

KRZYSZTOF MIERNIK, RAFAŁ BOGUCKI, STANISŁAW PYTEL*

WPŁYW TEMPERATURY HARTOWANIA NA MIKROSTRUKTURĘ I WŁASNOŚCI MECHANICZNE STALI DP

EFFECT OF HARDENING TEMPERATURE ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF DUAL PHASE STEEL

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań metaloznawczych oraz własności mechanicznych stali DP hartowanej z zakresu temperatur od 740 do 820°C.

Słowa kluczowe: stale DP, temperatura hartowania, struktura ferrytyczno-martenzytyczna, własności mechaniczne

Abstract

Results of metallographic investigations as well as mechanical properties of dual phase steel hardened in range of temperature 740 do 820°C has been presented in this paper.

Keywords: dual phase steels, hardening temperature, ferrite-martensite microstructure, mechanical properties



^{*} Mgr inż. Krzysztof Miernik, dr inż. Rafał Bogucki, dr hab. inż. Stanisław Pytel, prof. PK, Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

We współczesnej technice systematycznie wzrasta zapotrzebowanie na niskowęglowe stale konstrukcyjne o podwyższonych właściwościach mechanicznych i technologicznych wynikające z tendencji do zmniejszania masy i kosztów wielkogabarytowych konstrukcji spawanych. Spełnienie wymagań stawianych przez konstruktorów odnośnie do własności mechanicznych stali uzyskano poprzez odpowiedni dobór ich składu chemicznego i zastosowanie obróbki cieplno-plastycznej.

Podstawowym czynnikiem decydującym o jakości połączeń spawanych jest skład chemiczny stali, a dominującą rolę odgrywa zawartość węgla, która nie powinna przekraczać 0,2%. Ograniczanie stężenia węgla oraz dodatków stopowych powoduje jednak stopniowe zmniejszenie własności wytrzymałościowych stali.

W metalurgii niskowęglowych stali konstrukcyjnych o polepszonych własnościach mechanicznych powszechnie stosuje się mikrododatki Nb, Ti, V, które tworzą drobnodyspersyjne węgliki i węglikoazotki. Te wydzielenia hamują po obróbce cieplno-plastycznej rozrost i rekrystalizację ziaren austenitu, co prowadzi do rozdrobnienia ferrytycznoperlitycznej mikrostruktury stali.

Odpowiedzią na wzrastające zapotrzebowanie na materiały stalowe o podwyższonych własnościach wytrzymałościowych mogą być także niskowęglowe stale DP. Ten skrót pochodzi z literatury anglojęzycznej i oznacza *Dual Phase Steels*. Stale DP otrzymuje się poprzez hartowanie z obszaru ferryt + austenit ($\alpha + \gamma$), co powoduje utworzenie dwufazowej mikrostruktury w postaci mieszaniny ferrytu i martenzytu lub bainitu. Mikrostruktura DP zapewnia dobrą kombinację wytrzymałości i ciągliwości materiału.

Celem niniejszego artykułu było modelowanie mikrostruktury DP w niskowęglowej stali konstrukcyjnej poprzez odpowiedni dobór temperatury hartowania z zakresu ($\alpha + \gamma$) oraz doświadczalne sprawdzenie przebiegu zmian jej właściwości mechanicznych w funkcji zróżnicowanej objętości ferrytu i martenzytu.

2. Przedmiot badań

Do badań zastosowano niskowęglową stal konstrukcyjną o składzie chemicznym zamieszczonym w tab. 1.

Tabela 1

Zawartość pierwiastków [% wag.]								Temperatura przemiany [°C]				
С	Mn	Si	Р	S	Cr	Ni	Cu	Al	A _{c1}	A _{c3}	A _{r3}	A _{r1}
0,18	1,27	0,30	0,014	0,003	0,16	0,14	0,30	0,026	725	835	735	620

Skład chemiczny niskostopowej stali konstrukcyjnej oraz temperatury przemian

Przeprowadzenie prawidłowej obróbki cieplnej z zakresu ($\alpha + \gamma$) wymagało wyznaczenia temperatury przemian fazowych. W tym celu przeprowadzono badania dylatometryczne określając temperatury przemian A_{c1} , A_{r1} , A_{c3} i A_{r3} , które przedstawiono w tab. 1. Materiał poddano normalizowaniu w temperaturze 870°C i określono wstępne właściwości mechaniczne, które zaprezentowano w tab. 2.

