



## Wpływ obróbki cieplnej na mikrostrukturę i własności stali narzędziowej stopowej do pracy na zimno NC10

M. Kałużna <sup>a</sup>, B. Krupińska <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Doktorantka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny,  
email: magdalena.kaluzna@polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny,  
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów  
Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie,  
email: beata.krupinska@polsl.pl

**Streszczenie:** Celem niniejszej pracy było określenie wpływu parametrów obróbki cieplnej na mikrostrukturę i własności stali stopowej do pracy na zimno NC10.

W części badawczej przeprowadzono pomiary twardości metodą Rockwella HRC, obserwacje mikrostruktury z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej i skaningowej, jakościową analizę chemiczną węglików pierwotnych (EDS) oraz rentgenowską jakościową analizę fazową.

**Abstract:** The aim of this work was to determine the effect of heat treatment parameters on the microstructure and properties of the cold work tool steel NC10.

The research part it performed hardness measurements by the Rockwell method, HRC, a microstructural analysis by light microscopy and scanning electron microscopy (SEM) and qualitative chemical analysis of primary carbides (EDS) and X-ray qualitative phase analysis.

**Słowa kluczowe:** obróbka cieplna, stal narzędziowa NC10, EDS

### 1. WSTĘP

Poprzez zmianę struktury metalu, możliwa jest zmiana nie tylko jego własności wytrzymałościowych i plastycznych, ale również własności technologicznych (skrawalność, tłoczność), fizycznych (elektrycznych, magnetycznych) oraz chemicznych (odporność na korozję). Najczęściej stosowaną operacją, mającą wpływ na zmianę struktury materiału metalowego jest obróbka cieplna, wykorzystująca zabiegi grzania oraz chłodzenia, będące motorem napędowym przemian fazowych materiału [1,2].

Pierwsze zabiegi obróbki cieplnej wykonywane były około 2000 lat p.n.e. [3]. Z biegiem lat doświadczenie wykorzystywania obróbki cieplnej pogłębiało się, aż do momentu gdy stała się ona integralną częścią współczesnych procesów wytwórczych [1].

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania twardości oraz badania mikrostruktury stali narzędziowej NC10 (na każdym z etapów obróbki cieplnej), która stosowana jest do wytwarzania nagłowników<sup>1</sup>.

Nagłownik montowany jest w gnieździe imaka maszyny zwanej kuźniarką, a wykonany ze stali NC10 jest narzędziem przystosowanym do pracy w kuźniarce OMEGA RC23-A model „O”. Jego zadaniem jest formowanie ostateczne główki styku nitowego bimetalowego w wyniku działania siły na spęczony wstępnie styk.

Ze względu na wymagania stawiane nagłownikom, tj.:

- odporność na ścieranie;
  - dobra ciągliwość;
  - wysoka udarność,
  - odporność na odkształcenia plastyczne;
- do ich wytwarzania stosowane są stale stopowe specjalne, w tym narzędziowa stal do pracy na zimno NC10, która po obróbce cieplnej spełnia powyższe wymagania.

## 2. MATERIAŁ DO BADAŃ

Materiałem do badań była wysokochromowa, ledeburtyczna stal narzędziowa stopowa do pracy na zimno NC10, charakteryzująca się wysoką zawartością węgla i chromu, wpływających na obniżoną skłonność narzędzi do odkształceń i pęknięć hartowniczych, wysoką twardość hartowanych narzędzi ( $HRC \geq 62$ ) oraz znaczną odporność na ścieranie (dodatkowo może zawierać takie pierwiastki stopowe jak Ni, Mo, W i V). Chrom sprzyja również tworzeniu się w stali węglików stopowych, które zwiększają odporność narzędzi na ścieranie, obniża temperaturę przemiany martenzytycznej oraz powoduje spadek twardości materiału po odpuszczaniu [1,4,5].

Skład chemiczny stali narzędziowej NC10 przedstawiony został w tablicy 1 [6].

Tablica 1.

Skład chemiczny stali narzędziowej do pracy na zimno NC10 [6]

Gatunek stali	Skład chemiczny [%]					
	Cr	C	Mn	Si	P	S
NC10	11-13	1,5-1,8	0,15-0,45	0,15-0,4	MAX 0,03	MAX 0,03

## 3. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO BADAŃ

Przygotowanie próbek do badania twardości oraz określania mikrostruktury polegało na wykonaniu następujących czynności:

- pobranie próbek poprzez przecinanie prętów;
- przygotowanie próbek do operacji obróbki cieplnej poprzez toczenie oraz ich znakowanie;
- obróbka cieplna próbek;
- przygotowanie próbek do badania twardości (szlifowane oraz polerowanie) oraz

<sup>1</sup> Narzędzia do obróbki plastycznej na zimno, wykorzystywane w Zakładzie Przetwórstwa Metali „INMET”

wykonanie zglądów metalograficznych (szlifowane, polerowanie, trawienie chemiczne uniwersalnym odczynnikiem do stopów żelaza - Nitalem (Mi1Fe)).

