

JAN ADAMCZYK, TADEUSZ ŚWIERZ

Katedra Metaloznawstwa

WPLYW PARAMETRÓW OBRÓBKİ CIEPLNEJ  
NA UDARNOŚĆ STALI NIKLOWO-WANADOWEJ

Streszczenie. Przeprowadzono badania wpływu parametrów hartowania i odpuszczania na udarność stali konstrukcyjnej stopowej niklowo-wanadowej. Określono wpływ temperatury hartowania, ośrodka chłodzącego i temperatury odpuszczania w zakresie 600 do 700°C na udarność i twardość stali.

1. Wstęp

Stale konstrukcyjne stopowe stosowane są jedynie w przypadku, gdy użycie stali węglowej jest ograniczone względami konstrukcyjnymi jak np. ciężkie warunki pracy, duże obciążenia oraz mały przekrój elementu konstrukcyjnego, konieczność wystąpienia jednorodnej struktury w dużym przekroju itp. W celu ekonomicznego wykorzystania tworzywa droższego od stali węglowych, stale stopowe należy stosować tylko w stanie ulepszonym cieplnie. W porównaniu jednak do stali węglowych stale stopowe wymagają znacznie starszego doboru parametrów obróbki cieplnej. W przeciwnym razie może wystąpić tutaj niekorzystny spadek własności mechanicznych, będący często przyczyną zniszczenia elementu konstrukcyjnego.

2. Przegląd piśmiennictwa

Wprowadzenie do stali dodatków stopowych jak nikiel i wanad znacznie zmienia jej własności. Zarówno Ni jak i V zmniejszają krytyczną szybkość chłodzenia, co umożliwia hartowanie stali niklowo-wanadowych w ośrodkach o małej intensywności odprowadzenia ciepła oraz uzyskanie jednorodnej

struktury w przedmiotach o dużym przekroju [1, 2]. Nikiel ponadto tworzy z żelazem roztwór stały podwyższając własności mechaniczne ferrytu, zmniejsza zawartość węgla w perlicie, obniża temperatury przemian  $A_1$  i  $A_3$ , przez co poszerza pole austenitu oraz nie wchodzi w stali w związki z węglem.

Wanad wprowadzony do czystego żelaza również podwyższa własności mechaniczne ferrytu, natomiast jako dodatek stopowy w stali wyżarzanej lub normalizowanej szczególnie w małych ilościach powoduje nawet obniżenie jej twardości i wytrzymałości na skutek wystąpienia trudno topliwych węglików i azotków [3]. W stalach występują zwykle węgliki  $V_4C_3$  i VC o sieci kubicznej typu Na Cl. Węglik  $V_4C_3$  - stabilny (o największej ilości pustych miejsc w sieci nie wypełnionych atomami C) występuje już przy nieznacznej zawartości wanadu, przy czym może on istnieć niezależnie od  $Fe_3C$ . VC - o budowie idealnej występuje zazwyczaj przy większych zawartościach wanadu. Prawdopodobnie występuje jeszcze  $V_5C$  i  $V_2C$  [4,5] lecz zdania odnośnie ich istnienia są podzielone [6,7].

