

## STRENGTHENING OF THE STEEL AFTER HEAT TREATING WITH THE MATRIX OF DIFFERENT STRUCTURE

### Summary

More important processes of surface engineering technology is combination of classical volume heat treatment and surface deformation, burnishing. The paper presents the mean of the combination of two technologies of NC11LV steel: heat treatment with different of austenitization temperature (result two structures after hardening – martensite and austenite) and burnishing. The burnishing of the steel contains martensiting structure of the matrix had not effects, but burnishing of austenite changes properties of the NC11LV steel evidently. The hardness after burnishing was larger, then hardness of the steel after classical hardening, contains martensiting structure. The research show, that austenit – result of the heat treatment from high austenitization temperature - after hardening during deformation, after tempering (480°C, 4 h) partially remain.

## UMOCNIENIE ZGNIOTOWE HARTOWANEJ STALI O RÓŻNEJ STRUKTURZE OSNOWY

### Streszczenie

Duże znaczenie mają technologie inżynierii powierzchni kojarzące zabiegi obróbki cieplnej objętościowej i obróbek powierzchniowych. W pracy przedstawiono możliwość łączenia zabiegów obróbki cieplnej, wpływającej na tworzenie struktur o osnowie martenzytycznej i austenitycznej, z procesem nagniatania. Badania wykazały, że proces obróbki plastycznej powierzchniowej niewiele wpływa na własności wyrobów zahartowanych na martenzyt. Natomiast wpływ nagniatania na stal o osnowie austenitycznej jest znaczący. Umocniona zgmiotowo warstwa wierzchnia miała twardość większą od stali zahartowanej na martenzyt. Wykazano ponadto, że austenit otrzymany po zahartowaniu stali z wysokiej temperatury jest trwały, a umocnienie warstwy wierzchniej o takiej strukturze zostaje częściowo zachowane po czterogodzinnym odpuszczaniu w temperaturze 480°C.

### 1. Wstęp

Istnieje szereg czynników wpływających na umocnienie stali. Do czynników zależnych od technologii należą:

1. wzrost gęstości dyslokacji,
2. tworzenie się martenzytu,
3. rozdrobnienie ziaren,
4. wydzielanie dyspersyjne.

Duże znaczenie ma wprowadzenie pierwiastków stopowych, które powodują powstanie różnego rodzaju związków (faz międzymetalicznych, węglików, azotków itp.) w postaci dużych agregatów, utworzonych w procesie metalurgicznym (np. węgliki pierwotne) lub w postaci wydzielen, powstałych podczas starzenia lub odpuszczania.

Dwie technologie pozahutniczej obróbki decydują o właściwościach stali:

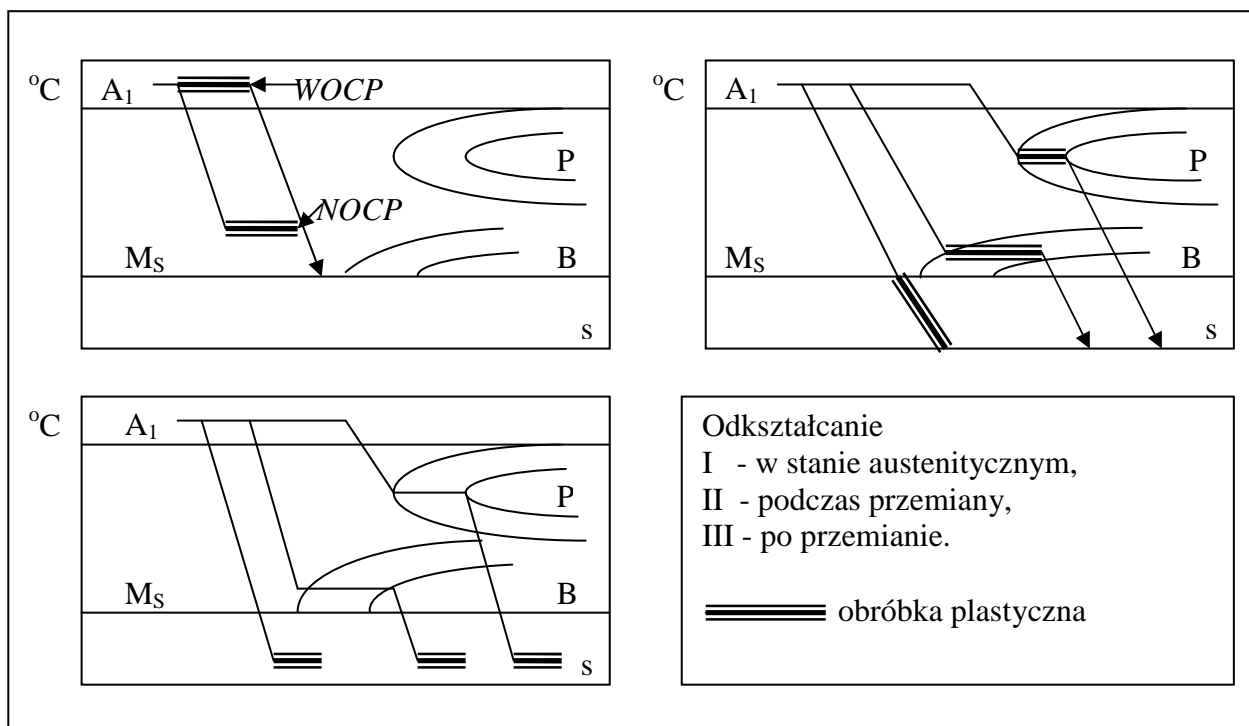
- *obróbka plastyczna*, gdzie dominującym czynnikiem jest wzrost gęstości dyslokacji
- *obróbka cieplna (hartowanie i odpuszczanie)*, gdzie czynnikiem dominującym, podczas hartowania, jest tworzenie się martenzytu. O skutkach odpuszczania decyduje zjawisko wydzielania. Rozdrobnienie ziaren podczas obróbki cieplnej ma w tym przypadku mniejsze znaczenie.