## Obróbka cieplna

W tablicy 2 zostały przedstawione parametry obróbki cieplnej stali NC10 wraz z uzyskaną twardością stali, natomiast w tablicy 3 przedstawiono sposób wykonywania obróbki cieplnej dla stali NC10 w ramach niniejszej pracy.

Tablica 2.

Parametry obróbki cieplnej stali NC10 wraz z minimalną twardością uzyskaną po jej przeprowadzeniu, wg PN-86/H-85023

Gatunek stali	Parametry obróbki cieplnej	Twardość w stanie	
		hartowanym	hartowanym i odpuszczonym
NC10	Hartowanie 980±1000, olej Odpuszczanie 220±450, olej	min 60 HRC	min 58 HRC

Tablica 3.

Parametry obróbki cieplnej stali NC10 stosowanej na nagłowniki

Gatunek stali	Parametry obróbki cieplnej	Temperatura [°C]	Ośrodek chłodzący	Czas nagrzewania [min]	Czas wygrzewania [min]	Czas chłodzenia [min]
NC10	Hartowanie	980	olej	10	15	3
	Odpuszczanie niskie	250	powietrze	120		60

Obróbka cieplna stali narzędziowej NC10 polegała na austenitzowaniu próbek w piecu komorowym z elementami grzejnymi w postaci skrętki, którego temperatura komory roboczej wynosiła 980°C, chłodzeniu z szybkością większą od krytycznej w oleju o temperaturze pokojowej, ze względu na wysoką zawartość chromu przy stężeniu węgla powyżej 1% (chrom wpływa na zmniejszenie szybkości krytycznej hartowania) oraz niskim odpuszczaniu w piecu syilitowym w temperaturze 250°C w celu usunięcia naprężeń hartowniczych bez utraty wysokich własności wytrzymałościowych oraz uzyskania wysokiej twardości i udarności. Następnie próbki studzono na powietrzu.

## 4. PRZEBIEG BADAŃ

### 4.1. Badanie twardości

W niniejszej pracy jednym z kryteriów oceny poprawnie wykonanej obróbki cieplnej stali, było badanie twardości przygotowanych wcześniej próbek NC10, zmian ich wartości i zgodności z wymaganiami technologicznymi wytwarzania nagłowników.

W ramach pracy wykonano pomiary twardości metodą Rockwella wg PN-EN ISO 6508-1:2002, na twardościomierzu Rockwella ZWICK ZHR.

Pomiar twardości wykonano na trzech próbkach stali NC10, według następujących zasad:

- 8 pomiarów na każdej próbce;
- odległość między środkami dwóch sąsiadujących ze sobą odcisków była większa od czterokrotnej średnicy odcisku (jednak nie mniejsza niż 2mm)
- odległość między środkiem odcisku a krawędzią próbki była 2,5 razy większa od średnicy odcisku (jednak nie mniejsza od 1mm).

Wyniki prób twardości dla stali NC10 zestawiono w tablicach 4-10, a na ich podstawie obliczono następujące parametry statystyczne: średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe, wariancję, które następnie zestawiono w tablicy 7.

## 4.2. Badania metalograficzne

Drugim kryterium oceny prawidłowości wykonania obróbki cieplnej stali była analiza jej struktury.

Struktura jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o właściwościach metali i stopów, dlatego wykorzystując metalograficzne badania makro- i mikroskopowe możliwe jest określenie ich cech charakterystycznych, składników oraz wad, których analiza pozwala ustalić jakość badanego materiału czy też kształtować własności materiału jak i wytwarzanego z niego wyrobu poprzez zmiany technologii ich produkcji.

Wykorzystano mikroskopową analizę strukturalną, w której do obserwacji, rozpoznawania i oceny mikrostruktury, w tym ustalenia ewentualnie występujących w niej wad, wykorzystuje się mikroskopy generujące powiększenia od 50 do 100 000x w zależności od ich rodzaju.

Do obserwacji struktury mikroskopowej próbek wykorzystano dwa rodzaje mikroskopów:

- mikroskop metalograficzny świetlny (optyczny) w zakresie powiększeń od 50÷1000x;
- mikroskop skaningowy (elektronowy) w zakresie powiększeń do 10000x.

