force of 400 N



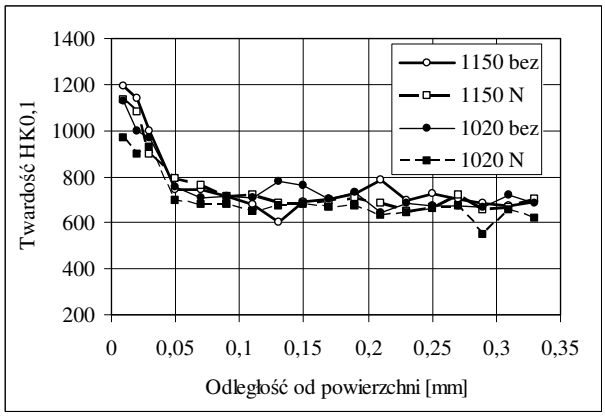
Rys. 17. Twardość warstwy wierzchniej próbek ze stali NC11LV azotowanych jonowo w temperaturze 480 °C w ciągu 4 godzin. Próbki zahartowane z temperatury 1020 i 1150 °C, (bez) - nieodkształcone i (N) - nagniatane z siłą 400 N

Fig. 17. Hardness of the surface layer of NC11LV steel samples ion nitrided at 480°C for 4 hours. Samples quenched from 1020 and 1150°C; (bez) - without deformation and (N) - burnished with the force of 400 N



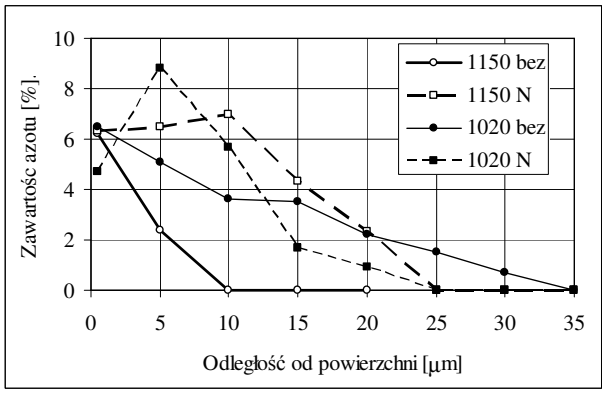
Rys. 19. Zawartość azotu w warstwie wierzchniej próbek ze stali NC11LV azotowanych jonowo w temperaturze 440 °C w ciągu 4 godzin. Próbki zahartowane z temperatury 1020 i 1150 °C, (bez) - nieodkształcone oraz (N) - nagniatane z siłą 400 N

Fig. 19. Nitrogen content in the surface layer of NC11LV steel samples ion nitrided at 440°C for 4 hours. Samples quenched from 1020 and 1150°C: (bez) – without deformation and (N) – burnished with the force of 400 N



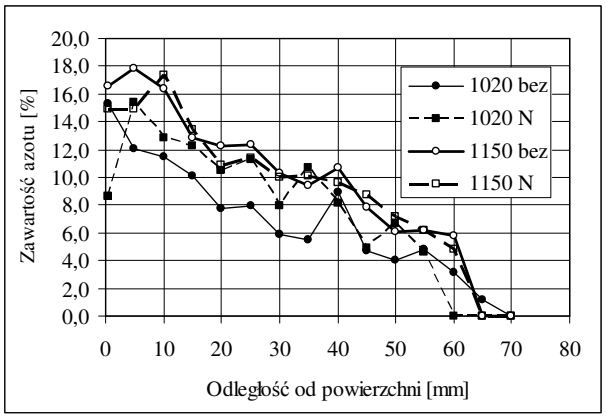
Rys. 16. Twardość warstwy wierzchniej próbek ze stali NC11LV azotowanych jonowo w temperaturze 440 °C w ciągu 4 godzin. Próbki zahartowane z temperatury 1020 i 1150 °C, (bez) - nieodkształcone i (N) - nagniatane z siłą 400 N