Początkowo przypuszczano, że przemiany w stalach z wanadem zachodzą podobnie jak w stalach węglowych, gdyż uważano, że węglik wanadu nie rozpuszcza się nawet w wysokich temperaturach. Jednak badania MAUERA [3] oraz szereg innych prac wykazały, że węglik wanadu uczestniczy w procesie hartowania stali. Hartowanie z niskich temperatur, przy których węglik wanadu nie przeszedł do roztworu, prowadzi do uzyskania własności stali wanadowej odpowiadających własnościom stali węglowej o niższej zawartości węgla. W stanie normalizowanym i wyżarzonym twardość tej stali jest nawet niższa od węglowej, gdyż węgliki wanadu posiadają budowę ziarnistą zaś cementyt płytkową. Hartowanie z temperatur normalnych ( $30 \div 50$  powyżej  $A_{c3}$ ) przejawia się obniżeniem tak twardości powierzchniowej jak i głębokości warstwy zahartowanej. Najwyższą twardość dla stali zawierającej ok. 1% C i 6% V uzyskuje się tylko po hartowaniu z  $1300^\circ C$ . Trudno rozpuszczające się węgliki wanadu i azotki przeciwdziałają rozrostowi ziarna i umożliwiają przeprowadzenie wysokotemperaturowych zabiegów cieplnych. Wydzielanie się przy odpuszczaniu drobno dyspersyjnych węglików wanadu przy hartowaniu z wysokich temperatur, nawet przy stosunkowo powolnym chłodzeniu, warunkuje wysoką twardość stali. Zarodkujące działanie węglików wanadu na przemianę perlityczną pozwala otrzymać niską twardość po kuciu, walcowaniu lub cementacji przedmiotów ze stali wysokostopowych bez dodatkowego wyżarzania, pod warunkiem

powolnego chłodzenia w zakresie tej przemiany [3]. Końcowe hartowanie w tym przypadku należy prowadzić z temperatury nieznacznie wyższej od 30-50°C powyżej Ac<sub>3</sub>.

Stale wanadowe hartowane z wysokich temperatur są odporne na odpuszczanie, tzn. że ze wzrostem temperatury i czasu odpuszczania twardość ich maleje tylko nieznacznie [9]. Właśność ta związana jest z procesem wydziałania się dyspersyjnych węglików wanadu w zakresie temperatur 500-600°C (twardość wtórna). Powoduje to wzrost twardości przewyższający spadek twardości wywołany wydziałaniem się i koagulacją węglika żelaza w zakresie temperatur 200-500°C. Wzrost temperatury odpuszczania powyżej 600°C sprzyja koagulacji węglików wanadu, w wyniku czego twardość w stanie końcowym obniża się do wartości otrzymywanej po wyżarzaniu [10].

### 3. Przebieg badań

Badania przeprowadzono na próbkach udarnościowych wykonanych ze stali niklowo-wanadowej. Skład chemiczny oraz własności mechaniczne stali w stanie wyżarzonym zestawiono w tabelicy 1.

Tablica 1

Skład chemiczny i własności mechaniczne stali

Skład chemiczny w %								R <sub>p1</sub>	R <sub>r</sub>	a <sub>5</sub>	C	U	HV
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	V	kg/ 2	kg/ 2	%	%	kgm/ 2	CH
0,58	0,49	0,29	0,018	0,022	0,05	2,20	0,26	50,2	72,4	20,8	44	1,3- -5,5	200 205

Do badań użyto stal pochodzącą ze zniszczonego wirnika turbogeneratorsa marki Skoda - produkcji CSSR.

Próbki udarnościowe Charpy o wymiarach: 10x10x55 mm z karbem 2 mm - poddano obróbce cieplnej jak w tabelicy 2.

Tablica 2

## Warunki obróbki cieplnej próbek

Nr serii	Hartowanie		Odpuszczanie <sup>x)</sup>	
	Temperatura °C	Ośrodek chłodzący	Temperatura °C	Czas w godz.
A	980 i 920	powietrze	600, 650, 700	2 i 10
B	900	powietrze	600, 650, 700	2 i 10
C	950	powietrze	600, 650, 700	2
D	900	olej	600, 650, 700	2 i 10
E	950	olej	600, 650, 700	2

x) Część próbek każdej serii studzono z temperatury odpuszczania do 400°C z piecem a następnie na wolnym powietrzu, pozostałą część próbek chłodzono bezpośrednio po odpuszczaniu na wolnym powietrzu.

Próby udarności przeprowadzono metodą Charpy na młocie wahadłowym f-my Losenhausen do 30 kGm przy nastawieniu na 30 kGm.