Do intensywnych, nowoczesnych zabiegów technologicznych, wpływających na właściwości stali, należy obróbka cieplno-plastyczna (OCP), łącząca efekt umocnienia dyslokacyjnego z przemianami fazowymi stali.

Technologia OCP może być zastosowana do stali i stopów metali nieżelaznych. W drugim przypadku obróbka cieplno-plastyczna jest przede wszystkim kombinacją odkształcenia plastycznego i utwardzania dyspersyjnego – przesycania i starzenia. Według znanych kryteriów, obróbkę cieplno-plastyczną stali można podzielić na trzy klasy [1], należą do nich:

- I. Obróbka cieplno-plastyczna polegająca na odkształcaniu stali w stanie austenitycznym. W klasie tej znajdują się objęte normą:
  - *Niskotemperaturowa obróbka cieplno-plastyczna (NOCP)* – polegająca na kształtowaniu wyrobów w temperaturze niższej od temperatury początku rekrytalizacji austenitu,
  - *Wysokotemperaturowa obróbka cieplno-plastyczna (WOCP)* – polegająca na kształtowaniu wyrobów powyżej tej temperatury.
- II. Obróbka cieplno-mechaniczna polegająca na odkształcaniu stali podczas przemiany austenitu w perlit, bainit lub martenzyt.
- III. Obróbka cieplno-plastyczna polegająca na odkształceniu stali po zakończeniu przemiany austenitu w martenzyt lub w inne produkty przemiany  $\gamma - \alpha$ .

Znane są procesy obróbki cieplno-plastycznej, które trudno zakwalifikować do którejkolwiek klasy. Chodzi o utwardzanie stali podczas odkształcania austenitu, wywołane jednocześnie zgmiotem i skutkiem częściowej przemiany martenzytycznej. Utwardzanie stali w tym sensie odbywa się podczas pracy gąsienic specjalnych pojazdów mechanicznych, wykonanych ze stali Hadfielda.



Rys. 1. Klasyfikacja obróbek cieplno-plastycznych stali  
 Fig. 1. Classification of the thermomechanical treatment of the steel

Na rys. 1 pokazano schematy technologiczne obróbek cieplno-plastycznych ujęte w trzech klasach, na tle wykresów prezentujących kinetykę przemian fazowych CTPi stali stopowych, charakteryzujących się obszarem dużej trwałości austenitu, rozdzielającym przemianę perlityczną (P) od przemiany bainitycznej (B). Na rysunku tym  $A_1$  oznacza temperaturę przemiany eutektoidalnej, a  $M_s$  – temperaturę początku przemiany martenzytycznej. W niniejszej publikacji oceniano skutki dwóch technologii OCP:

- obróbkę plastyczną martenzytu (III klasa),
- obróbkę plastyczną austenitu, metastabilnego w temperaturze otoczenia.

## 2. Materiał badany i jego obróbka

Stale należą do materiałów konstrukcyjnych, których struktura i właściwości znajdują się w bardzo szerokim obszarze (rys. 2). Pomijając materiały o specjalnych właściwościach, struktura osnowy stali, w temperaturze otoczenia, może zawierać:

- martenzyt,
- mieszaninę ferrytu i martenzytu,
- mieszaninę martenzytu i austenitu,
- austenit.