Fig. 16. Hardness of the surface layer of NC11LV steel after ion nitriding at 440°C for 4 hours. Samples quenched from 1020 and 1150°C, (bez) - without deformation and (N) - burnished with the force of 400 N



Rys. 18. Zawartość azotu w warstwie wierzchniej próbek ze stali NC11LV azotowanych jonowo w temperaturze 400 °C w ciągu 4 godzin. Próbki zahartowane z temperatury 1020 i 1150 °C, (bez) - nieodkształcone oraz (N) - nagniatane z siłą 400 N

Fig. 18. Nitrogen content in the surface layer of NC11LV steel samples ion nitrided at 400°C for 4 hours. Samples quenched from 1020 and 1150°C: (bez) – without deformation and (N) – burnished with the force of 400 N



Rys. 20. Zawartość azotu w warstwie wierzchniej próbek ze stali NC11LV azotowanych jonowo w temperaturze 480 ^{o}C w ciągu 4 godzin. Próbki zahartowane z temperatury 1020 i 1150 ^{o}C, (bez) - nieodkształcone oraz (N) - nagniatane z siłą 400 N

Fig. 20. Nitrogen content in the surface layer of NC11LV steel samples ion nitrided at 480 ^{o}C for 4 hours. Samples quenched from 1020 and 1150 ^{o}C: (bez) – without deformation and (N) – burnished with the force of 400 N

4. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI

Zmieniając warunki obróbki cieplnej można otrzymać po zahartowaniu stali NC11LV struktury o skrajnych właściwościach. Oprócz węglików chromowych, osnowa stali może zawierać martenzyt ze śladami austenitu szczątkowego lub austenit z niewielką zawartością fazy α. W poprzedniej publikacji [1] opisano wpływ parametrów obróbki cieplnej na właściwości warstwy wierzchniej stali o martenzytycznej osnowie. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki podobnych badań stali NC11LV zawierającej po zahartowaniu austenityczną osnowę, oraz opisano i porównano warstwy dyfuzyjne o odmiennej strukturze.

Badania twardości warstwy wierzchniej, z uwagi na dużą niejednorodność struktury węglikowej, dały wyniki obarczone dużym rozrzutem. Mimo to jednak można było zauważyć, że odkształcenie plastyczne próbek azotowanych w niższej temperaturze powoduje niewielki wzrost twardości. Natomiast profile twardości próbek azotowanych w wyższej temperaturze (480 ^{o}C) prawie się pokrywają, co wskazuje, że odpuszczające działanie temperatury niszczy skutki odkształcenia.

Ocena zawartości azotu w warstwie wierzchniej wykazała podobne tendencje. Zauważono wyraźnie zmiany udziału tego pierwiastka w próbkach azotowanych jonowo w niższej temperaturze.

4. SUMMARY OF THE INVESTIGATION RESULTS AND CONCLUSIONS

Modifying the conditions of heat treatment, one can obtain structures of extreme properties after quenching NC11LV steel. In addition to chromium carbides, the steel matrix can contain martensite with traces of retained austenite or austenite with a slight content of phase α. In the previous paper [1], the influence of heat treatment parameters on the properties of the surface layer of martensitic matrix steel have been described. The present work presents the results of similar investigation of NC11LV steel containing austenitic matrix after quenching and describes and compares diffusion layers of different structures.

Examination of the surface layer hardness have rendered significantly scattered results due to severe heterogeneity of the carbide structure. Despite that, however, one could see that plastic strain of samples nitrided at a lower temperature results in a small increase of their hardness. The hardness profiles of the samples nitrided at the higher temperature (480 ^{o}C) are almost identical, which implies that the tempering effect of the temperature destroys the results of the deformation.

Evaluation of the nitrogen content in the surface layer has shown similar tendencies. Clear changes of the content of that element in the samples ion nitrided at the lower temperature has been found.

