

Edmund TASAK
Jerzy SIEPAK

Ciągliwość stali niskostopowych z mikrododatkami poddanych działaniu cykli cieplnych

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań ciągliwości próbek ze stali niskostopowych z mikrododatkami w gatunku 16G2AV i 09G2ANb, poddanych symulacyjnym cykлом cieplnym spawania przy różnych czasach chłodzenia odpowiadającym określonym energiom liniowym łuku. Ocena mikrostruktury oraz analiza wyników pomiarów twardości i udarności badanych próbek wykazały, że optymalna wartość energii łuku dla obydwu stali wynosi $1,4 \cdot 10^8 \text{ J m}^{-1}$.

Słowa kluczowe: stale mikrostopowe, strefa wpływu ciepła, ciągliwość

1. WSTĘP

Stale niskostopowe o podwyższonej wytrzymałości, objęte przez PN/H-84018, stanowią stale typu C-Mn bez lub z mikrododatkami. Dodanie do omawianych stali takich składników, jak wanad lub niob, powoduje rozdrobnienie ziarna wynikające z wydzielania się węglików i azotków. Wydzielające się węgliki i azotki oprócz umocnienia stali w wyniku rozdrobnienia ziarna, wywołują ponadto jej utwardzenie. Dodatek wanadu i niobu w stalach pozwala uzyskać granicę plastyczności rzędu 500 MPa pod warunkiem, że wyroby z tych stali poddano obróbce cieplnej w postaci normalizowania lub obróbce cieplno-plastycznej w postaci kontrolowanego walcowania [1-3].

Z uwagi na małe stężenie dodatków stopowych, najczęściej rzędu (0,02-0,05)%, stale te nazywa się często stalami mikrostopowymi.

Ogólnie spawalność stali mikrostopowych w porównaniu do stali typu C-Mn jest nieco gorsza, co wynika głównie z trudności w uzyskaniu spoiny o odpowiedniej udarności [3].

Według Hrivnaka [4] stale mikrostopowe z niobem wykazują spawalność nawet nieco lepszą od stali typu C-Mn, co wynika z następujących powodów:

- stale z dodatkiem niobu mają niższą zawartość węgla przy tej samej granicy plastyczności, co w stalach typu C-Mn,
- mikrododatki, szczególnie zaś niob, wiążą węgiel w trwałe węglikoazotki typu MX, które rozpuszczają się w znacznie wyższych temperaturach niż cementyt, dzięki czemu powodują znaczne zmniejszenie szerokości strefy wpływu ciepła.

Stale z dodatkiem niobu o zmniejszonej zawartości manganu, poddane obróbce cieplno-plastycznej, uważa się obecnie za najbardziej perspektywiczne w omawianej grupie materiałów [1, 5].

Należy jednak pamiętać, iż dodatki mikrostopowe wywierają również ujemny wpływ na spawalność, gdyż w strefie rozpuszczania się cząstek MX, tytan, wanad i niob przechodząc do austenitu zwiększają hartowność stali, a przez to wpływają na wzrost twardości i kruchości wąskiej części strefy wpływu ciepła [6,7].

Zawartość danego składnika mikrostopowego w stali winna zatem zapewniać rozsądny kompromis pomiędzy jego pozytywnym i negatywnym oddziaływaniem na jakość otrzymywanego złącza spawanego i jest możliwa do ustalenia jedynie na drodze eksperymentalnej. Z tego względu badania materiałoznawcze stali przeznaczonych na konstrukcje spawane, zwłaszcza badania strefy wpływu ciepła, posiadają tak duże znaczenie użytkowe.

Konwencjonalne badania złączy spawanych prowadzone na płytach próbnych są czasochłonne i kosztowne. Dlatego też opracowano metodę badań wykorzystującą symulację cykli cieplnych procesu spawania [6,7], która znalazła szerokie zastosowanie w świecie.