Próby twardości przeprowadzono na aparacie f-my Hauser metodą Vickersa przy obciążeniu 10 kG.

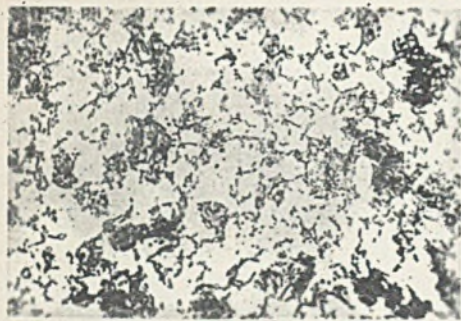
Badania metalograficzne przeprowadzono na mikroskopie optycznym f-my Reichert w zakresie powiększeń od 100 do 1000x. Zgłady do badań wykonano przez szlifowanie ręczne na papierach ściernych i polerowanie mechaniczne. Próbki wypolerowane trawiono 2% roztworem kwasu azotowego w alkoholu n-amyłowym.

#### 4. Wyniki badań

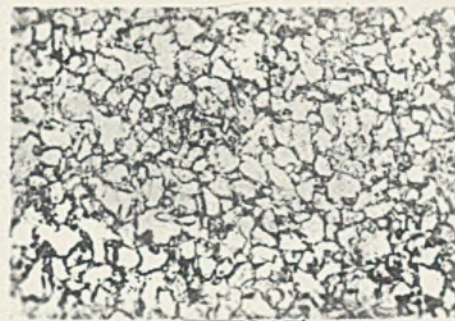
Przeprowadzone badania wykazały znaczny wpływ rodzaju obróbki cieplnej na własności i strukturę stali nikłowo-wanadowej. Dotyczy on przede wszystkim zmiany udarności zarówno w zależności od warunków hartowania, jak i odpuszczania. Wyniki badań mechanicznych (udarności i twardości) zestawiono w tablicy 3, podając wartość średnią z 2÷3 prób.

Zmianom własności mechanicznych w pełni odpowiadają zmiany zachodzące w strukturze stali po różnych zabiegach cieplnych. Charakterystyczne struktury stali dla niektórych z przeprowadzonych zabiegów obróbki cieplnej przedstawiają rys.1 do 8. Szczegółowy opis rysunków zawiera tablica 4.