O strukturze decyduje skład chemiczny stali i ich obróbka cieplna. W rzeczy samej trudno (po hartowaniu) otrzymać „czystą” strukturę martenzytu. Oprócz tej fazy, w zahartowanej stali węglowej lub stopowej o zwiększonej zawartości węgla, znajdują się niewielkie ilości austenitu szczątkowego. Czysty austenit występuje w stalach kwasoodpornych, zawierających nikiel i chrom oraz w stalach manganowych Hadfielda, utwardzanych skutkiem przemiany martenzytycznej wywołanej odkształceniem. Wtedy gniot 20% powoduje wzrost udziału objętościowego martenzytu w ilości około 2-6%. Pierwiastki Ni i Mn

tworzą z żelazem układy charakteryzujące się otwartym polem austenitu.

Materiałem badanym była stal NC11LV 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.

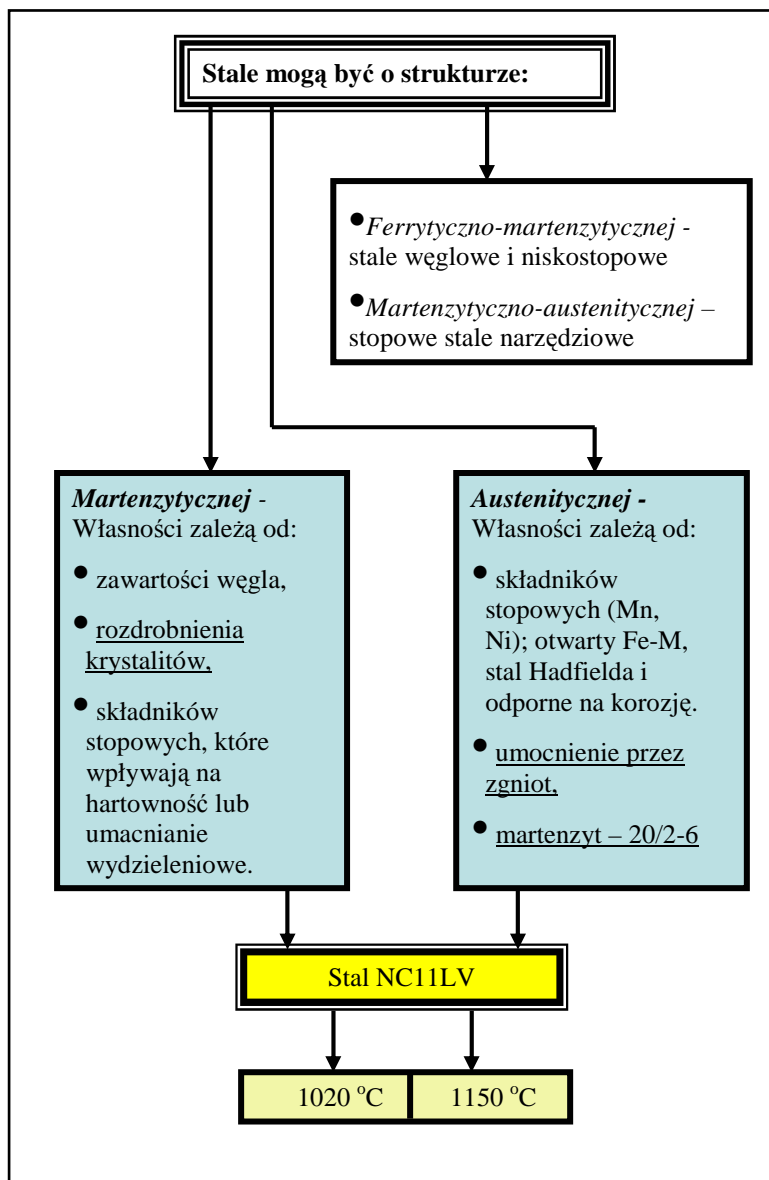
Wyniki badań przedstawione w pracy [2] wykazały, że po zahartowaniu stali z różnej temperatury można uzyskać pseudodwufazowy stan strukturalny, zawierający węgliki i martenzytyczną lub austenityczną osnowę. Pseudodwufazowy, gdyż możliwy jest niewielki udział faz przeciwnych; austenit w martenzytynie i śladowe ilości fazy  $\alpha$  w austenicie. Wykres na rys. 3 przedstawi wyniki analizy fazowej stali NC11LV zahartowanej z różnej temperatury. Z rysunku wynika, że po zahartowaniu z temperatury 1000°C osnowa stali zawiera martenzyt z niewielkim udziałem austenitu, a po zahartowaniu z temperatury 1150°C – prawie czysty austenit. Skutkiem tego w badaniach przyjęto temperaturę austenitowania 1020 i 1150°C. Niższa gwarantowała uzyskanie maksymalnej twardości stali po zahartowaniu. Badania wykazały ponadto, że austenit otrzymany po zahartowaniu z wyższej temperatury jest bardzo trwały [3].