123 Tabela 2

Obróbka ajanlna	Temperatura	Udarność	Twardość	Re	Rm	Α	Ζ
Obiobka ciepilia	hartowania [°C]	[J/cm ²]	HV30	[MPa]		[%]	
Normalizowanie	-	175	162	323	563	33	74
	740	32	233	985	515	19	44
	760	36	305	1065	560	15	35
А	780	44	387	1136	655	13	37
	800	49	400	1164	637	13	40
	820	41	459	1324	982	12	48
	740	93	249	891	550	17	60
	760	97	339	951	663	16	62
В	780	109	362	979	700	14	60
	800	90	370	1042	815	14	62
	820	75	434	1177	1020	11	58
	740	183	177	589	460	32	76
	760	187	185	583	440	26	76
C	780	186	192	600	460	31	75
	800	182	209	607	466	30	75
	820	172	228	632	516	28	74

Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych dla próbek po obróbce cieplnej

3. Przebieg i wyniki badań

Strukturę DP uzyskiwano wskutek dwustopniowej obróbki cieplnej. Pierwszy etap polegał na nagrzaniu stali do temperatury 900°C, wygrzaniu w tej temperaturze ok. 30 min z następnym szybkim chłodzeniem w wodzie. Drugi etap obróbki polegał na nagrzaniu uprzednio zahartowanych próbek do odpowiednich temperatur z zakresu występowania faz $\alpha + \gamma$, wygrzania w tej temperaturze ok. 30 min z następnym szybkim chłodzeniem w wodzie. Taki tok postępowania pozwolił na ujednorodnienie składu chemicznego, co ma istotny wpływ na przebieg obróbki z zakresu $\alpha + \gamma$. W ten sposób wykonano hartowanie serii próbek z zakresu temperatury od 740 do 820°C, stosując przedział $\Delta T = 20^{\circ}$ C, uzyskując pierwszą serię próbek (A). Kolejne serie próbek poddano tej samej obróbce cieplnej z dodatkowym procesem niskiego odpuszczania w temperaturze 250°C (B) i wysokiego odpuszczania (C).

Przebieg przeprowadzonej obróbki cieplnej różnił się od przemysłowej technologii otrzymywania stali DP, która dzieki zastosowaniu obróbki cieplno-plastycznej zapewnia rozdrobnienia mikrostruktury. Dodatkowa różnica wynikała z grubości obrabianych cieplnie elementów i wynosiła ponad 10 mm. Należy jednak zaznaczyć, że w warunkach przeprowadzonych badań uzyskano równomiernie rozmieszczoną mikrostrukturę ferrytyczno--martenzytyczną na całej grubości obrabianych próbek.

Po obróbce cieplnej wykonano: badania metalograficzne, badania stereologiczne, pomiary twardości metodą Vickersa (HV30), statyczną próbę rozciągania, próbę udarności w temperaturze pokojowej oraz analizę fraktograficzną.

Temperatury krytyczne przemian fazowych określono na podstawie krzywych dylatometrycznych uzyskanych za pomocą dylatometru firmy typu DO 105 firmy IMŻ.



Fig. 1. Scheme of DP steel treatment

Pomiary twardości wykonano metodą Vickersa HV30. Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono w temperaturze pokojowej na pobranych próbkach pięciokrotnych o średnicy ϕ 5 mm, poprzecznych do kierunku walcowania, zgodnie z normą EN 10002-5:1991. Badania wykonano na hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej typu EU 40 z wykorzystaniem czujników siły i przemieszczania podłączonych do komputera poprzez kartę pozyskiwania danych DAS 800. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono parametry Rp_{0.2}, R_m, A₅ i Z. Badanie udarności przeprowadzono na próbkach poprzecznych typu Charpy V z użyciem młota udarnościowego Alpha o energii początkowej 300 J. Na przełomach próbek udarnościowych przeprowadzono badania fraktograficzne z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego JSM5510LV. Z próbek udarnościowych w pobliżu pęknięcia wykonano zgłady w kierunku wzdłużnym. W celu ujawnienia mikrostruktury przygotowane szlify trawiono 4% roztworem kwasu azotowego w etanolu. Obserwacji dokonano na mikroskopie optycznym firmy Nikon z cyfrowym zapisem obrazu.

Obserwacje prowadzone za pomoca mikroskopii świetlnej ujawniły silne zróżnicowanie mikrostruktury w zależności od temperatury hartowania (fot. 1). W temperaturze 740°C mikrostruktura składa się przede wszystkim z ferrytu i niewielkiej ilości martenzytu zlokalizowanego na granicach ziaren (fot. 1a)). Podwyższenie temperatury hartowania powoduje wzrost udziału martenzytu w strukturze (fot. 1b)-d)). Po hartowaniu w temperaturze 740°C uzyskano ok. 70% ferrytu, po czym obserwuje się jego systematyczny spadek do poziomu ok. 20% w temperaturze 820°C.

Wielkości obliczone na podstawie danych zarejestrowanych podczas próby statycznego rozciągania, pomiarów udarności w temperaturze pokojowej oraz twardości HV30 zestawiono w tab. 2. Dodatkowo w celach porównawczych parametry wytrzymałościowe R_m i R_e oraz udarność przedstawiono w postaci graficznej na rys. 2–4.

Wraz ze wzrostem temperatury hartowania widać wyraźny wzrost wytrzymałości na rozciąganie oraz granicy plastyczności. Maksymalne wartości dla temperatury 820°C wynoszą – odpowiednio – $R_{p_{0,2}} = 982$ MPa i $R_m = 1324$ MPa. Podobną tendencję odnotowano w wypadku pomiarów twardości HV30. Zbliżony trend otrzymano w wypadku hartowania i odpuszczania w temperaturze 250°C i 650°C.