Dzięki obserwacji wytrawionych zglądów możliwe było określenie struktury badanych stali w stanie dostawy, po hartowaniu jak i utwardzaniu cieplnym, stwierdzenie występowania nieciągłości materiałowych, czy obserwacji ziarn i ich granic.

Badania struktury wykonano przy użyciu:

- mikroskopu świetlnego firmy OLYMPUS typu GX 71;
- mikroskopu świetlnego firmy NIKON typu EPIPHOT 200;
- mikroskopu skaningowego firmy FEI Company typu INSPECT F.

Aby poprawnie określić rodzaj składników strukturalnych oraz ich skład chemiczny wykonano jakościową analizę chemiczną węglików pierwotnych (EDS) oraz rentgenowską jakościową analizę fazową.

## 5. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

### 5.1. Badanie twardości stali NC10

W wyniku badań twardości uzyskano wyniki zestawione w tablicach 4-6. Na ich podstawie obliczono parametry statystyczne odrzucając dwa skrajne wyniki (tab. 7).

Tablica 4.

Pomiar twardości próbki NC10-S7 w stanie wyżarzonym

Próbka NC10-S7 – wyżarzona zmiękczająco									
Nr próby		1	2	3	4	5	6	7	8
Jednostka twardości	HRC	<u>17,4</u>	17,1	<u>15,6</u>	16,2	16,9	15,8	15,7	15,7
	HV	<u>217</u>	215	<u>204</u>	208	214	206	205	205

Tablica 5.

Pomiar twardości próbki NC10-H2 w stanie hartowanym

Próbka NC10-H2 – hartowana (980°C)									
Nr próby		1	2	3	4	5	6	7	8
Jednostka twardości	HRC	66,3	<u>66,2</u>	<u>66,4</u>	66,4	66,4	66,2	66,4	66,3
	HV	867	<u>864</u>	<u>870</u>	870	870	864	870	867

Tablica 6.

Pomiar twardości próbki NC10-O8 w stanie hartowanym i nisko odpuszczonym

Próbka NC10-O8 – hartowana (850°C) i nisko odpuszczona (250°C)									
Nr próby		1	2	3	4	5	6	7	8
Jednostka twardości	HRC	<u>57,9</u>	58,2	58,5	58,4	<u>58,6</u>	58,6	58,6	58,6
	HV	<u>656</u>	662	667	665	<u>669</u>	669	669	669

Tablica 7.

Parametry statystyczne twardości stali NC10

Jednostka twardości	Średnia arytmetyczna	Odchylenie standardowe	Wariancja
<b>Próbka NC10-S7</b>			
HRC	16,2	0,571	0,326
HV	208,8	4,14	17,139
<b>Próbka NC10-H2</b>			
HRC	66,3	0,075	0,006
HV	868	2,236	5
<b>Próbka NC10-O8</b>			
HRC	58,5	0,146	0,021
HV	666,8	2,609	6,807

W stanie zmiękczonej stal NC10 wykazuje obniżoną twardość wynoszącą 16,2 HRC (208,8 HV). Po hartowaniu nastąpił 309% wzrost twardości (66,3 HRC - 868 HV) czyli w porównaniu do stanu po wyżarzaniu zmiękczającym jest to czterokrotnie wyższa twardość, spowodowana powstaniem w strukturze martenzytu.

Następnie w wyniku niskiego odpuszczania twardość obniżyła się o 11,8%, uzyskano wartość na poziomie 58,5 HRC (666,8 HV). Twardość obniżyła się o 7,8 jednostek HRC, stal

nadal wykazuje wysoką twardość, a naprężenia pohartownicze zostały usunięte i otrzymano martenzyt odpuszczony.

Twardość ta jest niższa od twardości wymaganej ( $60\div 62$  HRC) dla nagłownika w procesie technologicznym jego wytwarzania, jednak mieści się w granicy określonej normą, która określa minimalną twardość po hartowaniu i odpuszczaniu dla stali NC10 w wysokości 58 HRC. Może to wynikać ze zbyt długiego czasu odpuszczania, wynoszącego 2 godziny lub wysokością jego temperatury.

Analizując wartości odchylenia standardowego stwierdzono, że próbki na całej swojej powierzchni mają zbliżoną twardość, ich wartości odbiegają od wartości średniej twardości o około  $\pm 1$  HRC. Oznacza to, że obróbka cieplna wykonana została prawidłowo, próbki nagrzewały się i chłodziły równomiernie, otrzymano jednolitą strukturę w całym przekroju próbki.