Temperatura wpływa na kinetykę przemian fazowych, zachodzących podczas chłodzenia stali. Wzrost temperatury austenitowania powoduje przesunięcie przemian (perlitycznej i bainitycznej) w prawo oraz wyraźne obniżenie temperatury początku przemiany martenzytycznej [1]. Ujęcie tego problemu ilustruje wykres CTPi z naniesionymi schematami obróbki cieplno-plastycznej stali (rys. 4).

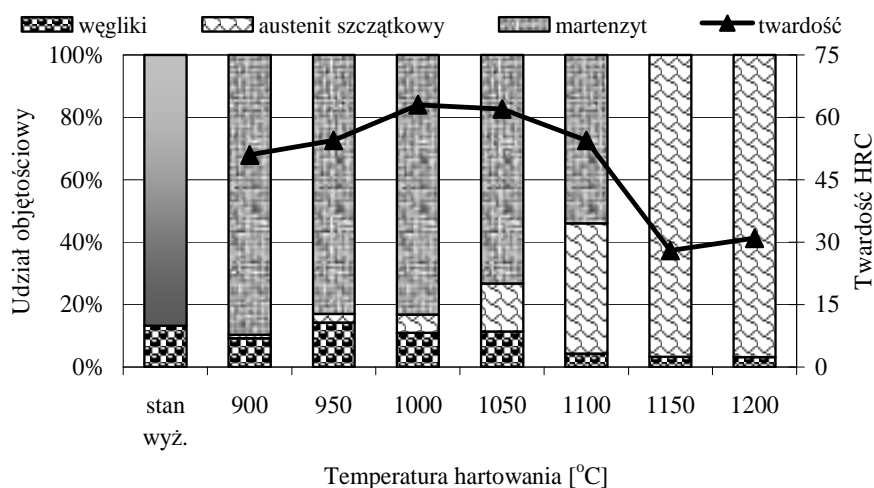
Próbki ze stali NC11LV, o średnicy  $\Phi 20$  mm austenitowano w piecu solnym, w temperaturze 1020 i 1150 °C, ciągu 10 minut i hartowano w oleju. Po dokładnym przygotowaniu powierzchni, próbki nagniatano nagniataniem diamentowym, z dwóch stron do połowy ich

promienia, przy obciążeniu 150 i 400 N. Pozostałe parametry (posuw  $p = 0,025$  mm/obr oraz prędkość  $n = 460$  obr/min) były jednakowe [4]. Strukturę (na zglądach)

obserwowano z pomocą mikroskopu świetlnego i elektronowego, skaningowego.