Struktura osnowy wpływa istotnie na zmiany właściwości warstwy dyfuzyjnej, nagniatanej, otrzymanej podczas azotowania w niższej temperaturze. W próbkach o austenitycznej osnowie dochodzą zmiany strukturalne, wynikające z wpływu umocnienia zgniotowego i dużej energii zmagazynowanej w austenicie, większej niż w przypadku próbek z przewagą martenzytu.

Przeprowadzone badania stali NC11LV o osnowie austenitycznej pozwoliły wyciągnąć następujące wnioski:

1. Nagniatanie powoduje duże umocnienie warstwy wierzchniej. Stanowi to o dodatkowych zmianach strukturalnych, zwłaszcza zachodzących podczas azotowania w niższej temperaturze.
2. Temperatura azotowania wpływa na skutki obróbki plastycznej oraz na zwiększenie intensywności procesu:
   - w niższej temperaturze azotowania, dyfuzja w odkształconej strefie próbki jest łatwiejsza, a warstwa azotowana jest grubsza,
   - podczas azotowania w wyższej temperaturze umocnienie zgniotowe zostaje w znacznym stopniu usunięte, a wpływ nagniatania znacznie się zmniejsza. Po azotowaniu w temperaturze 480 ^{o}C skutki azotowania zostają usunięte (profile rozkładu twardości i udziały azotu w warstwie wierzchniej pokrywają się).
3. Struktura wpływa na skutki nagniatania stali NC11LV; wpływ odkształcania plastycznego na charakterystykę stali o austenitycznej osnowie jest większy, niż w przypadku stali zahartowanej na martenzyt.
4. Wpływ nagniatania zależy od temperatury azotowania stali:
   - po azotowaniu w niższej temperaturze odkształcenie – niezależnie od stanu strukturalnego osnowy – powoduje wzrost udziału azotu w warstwie wierzchniej, zmieniając odpowiednio profile rozkładu twardości,

The structure of the matrix significantly influences the changes of the properties of the burnished diffusion layer obtained while nitriding at the lower temperature. In the samples with austenitic matrix, additional structural changes take place resulting from the influence of strain hardening and much energy stored in austenite, more than in the case of samples with the prevalence of martensite.

The investigation of the NC11LV steel with austenitic matrix which has been performed, allows us to draw the following conclusions:

1. *Burnishing causes strong work hardening of the surface layer. This determines additional structural changes, particularly taking place during nitriding at the lower temperature.*
2. *The nitriding temperature influences the results of plastic working and increase of the process intensity:*
   - *at the lower nitriding temperature, diffusion in the deformed zone of the sample is easier and the nitrided layer is thicker,*
   - *during nitriding at the higher temperature, the strain hardening is removed to a large extent and the influence of burnishing is smaller. After nitriding at 480 ^{o}C, the results of nitriding are removed (hardness distribution profiles and nitrogen contents in the surface layer coincide).*
3. *Structure influences the effects of burnishing NC11LV steel; the influence of plastic deformation on the characteristics of austenitic matrix steel is stronger than in the case of steel quenched to martensite.*
4. *The influence of burnishing depends on the steel nitriding temperature:*
   - *after nitriding at the lower temperature, deformation causes an increase of nitrogen content in the surface layer regardless of the structural state of the matrix changing the hardness distribution profiles correspondingly,*

- w próbce o osnowie martenzytycznej i nagniatanej warstwa dyfuzyjna, po azotowaniu w temperaturze 400 °C, była grubsza niż w próbce nieodkształconej. W próbce o strukturze austenitycznej zmiany właściwości warstwy były łagodniejsze,
- po azotowaniu w wyższej temperaturze dyfuzja azotu nie zależy od nagniatania; zgniot dyslokacyjny został stopniowo usunięty skutkiem działania temperatury,
- możliwa jest produkcja wyrobów utwardzonych powierzchniowo z ciągliwym rdzeniem lub utwardzanych podczas eksploatacji, podobnie jak to ma miejsce przy wyrobach ze stali Hadfielda.