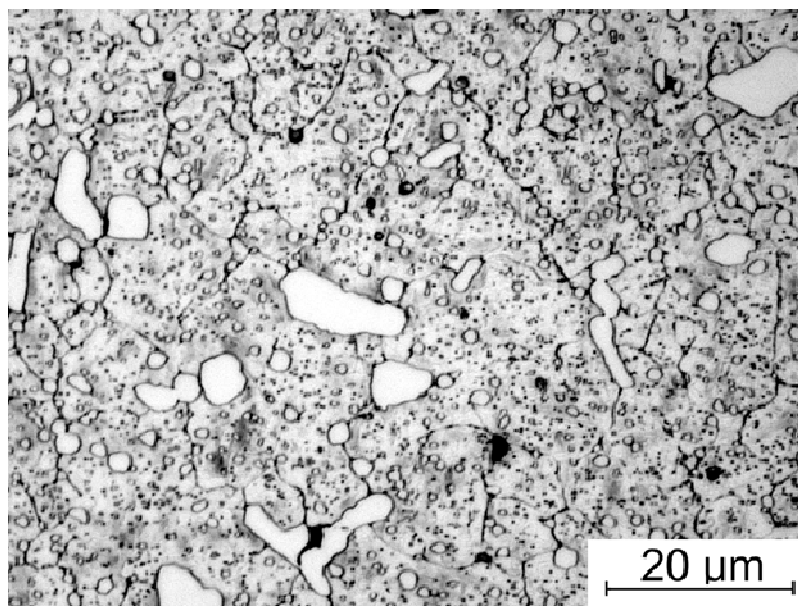
## 5.2. Badanie mikrostruktury

Na rysunku 1 przedstawiona została mikrostruktura stali NC10 w stanie wyżarzonym zmiękczająco. Wyżarzanie zastosowane było ze względu na dużą niejednorodność oraz twardość stali po obróbce plastycznej na gorąco w procesie produkcji stali. Po zmiękczeniu strukturę stali stanowi sferoidyt (cementyt kulkowy) na tle osnowy ferrytycznej, grube węgliki pierwotne (wydzielone ze stanu ciekłego w wyniku krzepnięcia stali, powstałe podczas rozbijania ledeburytu w wyniku kucia wlewka) co potwierdza, uzyskany w wyniku przeprowadzenia rentgenowskiej analizy fazowej, dyfraktogram.

Po austenityzowaniu stali NC10 w temperaturze  $980^{\circ}\text{C}$  strukturę stanowi skrytoiglasty martenzyt, austenit szczątkowy oraz skoagulowane węgliki pierwotne rozmieszczone równomiernie w osnowie (węgliki wtórne przeszły do roztworu) (rys. 2). Nierozpuszczone podczas austenityzowania węgliki utrudniły rozrost ziarn austenitu.

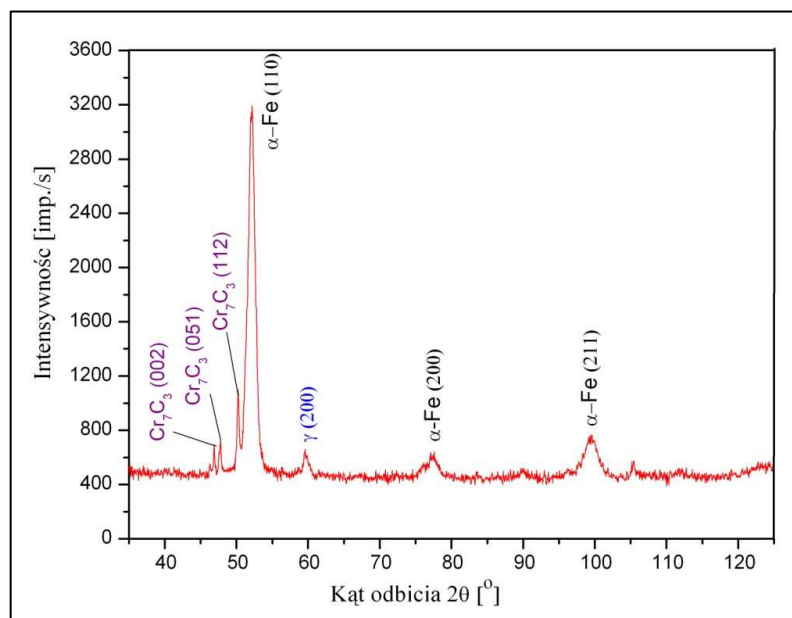


Rys. 1. Stal NC10 wyżarzona zmiękczająco: sferoidyt, węgliki pierwotne oraz drugorzędowe