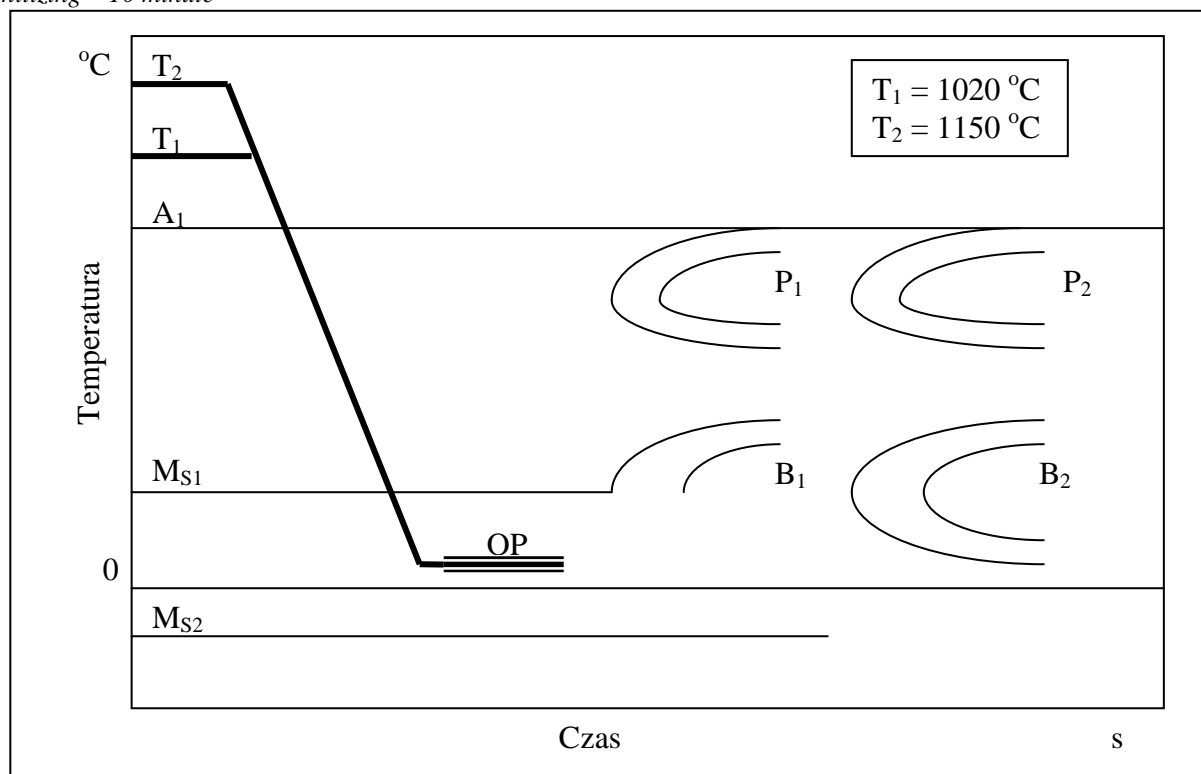


Rys. 2. Podział stali według struktury osnowy  
Fig. 2. Division of steel according to structure of matrix



Rys. 3. Wpływ temperatury austenitzowania na skład fazowy oraz na twardość hartowanej stali NC11LV: czas austenitzowania 10 minut

Fig. 3. Influence of the austenitizing temperature on the phase composition and hardness of NC11LV steel; time of austenitizing – 10 minute



Rys. 4. Schemat technologiczny obróbki cieplno-plastycznej zastosowanej w badaniach

Fig. 4. Schematic diagram of the thermomechanical treatment used at the research

### 3. Wyniki badań

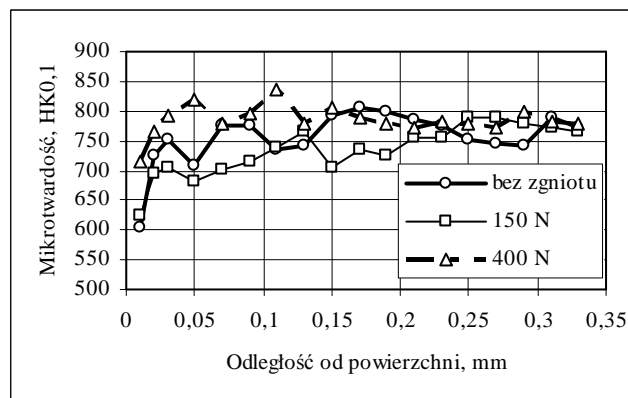
Badania obejmowały pomiary twardości metodą Knoopa (HK0,1) z pomocą twardościomierza ZWICK-32 12002 oraz obserwacje struktury próbek. Badania dylatometryczne wykazały [3], że austenit szczątkowy stali NC11LV, zwłaszcza otrzymany po hartowaniu z temperatury 1150°C jest bardzo trwały. Dlatego pokazano również zmiany profilów twardości po czterogodzinnym odpuszczaniu próbek w temperaturze 480°C, zakładając, że temperatura azotowania jonowego tej stali znajduje się nieco poniżej. W dalszych badaniach oceniano wpływ odkształcania powierzchniowego warstwy wierzchniej na skutki azotowania jonowego.

Na rys. 5 pokazano rozkłady twardości próbek ze stali NC11LV o różnej strukturze osnowy, nagniatanych w różnych warunkach. Z rysunku wynika, że wpływ nagniatania na twardość próbek o martenzytycznej osnowie jest niewielkie. Znikome umocnienie warstwy przy powierzchni wykazała próbka nagniatana przy obciążeniu nagniatąka 400 N (a). Wyraźne umocnienie, wzrastające wraz z obciążeniem, wykazała próbka o austenitycznej osnowie (b).

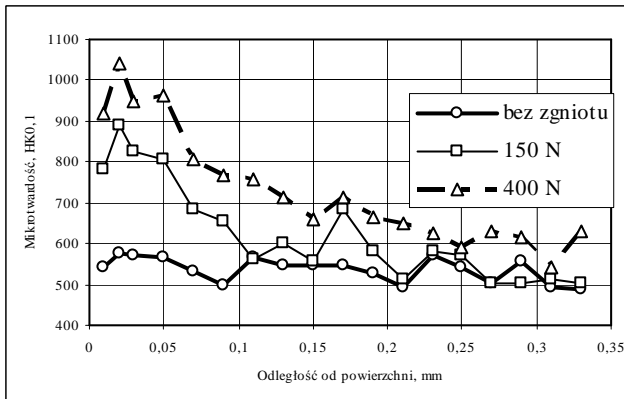
Z porównania charakterystyk wynika, że twardość odkształconego austenitu jest większa od twardości próbki zahartowanej na martenzyt, w sposób tradycyjny. Z badań wynika ponadto, że umocnienie austenitu jest bardzo trwałe, gdyż twardość warstwy wierzchniej, choć została

obniżona o około 150 jednostek HK0,1, jeszcze po czterogodzinnym wytrzymywaniu w temperaturze 480°C (rys. 6b), przekraczała twardość próbek zahartowanych konwencjonalnie. Spadek twardości próbek zahartowanych na martenzyt był w tym przypadku nieco mniejszy (rys. 6a).