Badania zrealizowano w ramach projektu nr 1012/T08C/96/11 - „Podstawy technologii narzędzi z wykorzystaniem dyfuzji azotu w odkształconych, wysokochromowych stalach ledeburytycznych", finansowanego przez Komitet Badań Naukowych [4].

- *in the martensitic matrix sample, after burnishing and nitriding at 400 °C, the diffusion layer was thicker than in the sample without deformation. In the austenitic structure sample, the changes of the layer properties were milder.*
- *after nitriding at the higher temperature, diffusion of nitrogen does not depend on burnishing; the dislocation cold work has been gradually removed as a result of temperature,*
- *it is possible to manufacture surface hardened products with ductile core or ones hardened during exploitation as is the case with products made of Hadfield steel.*

The investigation has been performed within project no. 1012/T08C/96/11 – "Bases of tool technology with the utilization of nitrogen diffusion in deformed high-chromium ledeburitic steels" financed by the Committee of Scientific Research (KBN) [4].

LITERATURA/REFERENCES

[1] Berkowski L., Borowski J., Rybak Z.: Wpływ struktury na skutki azotowania chromowych stali ledeburytycznych. Część VI: Azotowanie jonowe stali NC11LV nagniatanej po hartowaniu na martenzyt. Obróbka Plastyczna Metali 2009 t. 20 nr 1 s. 3-14, 17 rys. bibliogr. 6 poz.

[2] Berkowski L., Borowski J., Rybak Z., Stefko A.: Wpływ struktury na skutki azotowania chromowych stali ledeburytycznych. Część V: Odkształceniowe umacnianie warstwy wierzchniej hartowanej stali NC11LV. Obróbka Plastyczna Metali 2008. t. 19 nr 2 s. 45-51, 7 rys. bibliogr. 8 poz.

[3] Berkowski L., Wierszyłłowski I.: Wpływ struktury na skutki azotowania chromowych stali ledeburytycznych. Część IV: Dylatometryczne badania stabilności struktury stali NC11LV. Obróbka Plastyczna Metali 2007 t. 18 nr 4 s. 38–42, 7 rys. bibliogr. 3 poz.

[4] Berkowski L., Borowski J.: Wpływ struktury na skutki azotowania chromowych stali ledeburytycznych. Część III: Warunki obróbki cieplnej stali NC11LV. Obróbka Plastyczna Metali 2007 t. 18 nr 3 s. 23–33, 15 rys. 4 tab. bibliogr. 6 poz.

[5] Berkowski L.: Wpływ struktury na skutki azotowania chromowych stali ledeburytycznych. Część I: Informacje o materiale badań. Obróbka Plastyczna Metali 2005 t. 16 nr 5 s. 5–15, 12 rys. 2 tab. bibliogr. 26 poz.

[6] Berkowski L., Borowski J.: Wpływ struktury na skutki azotowania chromowych stali ledeburytycznych. Część II: Warunki obróbki cieplnej stali NC10. Obróbka Plastyczna Metali 2007 t. 18 nr 1 s. 23–33, 13 rys. 4 tab. bibliogr. 9 poz.

[7] Berkowski L.: Podstawy technologii narzędzi z wykorzystaniem dyfuzji azotu w odkształconych, wysokochromowych stalach ledeburytycznych. Projekt badawczy KBN nr 1012/T08C/96/11. INOP – Poznań, 1999, s. 78, 91 rys. 14 tab.

[8] Borowski J.: Wpływ stanu strukturalnego hartowanej stali NC11LV na skutki krótkookresowego azotowania. (Rozprawa doktorska). Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych Transportu, Poznań 2002, s. 95, 80 rys. 16 tab. bibliogr. 92 poz.