Rys. 2. Stal NC10 hartowana z temperatury 980°C w oleju: martenzyt skrytoiglasty, austenit szczątkowy, węgliki pierwotne

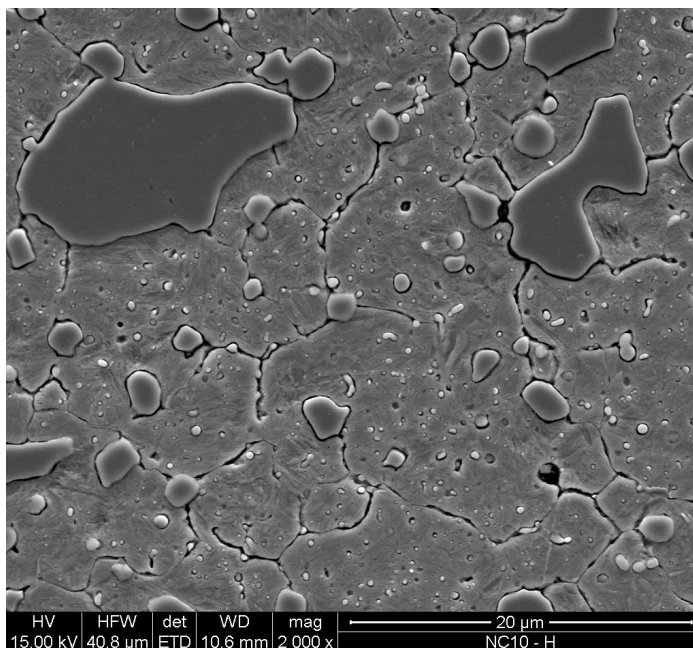
Analiza dyfraktogramu (rys. 3) stanowiła podstawowe kryterium określenia powyższych składników strukturalnych stali NC10. Po hartowaniu w stali pozostał austenit szczątkowy (stanowiący spoiwo dla płytek martenzytu oraz węglików), zarejestrowany na dyfraktogramie, natomiast nierozpoznawalny podczas obserwacji mikrostruktury na mikroskopie świetlnym czy skaningowym.



Rys. 3. Dyfraktogram składu fazowego próbki ze stali NC10 w stanie hartowanym

Wykorzystanie mikroskopu skaningowego pozwoliło uzyskać zdjęcia mikrostruktur stali NC10 o znacznie większej głębi ostrości przy większych powiększeniach niemożliwych do uzyskania na mikroskopie świetlnym.

Zaobserwowano granice ziarn byłego austenitu oraz licznie występujące węgliki, które nie rozpuściły się podczas austenitowania (rys. 4).