a)



b)

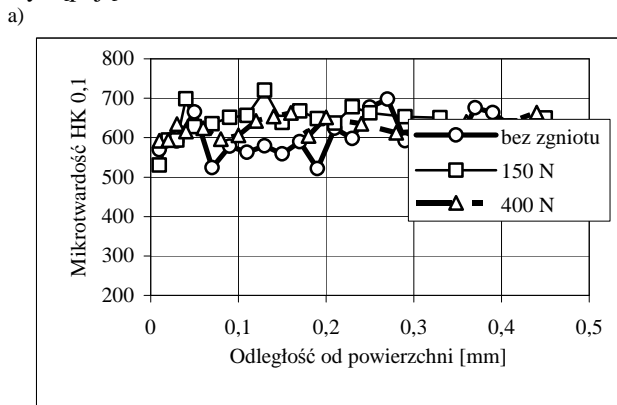


Rys. 5. Wpływ nagniatania na twardość warstwy wierzchniej stali NC11LV po hartowaniu z temperatury 1020°C (a) i 1150°C (b)

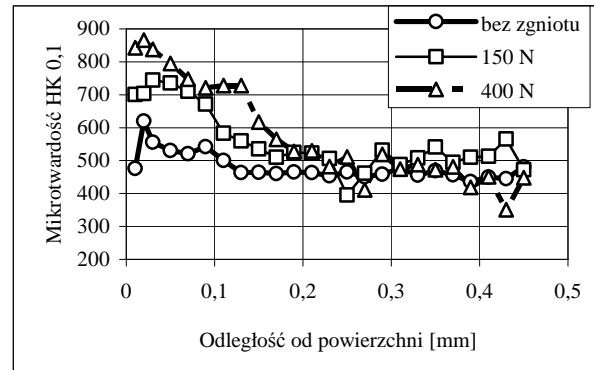
Fig. 5. Influence of the burnishing on the hardness of surface layer of NC11LV steel after hardening from 1020°C (a) and 1150°C (b)

Na rys. 7 i 8 pokazano struktury próbek ze stali NC11LV zahartowanych z różnej temperatury i nagniatanych przy obciążeniu 400 N. Z rysunków wynika, że zmiany struktury po nagniataniu próbki zahartowanej na martenzyt są niewielkie (rys. 7), natomiast odpowiednie zmiany próbki zahartowanej z wysokiej temperatury (rys. 8) są bardzo wyraźne; w strefie zgniotu pojawia się struktura płytkowa, co wiąże się prawdopodobnie z częściową przemianą austenitu w martenzyt.

Różnice strukturalne nagniatanych warstw widać wyraźnie na zdjęciach z mikroskopu skaningowego (rys. 9 i 10). Warstwa próbki zahartowanej z temperatury 1020°C (rys. 9) zawiera drobny martenzyt i węgliki. Duże pierwotne węgliki mają niekiedy pęknięcia. W warstwie próbki zahartowanej z wyższej temperatury (rys. 10), w odkształconych ziarnach austenitu, widoczne są pasma poślizgów i powstałe podczas odkształcania płytki martenzytu, a pęknięcia węglików pierwotnych prawie nie występują.

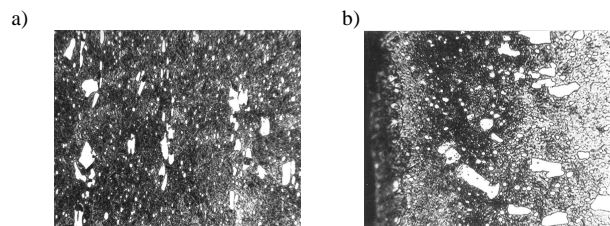


b)



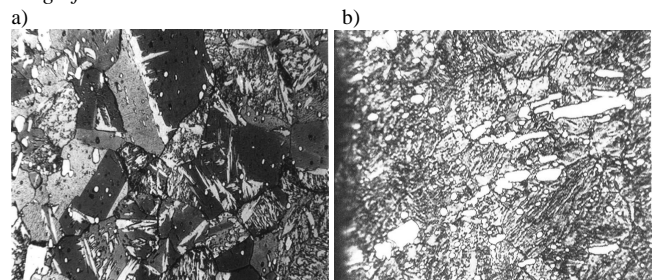
Rys. 6. Wpływ nagniatania na twardość warstwy wierzchniej stali NC11LV po hartowaniu z temperatury 1020°C (a) i 1150°C (b) i po czterogodzinnym odpuszczaniu w temperaturze 480°C