## OPIS RYSUNKÓW



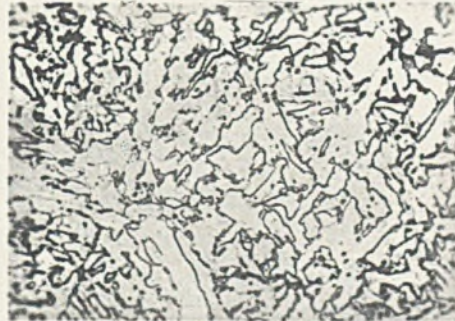
1



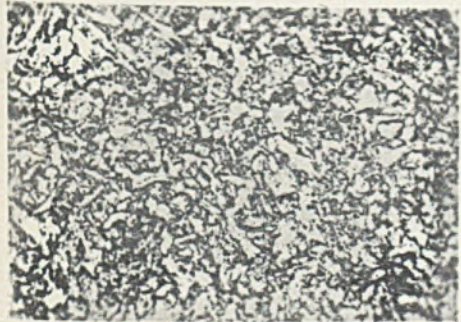
2



3



4



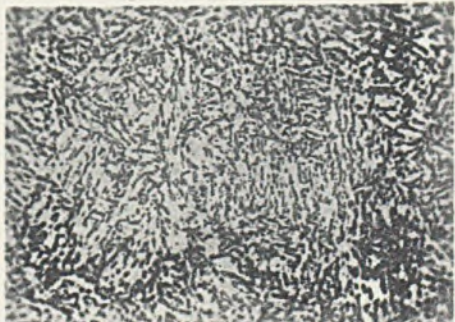
5



6



7



8

Nr rys.	Obróbka cieplna stan	Struktura	Powiększenie X
1	wyżarzony	Feryt z perlitem częściowo skoagulowanym; na granicach i wewnątrz ziarn znaczna ilość węglików.	500
2	H-980 i 920°C/powietrze O-650°C/24	Feryt drobnoziarnisty i bainit odpuszczony, szczególnie w pobliżu granic ziarn; wewnątrz ziarn ferrytu znaczna ilość słabo zarysowujących się drobnych węglików.	500
3	H-980 i 920°C/powietrze O-650°C/10 h	Feryt z wydzielonymi na granicach ziarn i bloków węglkami; wewnątrz ziarn widoczne drobne wydzielienia węglików.	500
4	H-980 i 920°C/powietrze O-700°C/10 h	Feryt gruboziarnisty z wydzielonymi na granicach ziarn węglkami znacznej wielkości.	500
5	H-900°C/powietrze O-650°C/2 h	Bainit górny odpuszczony z ferrytem, miejscami w układzie iglastym.	500
6	H-950°C/powietrze O-650°C/2 h	Bainit górny gruboziarnisty - odpuszczony; miejscami, szczególnie na granicach ziarn, wydzielienia ferrytu.	500
7	H-900°C/olej O-650°C/2 h	Drobne wydzielienia węglików w ferrycie w układzie iglastym pomartenzytycznym.	500
8	H-900°C/olej O-650°C/10 h	Feryt z wydzielonymi wzdłuż granic bloków węglkami.	500

H — hartowanie  
O — odpuszczanie

## 5. Analiza wyników

Przeprowadzone badania wykazały charakterystyczne zmiany własności mechanicznych i struktury stali niklowo-wanadowej obrobionej cieplnie. Dotyczy to przede wszystkim udarności, która w przypadku stali wyżarzanej wynosi 1 do 5  $\text{kGm/cm}^2$  (tablica 1), zaś po odpowiednim zabiegu obróbki cieplnej wzrasta nawet do 17  $\text{kGm/cm}^2$  (tablica 3). Niska udarność oraz twardość stali wyżarzanej związana jest z nierównomiernym rozmieszczeniem w strukturze węglików. Obecność perlitu a przede wszystkim wydzielen węglików szczególnie na granicach ziarn (rys.1) powoduje w stali kruchość, a tym samym obniżenie jej własności plastycznych.

Podwyższenie odporności na uderzenie uzyskuje się przez zastosowanie obróbki cieplnej polegającej na hartowaniu i odpuszczaniu, przy czym wzrost udarności zależy od parametrów zabiegu. Po dwukrotnym hartowaniu w powietrzu, kolejno z temperatury 980 a następnie z 920°C, a także po hartowaniu w oleju z zakresu temperatur 900 do 950°C otrzymuje się przy tych samych parametrach odpuszczania najwyższe wartości udarności stali. Po dwukrotnym hartowaniu w powietrzu stal posiada strukturę ferrytyczno-bainityczną, przy czym bainit występuje szczególnie w pobliżu granic ziarn. Podobna struktura, lecz o większej ilości bainitu występuje po hartowaniu w powietrzu z temperatur 900 i 950°C, przy czym po hartowaniu z 950°C struktura jest gruboziarnista. Hartowanie w oleju z temperatury 900°C umożliwia otrzymanie struktury martenzytycznej drobnoiglastej, zaś z temperatury 950°C martenzytu gruboiglastego.

Z tablicy 3 wynika, że decydujący wpływ na udarność i twardość stali posiada temperatura i czas odpuszczania. Najniższą udarność oraz najwyższą twardość otrzymuje się po odpuszczaniu w temperaturze 600°C. Zjawisko to związane jest z występowaniem twardości wtórnej, wywołanej wydzieleniem się w zakresie temperatur 550 do 600°C węglika wanadu o znacznej dyspersji [10]. Podwyższenie temperatury oraz przedłużenie czasu odpuszczania ułatwia proces wydzielenia się węglików, wskutek czego wzrasta udarność kosztem obniżenia twardości.