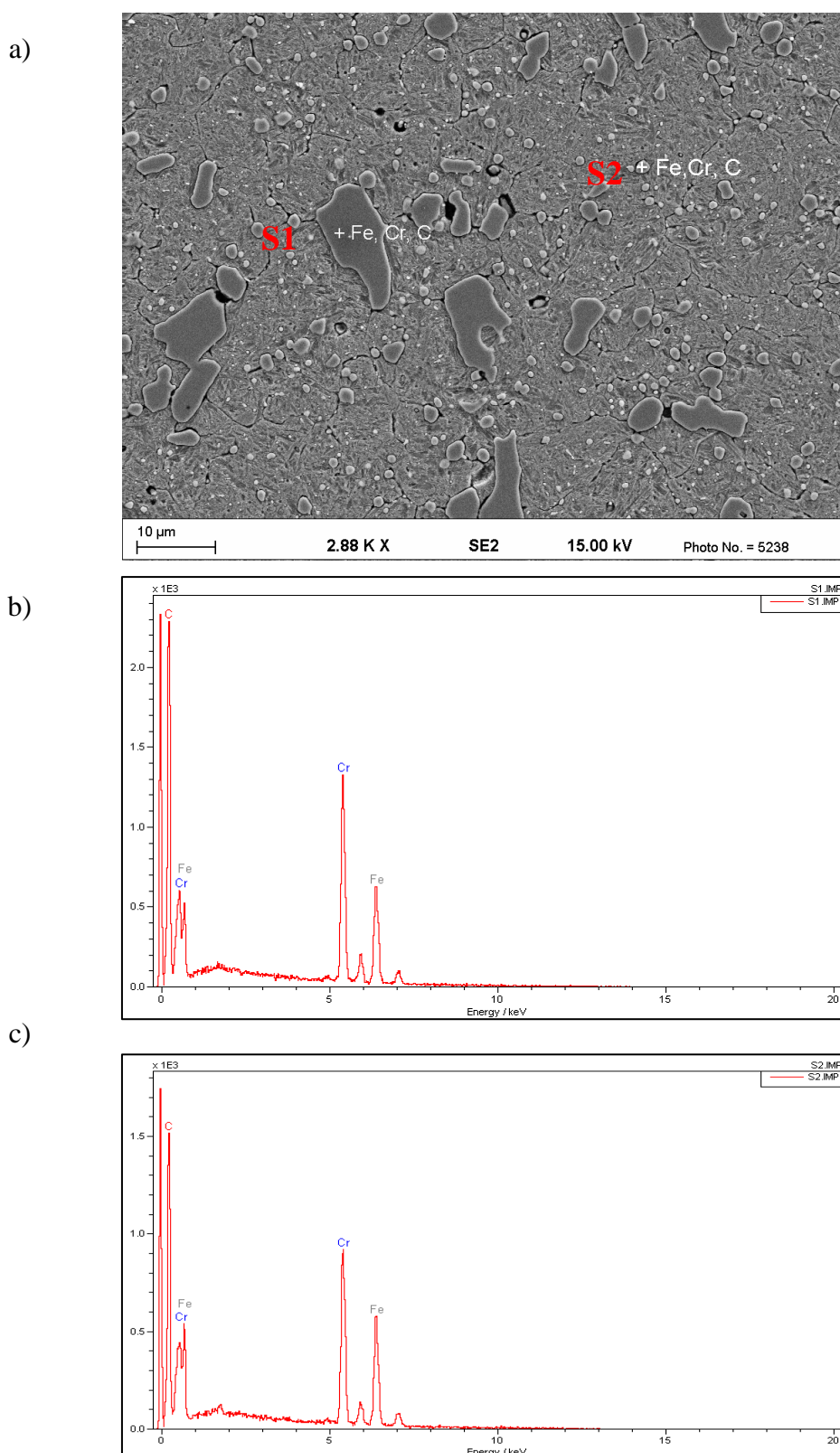


Rys. 4. Stal NC10 hartowana z temperatury 980°C w oleju, widoczne granice ziarn byłego austenitu

Zastosowanie rentgenowskiej analizy składu chemicznego w mikroobszarach (EDS) z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego elektronowego LEO GEMINI 1525 z mikroanalizatorem rentgenowskim Roentec, umożliwiło wykonanie analizy chemicznej węglików występujących w stali NC10. Podstawową fazę węglkową stanowią: węglik  $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$  (cementyt z rozpuszczonym chromem) oraz węglik chromu z rozpuszczonym żelazem  $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$  należący do grupy węglików złożonych i oznaczany jako  $\text{M}_7\text{C}_3$ , wynika to z wykresu występowania faz w stopach żelazo-węgiel-chrom przy zawartości węgla około 1,6% oraz chromu ok. 12%. Nie wykryto innych pierwiastków stopowych węglkotwórczych.

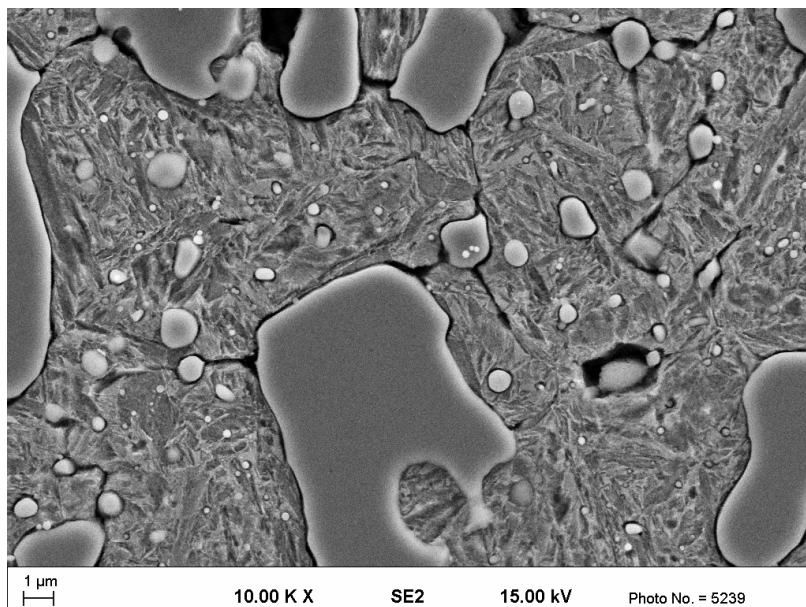
Na rysunku 5 przedstawiono mikrostrukturę stali NC10 po hartowaniu w powiększeniu 2880x z oznaczeniami składu chemicznego zbadanych węglików oraz wykresy uzyskane dzięki mikroanalizie punktowej składu chemicznego (EDS).