Fig. 6. Influence of the burnishing on the hardness of surface layer of NC11LV steel after hardening from 1020°C (a) and 1150°C (b) and after tempering at 480°C, 4 h



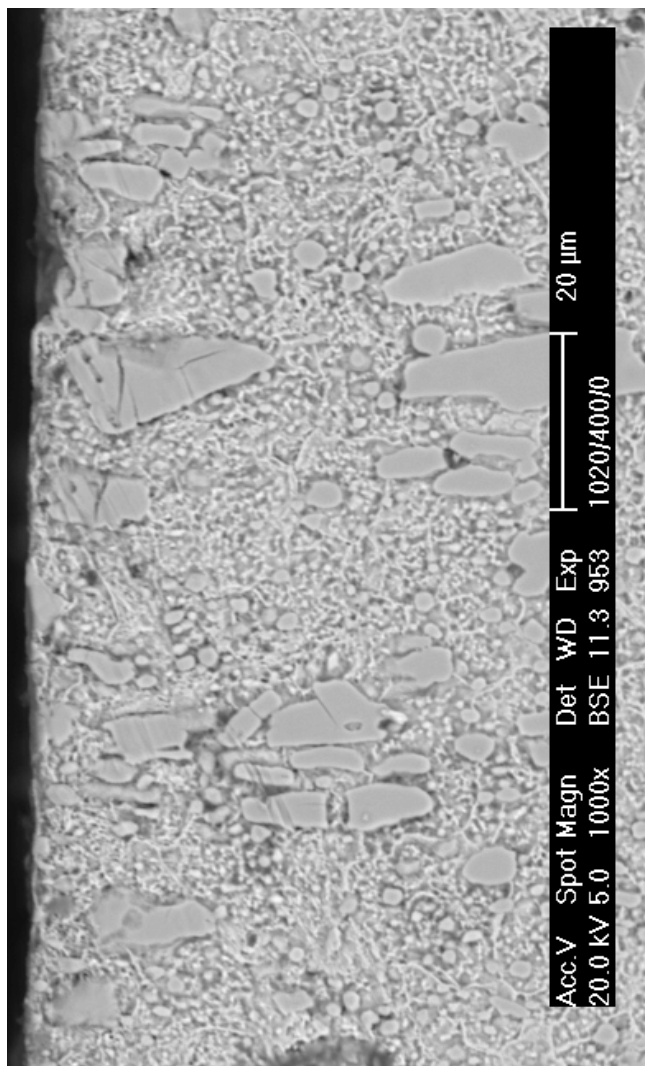
Rys. 7. Struktura warstwy wierzchniej stali NC11LV zahartowanej a temperatury 1020°C (a) i dodatkowo nagniatanej (b). Pow. 500 x

Fig. 7. Structure of the surface layer of NC11LV steel hardening from 1020°C (a), and hardening and burnishing (b). Magnification 500 x