Przebieg procesu wydzielenia przy odpuszczaniu po dwukrotnym hartowaniu w powietrzu przedstawiono na rys.2 do 4. Na rys.2 widoczna jest struktura ferrytyczno-bainityczna po odpuszczaniu w 650°C w czasie 2 godzin. Bainit górny występuje tutaj w pobliżu granic ziarn, natomiast wewnątrz ziarn ferrytu zarysowują się drobne wydzielienia węglików. Wzrost czasu odpuszczania do 10 godzin sprzyja koalescencji i wzros-

Tablica 3

## Wyniki badań mechanicznych

Nr serii	Hartowanie		Udarność U kgm/cm <sup>2</sup> i twardość HV po odpuszczaniu								Sposób chłodzenia		
	Temperat. °C	Ośrodek chłodz.	600° C/2h		650° C/2h		700° C/2h		650° C/10h			700° C/10h	
			U	HV	U	HV	U	HV	U	HV		U	HV
A	980 i 920	powietrze	7,6	235	11,4	202	10,8	200	-	-	-	-	a
			5,3	224	8,7	202	15,9	190	13,8	198	8,7	192	b
B	900	"	5,9	222	9,4	211	8,3	205	-	-	-	-	a
			4,5	240	9,2	211	8,6	210	-	-	-	-	b
C	950	"	5,2	235	9,0	216	6,9	210	-	-	-	-	a
			3,4	265	6,6	241	7,0	225	-	-	-	-	b
D	900	olej	6,0	264	15,3	211	15,8	215	-	-	-	-	a
			7,1	280	12,4	227	15,1	225	17,0	205	8,2	210	b
E	950	olej	4,7	300	14,1	229	14,3	227	-	-	-	-	a
			3,7	310	13,5	234	14,6	227	-	-	-	-	b

a - próbki chłodzone z temperatury odpuszczania do 400°C z piecem a następnie na wolnym powietrzu;

b - próbki chłodzone z temperatury odpuszczania na wolnym powietrzu.

towi węglików na granicach ziarn i bloków (rys.3). Podobną strukturę obserwuje się po odpuszczaniu w temperaturze  $700^{\circ}\text{C}$  (rys.4).

Przebieg odpuszczania próbek hartowanych jednokrotnie z temperatury  $900$  i  $950^{\circ}\text{C}$  w powietrzu jest analogiczny do opisanego wyżej. Na rys.5 przedstawiono strukturę stali hartowanej z temperatury  $900^{\circ}\text{C}$  i odpuszczonej w  $650^{\circ}\text{C}$  w czasie 2 godzin. Na omawianym rysunku miejscami widoczna jest iglasta budowa bainitu odpuszczonego, zaś na pozostałej części mieszanina bainitu odpuszczonego i ferrytu z zarysowującymi się wydzieleniami węglików. Wzrost temperatury hartowania do  $950^{\circ}\text{C}$  prowadzi do otrzymania, przy tych samych parametrach odpuszczania, struktury odpuszczonego bainitu gruboiglastego, charakteryzującego się pasmowymi wydzieleniami węglików wzdłuż granic bloków oraz miejscowym wydzieleniem się ferrytu, szczególnie na granicach ziarn (rys.6). Gruboziarnista struktura obniża udarność stali.