W kontekście udarności najniższą wartość odnotowano po hartowaniu w temperaturze 740°C, po czym następuje systematyczny wzrost do temperatury 800°C, gdzie otrzymano

wartość maksymalną wynoszącą 49 J/cm². Natomiast wartości udarności osiągają maksimum dla temperatur 760–800°C w zależności od rodzaju obróbki.



Fot. 1. Mikrostruktura stali DP po hartowaniu z temperatury:
a) 740°C, b) 760°C, c) 780°C, d) 820°C, pow. 200×
Photo 1. Microstructure of DP steel after hardening in temperature:
a) 740°C, b) 760°C, c) 780°C, d) 820°C, magn. 200×

Zwiększenie ułamka objętości martenzytu wskutek wzrostu temperatury hartowania powoduje spadek stężenia węgla w tych obszarach. Stężenie węgla w zakresie dwufazowej mikrostruktury $\alpha + \gamma$ jest bezpośrednią przyczyną wyraźnych zmian we właściwościach mechanicznych stali po jej hartowaniu, w tym zwłaszcza udarności. Ten fakt pośrednio potwierdzają badania fraktograficzne.

Na powierzchni przełomów próbek hartowanych z temperatury 740°C lub 780°C – fot. 2a) i c) – można zaobserwować wyspy, które charakteryzują się wyraźnie zarysowanymi granicami łupliwego pękania. Są to obszary martenzytu o wyższej zawartości węgla. Strefy o takiej budowie działają jak lokalne spiętrzenia naprężeń.

Podczas dynamicznego zginania ziarna martenzytu pękają łupliwie już w początkowej fazie odkształcenia z racji swej wysokiej kruchości. W miarę wzrostu obciążenia osnowa ferrytyczna oddzielająca licznie utworzone mikroszczeliny nie jest w stanie zahamować propagacji tych mikropęknięć, co prowadzi do utworzenia makroprzełomu przy stosunkowo niskiej akumulacji energii. Wyraźna różnica w twardości pomiędzy ziarnami martenzytu a osnową ferrytyczną ułatwia dekohezję materiału. Wzrost temperatury hartowania



powoduje zmianę charakteru przełomu z kruchego na quasi-ciągliwy, co jest wynikiem stopniowego zaniku lokalnych wysp martenzytu o wysokiej zawartości węgla oraz twardości.

Rys. 2. Wpływ temperatury hartowania na wytrzymałość na rozciąganie stali DP Fig. 2. Effect of hardening temperature on tensile strength of DP steel







Rys. 4. Wpływ temperatury hartowania na udarność stali DP Fig. 4. Effect of hardening temperature on impact resistance of DP steels



Fot. 2. Topografia przełomów próbek udarnościowych po hartowaniu z temperatury: a) 740°C, b) 760°C, c) 780°C, d) 820°C Photo 2. Topography of impact samples fracture surfaces after hardening in temperature: a) 740°C, b) 760°C, c) 780°C, d) 820°C

Podczas obserwacji mikroskopowej przełomu próbki po hartowaniu z temperatury 820°C zauważamy wyraźne zmniejszenie ilości łupliwych wysp wysokowęglowego martenzytu. Poprzez zwiększenie obszarów występowania austenitu i dyfuzję węgla obniża się stężenie tego pierwiastka. Mikrostruktura staje się bardziej jednorodna pod względem twardości, a tym samym zarodkowanie i rozprzestrzenianie się mikropęknięć jest utrudnione.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że istnieje związek pomiędzy temperaturą hartowania z obszaru dwufazowego $\alpha + \gamma$ a właściwościami mechanicznymi badanej stali. Niska temperatura hartowania z zakresu dwufazowego powoduje powstanie w strukturze ziaren martenzytu o wysokiej koncentracji węgla, co wywołuje wzrost kruchości badanej stali. Wraz ze wzrostem temperatury hartowania udarność i twardość rosną, zwiększają się również właściwości wytrzymałościowe przy niewielkim spadku wydłużenia.

Najwyższe wartości twardości i udarności dla stali hartowanej z zakresu dwufazowego uzyskano dla ok. 75% udziału objętościowego struktury martenzytycznej, co odpowiadało temperaturze hartowania 800°C. W tej temperaturze uzyskano również wysokie właściwości wytrzymałościowe. Dla próbek poddanych odpuszczaniu największe wartości twardości oraz właściwości mechaniczne otrzymano dla temperatury hartowania 820°C. Natomiast maksymalne wartości udarności otrzymano dla niższych temperatur hartowania 760–780°C. Wraz ze wzrostem temperatury hartowania wzrasta kruchość próbek.

Literatura

- [1] L1wellyn D.T., Hillis D.T., *Dual Phase Steels*, Ironmaking and Steelmaking, 1996.
- [2] A d a m c z y k J., Problemy rozwoju stali konstrukcyjnych, cz. II: Oddziaływanie mikrododatków oraz własności i zastosowanie stali mikrostopowych, Inżynieria Materiałowa 4, 1997.
- [3] Bag A., Ray K.K., Dwarakadasa E.S., Influence of Martensite Content and Morphology on Tensile and Impact Properties of High-Martensite Dual-Phase Steels, Metallurgical and Materials Transactions A, 1999.