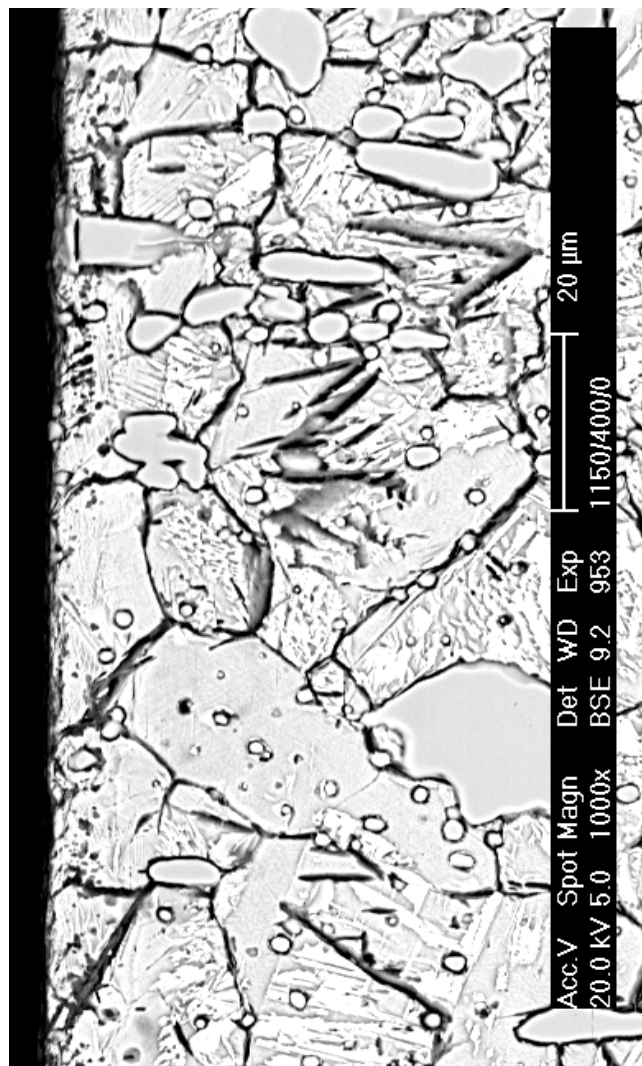


Rys. 8. Struktura warstwy wierzchniej stali NC11LV zahartowanej a temperatury 1150°C (a) i dodatkowo nagniatanej (b). Pow. 500 x

Fig. 8. Structure of the surface layer of NC11LV steel hardening from 1150°C (a), and hardening and burnishing (b). Magnification 500 x



Rys. 9. Struktura warstwy wierzchniej stali NC11LV zahartowanej a temperatury 1020°C (a) i dodatkowo nagniatanej z siłą 400 N (b). Mikroskop skaningowy  
*Fig. 9. Structure of the surface layer of NC11LV steel hardening from 1020°C (a), and hardening and burnishing - power 400 N (b). Scanning microscope*



Rys. 10. Struktura warstwy wierzchniej stali NC11LV zahartowanej a temperatury 1150°C (a) i dodatkowo nagniatanej z siłą 400 N (b). Mikroskop skaningowy  
*Fig. 10. Structure of the surface layer of NC11LV steel hardening from 1150°C (a), and hardening and burnishing - power 400 N (b). Scanning microscope*

#### 4. Podsumowanie wyników badań i wnioski

Obróbka cieplno-plastyczna należy do intensywnych technologii umożliwiających produkcję wyrobów wysokiej jakości. Konieczność komputerowego sterowania procesem sprawia, że wyroby otrzymywane tym sposobem wykazują małą tolerancję wymiarową. Ten sposób produkcji może być stosowany także w inżynierii powierzchni. Wtedy efektem obróbki są korzystne zmiany warstwy wierzchniej przy zachowaniu właściwości rdzenia; takich, jakie uzyskano podczas poprzedniej obróbki.

Niniejsze badania obejmowały nagniatanie stali narzędziowej NC11LV, o dwóch skrajnych, metastabilnych strukturach osnowy (martenzyt i austenit). Badania wykazały, że:

- 1) hartując stal NC11LV z temperatury 1020 i 1150°C można uzyskać dwie pseudo dwufazowe struktury: martenzyt z niewielką ilością austenitu szczątkowego oraz austenit plus śladowe zawartości fazy  $\alpha$ ,
- 2) austenit szczątkowy, otrzymany po zahartowaniu stali z wyższej temperatury jest bardzo trwały,
- 3) wpływ nagniatania próbki zahartowanej na martenzyt jest niewielki, natomiast próbki, w której dominującą strukturą jest austenit – znaczący,
- 4) czterogodzinne wytrzymywanie takiej próbki (o osnowie austenitycznej) umocnionej zgniotem, spowodowało niewielki spadek twardości; ostatecznie twardość próbki była zbliżona do twardości stali zahartowanej na martenzyt.

Duża stabilność austenitycznej osnowy stali NC11LV, także umocnionej zgniotem, jest poznawczo interesująca i wymaga dalszych badań. Chodzi nie tylko o dokładną ocenę wpływu czasu i temperatury na właściwości

nagniatanej stali, ale również o ocenę wpływu cyklicznego obciążenia, symulującego działanie sił podczas eksploatacji wyrobów, zwłaszcza narzędzi, na własności użytkowe.

## 5. Literatura

- [1] Berkowski L.: Analiza wpływu umocnienia cieplno-plastycznego na strukturę i własności wyciskanych na gorąco stali narzędziowych. INOP, Poznań 1981, s. 174, 57 rys., 13 tab., bibliogr. 282.
- [2] Berkowski L., Borowski J.: Wpływ struktury na skutki azotowania chromowych stali ledeburtycznych. 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.
- [3] Berkowski L., Wierszyłowski I.: Wpływ struktury na skutki azotowania chromowych stali ledeburtycznych. 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., Rybak Z., Stefko A.: Wpływ struktury na skutki azotowania chromowych stali ledeburtycznych. Część V: Odształceniowe umacnianie warstwy wierzchniej hartowanej stali NC11LV. Obróbka Plastyczna metali. 2008. t. 19, (w druku).