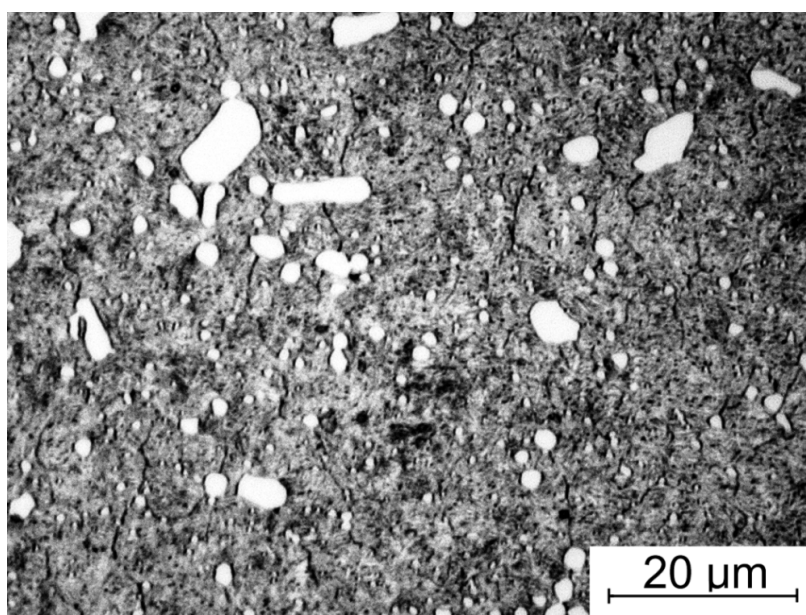
Rys. 5. Analiza chemiczna węglików stali NC10 po hartowaniu: a) skład chemiczny wybranych węglików, trawiono Nital; b) i c) wykresy analizy punktowej składu chemicznego węglików pierwotnych

Najdrobniejsze węgliki wchodzące w skład struktury hartowanej stali NC10 mają średnicę mniejszą od 200 nm (rys. 6).



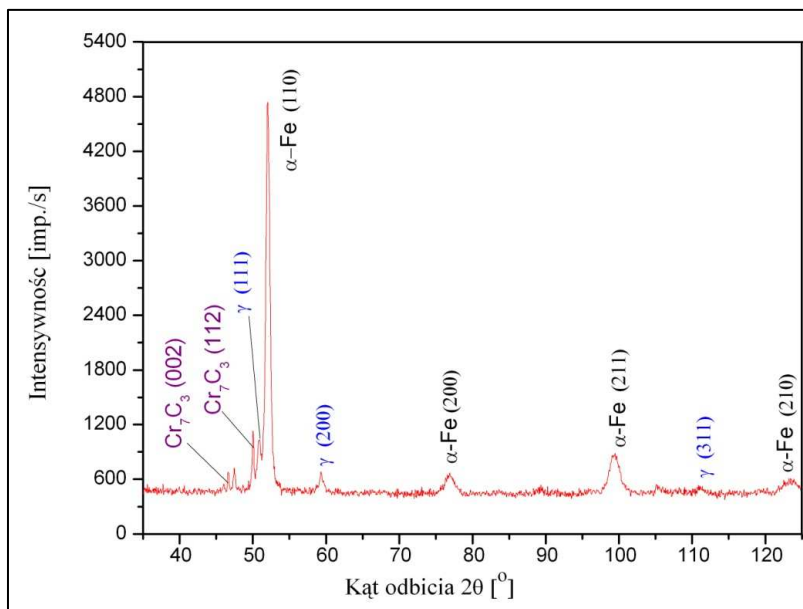
Rys. 6. Mikrostruktura stali NC10 po hartowaniu, trawiono Nitaliem

Rysunek 7 przedstawia mikrostrukturę stali NC10 po hartowaniu w temperaturze 980°C oraz odpuszczaniu w temperaturze 250°C. Strukturę stanowi trawiący się na czarno odpuszczony martenzyt, austenit szczątkowy oraz węgliki pierwotne (mniejszy udział niż w przypadku stali hartowanej).