Najkorzystniejsze własności mechaniczne tj. najwyższą udarność przy stosunkowo wysokiej twardości otrzymuje stal po hartowaniu w oleju i odpuszczaniu w temperaturze  $650^{\circ}\text{C}$ . Własność ta uwarunkowana jest równomiernym rozmieszczeniem węglików. Na rys.7 przedstawiono strukturę stali hartowanej w oleju z temperatury  $900^{\circ}\text{C}$  i odpuszczonej w  $650^{\circ}\text{C}$  w czasie 2 godzin, charakteryzującą się równomiernym rozmieszczeniem drobnych węglików w pomartenzytycznym układzie iglastym. Przedłużenie czasu odpuszczania do 10 godzin prowadzi do wydzielenia węglików wzdłuż granic bloków i ziarn, przy czym zanika iglasta budowa struktury (rys.8). Hartowanie z temperatury  $950^{\circ}\text{C}$  sprzyja powstaniu struktury gruboiglastej, obniżającej nieco udarność przy wzroście twardości.

Badania wpływu szybkości chłodzenia próbek po odpuszczaniu wskazują, że wielkość ta nie wpływa w sposób zasadniczy na udarność stali (tablica 3). W porównaniu z chłodzeniem na wolnym powietrzu, otrzymuje się nieco wyższą udarność po studzeniu stali z temperatury odpuszczania do  $400^{\circ}\text{C}$  z piecem. Wpływ ten jest większy przy niższych temperaturach odpuszczania ( $600$  do  $650^{\circ}\text{C}$ ) i krótkich czasach wygrzewania (do ok.2 godzin), co związane jest niewątpliwie z przedłużonym procesem wydzielenia, głównie koagulacją węglików.



Wnioski

1. Niewłaściwy dobór rodzaju zabiegu oraz parametrów obróbki cieplnej powoduje kruchość konstrukcyjnej stali stopowej niklowo-wanadowej.

2. Najwyższą udarność przy stosunkowo wysokiej twardości otrzymuje się po ulepszeniu cieplnym tj. po hartowaniu z temperatury  $900^{\circ}\text{C}$  w oleju i odpuszczaniu w  $650$  do  $700^{\circ}\text{C}$  oraz po dwukrotnym hartowaniu w powietrzu kolejno z  $980$  i  $920^{\circ}\text{C}$  i odpuszczaniu w zakresie temperatur  $650$  do  $700^{\circ}\text{C}$ .

3. Przy odpuszczaniu w temperaturze  $650^{\circ}\text{C}$  należy stosować długie czasy wygrzewania; wzrost temperatury do  $700^{\circ}\text{C}$  przyspiesza proces zabiegu.

4. Studzenie z temperatury odpuszczania do  $400^{\circ}\text{C}$  z piecem daje wyższą udarność niż bezpośrednie chłodzenie na wolnym powietrzu, szczególnie przy krótkich czasach wygrzewania w zakresie temperatur  $600$  do  $650^{\circ}\text{C}$ .

5. Wartości udarności otrzymane dla poszczególnych zabiegów cieplnych zawiera tablica 3.

## LITERATURA

- [1] P.Kosieradzki - Obróbka cieplna metali, Warszawa, 1955.
- [2] A.A.Popow, A.E.Popowa - Izotermiczeskije i termokinetičeskije diagramy rozpada perechłazdiennogo austenita, Moskwa, 1961.
- [3] E.Houdremont - Specjalnyje stali, t.II, Moskwa, 1960.
- [4] A.Osawaa, M.Oya - Sci. Rep. Tôhoku Uniw., 19, 1930, 95.
- [5] M.Hansen - Constitution of Binary Alloys, New York, Toronto, London, 1958, 388.
- [6] M.Hansen - Der Aufgabe der Zweistofflegierungen, Berlin, 1936.
- [7] H.J.Goldschmidt - J.Iron and Steel Inst., 160, 1948, 345.
- [8] S.Ammareller, P.Opel - Stahl u. Eisen, 75, 1955, 65.
- [9] K.Bungardt, R.Oppenheim - Stahl u. Eisen, 75, 1955, 65.
- [10] E.Houdremont, W.Koch, H.J.Wiester - Stahl u. Eisen, 69, 1949, 80.