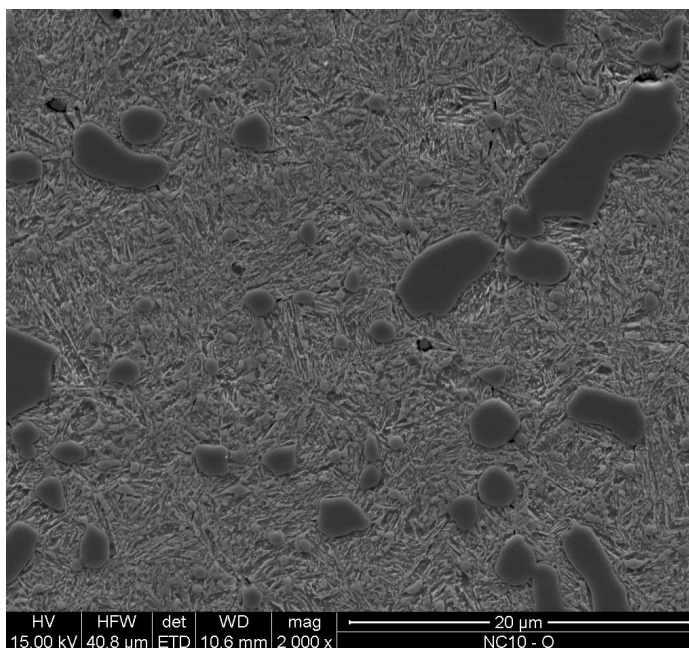
Rys. 7. Stal NC10 hartowana z temperatury 980°C w oleju i odpuszczana z 250°C na powietrzu: martenzyt odpuszczony, austenit szczątkowy, węgliki pierwotne

Rentgenowska jakościowa analiza fazowa ujawniła w mikrostrukturze stali NC10 utwardzanej cieplnie większą w stosunku do stali hartowanej zawartość austenitu szczątkowego (rys. 8).



Rys. 8. Dyfraktogram składu fazowego próbki ze stali NC10 w stanie utwardzonym cieplnie

W wyniku odpuszczania skrytoiglasty martenzyt uległ przekształceniu w martenzyt odpuszczony w postaci drobnolistwowej (rys. 9).



Rys. 9. Stal NC10 hartowana z temperatury 980°C w oleju oraz odpuszczona z 250°C na powietrzu

## 6. PODSUMOWANIE

Podobnie jak w przypadku wielu innych znanych nam stali, przydatność technologiczna stali narzędziowych zależy od ich własności wytrzymałościowych. Oznacza to konieczność zmiany ich struktury poprzez zastosowanie obróbki cieplnej.

Badania mikroskopowe zglądów stali NC10 ujawniły różnice jej mikrostruktury na każdym z etapów obróbki cieplnej. W wyniku zastosowania utwardzania cieplnego uzyskano strukturę martenzytu odpuszczonego z pierwotnymi węglkami chromu typu  $M_7C_3$ .

Temperatura austenitowania stali NC10 w zakresie niższych temperatur stosowanych przy obróbce cieplnej stali narzędziowych (do  $30^\circ\text{C}$  powyżej linii  $A_{c_{cm}}$ ) umożliwiła częściowe rozpuszczenie węglków pierwotnych, które wzbogaciły osnowę w węgiel oraz dodatki stopowe oraz ograniczyła występowanie austenitu szczątkowego, dzięki czemu stal uzyskała twardość na poziomie 66,3 HRC.

Stal NC10 w wyniku hartowania z temperatury  $980^\circ\text{C}$  uzyskała twardość 66,3 HRC, czyli nastąpił 309% wzrost twardości stali wyżarzanej zmiękczająco (16,2 HRC), a następnie spadek twardości w wyniku niskiego odpuszczania z temperatury  $250^\circ\text{C}$ , w wyniku którego twardość obniżyła się o 11,8% uzyskując wartość 58,5 HRC; otrzymana twardość zapewnia prawidłową pracę nagłownika, który swoją powierzchnią czołową ma za zadanie kształtować główkę styku.

## LITERATURA

1. L. A. Dobrzański, Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Gliwice - Warszawa 2006
2. D. Szewieczek, T. Karkoszka, B. Krupińska, M. Roszak, Wprowadzenie do projektowania procesów obróbki cieplnej metali i stopów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009
3. T. Burakowski, Z lamusa historii obróbki cieplnej, Przegląd Mechaniczny, 1 (2000) 21-24
4. L. Berkowski, J. Borowski, Wpływ struktury na skutki azotowania chromowych stali ledeburyticznych. Cz. 3 Warunki obróbki cieplnej stali NC10, Obróbka Plastyczna Metali, 1/18 (2007) 23-33
5. L. Berkowski, Wpływ struktury na skutki azotowania chromowych stali ledeburyticznych. Część 1. Informacje o materiale do badań, Obróbka Plastyczna Metali, 5/16 (2005) 5-15
6. PN-86/H-85023, Stal narzędziowa stopowa do pracy na zimno – Gatunki