Stale mikrostopowe są szeroko stosowane przy wykonywaniu szeregu odpowiedzialnych konstrukcji spawanych, w tym również rurociągów do transportu gazu [1-2,5].

Celem niniejszych badań jest ocena ciągliwości dwu krajowych stali niskostopowych z mikrododatkami, poddanych symulacyjnemu cyklowi cieplnym dla wyznaczenia właściwych parametrów ich spawania. Jedną z badanych stali (stal z niobem w gatunku O9G2ANb) przewidziana jest do wykorzystania przy budowie rurociągów rozprowadzających gaz po Polsce z rurociągu tranzytowego Rosja-Niemcy.

2. MATERIAŁ I PROCEDURA BADAŃ

Badania prowadzono na próbkach stalowych po obróbce cieplno-plastycznej. Badano dwie odmiany wytrzymałościowe stali: stal z dodatkiem wanadu w gatunku 16G2AV oraz stal z dodatkiem niobu w gatunku O9G2ANb. Skład chemiczny badanych stali przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Skład chemiczny badanych stali (% wagowy)

Znak stali	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Ni	Inne
16G2AV	0,13	1,30	0,31	0,014	0,004	0,046	0,06	0,07	V-0,05
O9G2ANb	0,09	1,32	0,30	0,020	0,007	0,038	0,03	0,06	Nb-0,04

Symulację cykli cieplnych spawania badanych stali wykonano na urządzeniu produkcji Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach. Warto dodać, iż urządzenie to pozwala na uzyskanie znacznie szerszego niż w warunkach rzeczywistych obszaru, odpowiadającego strefie wpływu ciepła.

Cykl cieplny spawania odwzorowywano na próbkach o wymiarach 8x10x120 mm³ nagrzewanych rezystancyjnie do temperatury maksymalnej równej 1523 K i chłodzonych z różnymi prędkościami. Charakterystyczne czasy chłodzenia w zakresie temperatur (1070-770)K wynosiły: 10, 20, 30, 50 i 100 sekund. Dobrane do badań czasy chłodzenia odpowiadają odpowiednio energiom liniowym łuku (1,4; 2,0; 3,5 i 4,5) · 10⁸ J·m⁻¹.

Na tak przygotowanych próbkach przeprowadzono badania metaloznawcze obejmujące:

- analizę mikrostruktury na mikroskopie świetlnym,
- pomiary twardości sposobem Vickersa przy obciążeniu 49 N (HV5) zgodnie z PN/H-04360,
- badania udarności na próbkach z karbem V (KCV) w temperaturach (253, 233, 213) K zgodnie z PN/H-04371.

3. WYNIKI BADAŃ

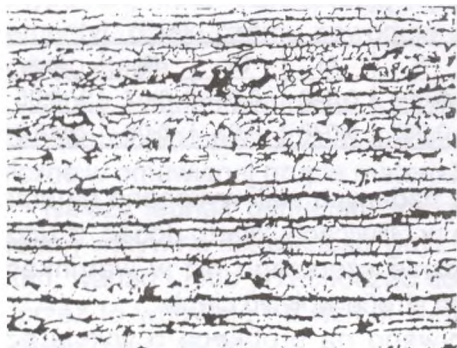
3.1. Badania mikroskopowe

Badania mikroskopowe wykazały, iż w stanie wyjściowym obydwie badane stale posiadały typową strukturę ferrytyczno-perlityczną w układzie pasmowym, co pokazano na rys. 1.

Nasilenie pasmowości struktury było większe dla stali 16G2AV, zaś stopień zanieczyszczenia wtrąceniami niemetalicznymi był wyższy dla stali 09G2ANb.

W próbkach ze stali 16G2AV poddanych symulacji cyklu cieplnego spawania $t_{\text{chl}} = 10$ s stwierdzono występowanie struktury ferrytyczno-bainitycznej, co przedstawiono na rys. 2.

Stal 16G2AV



Powiększenie 160x

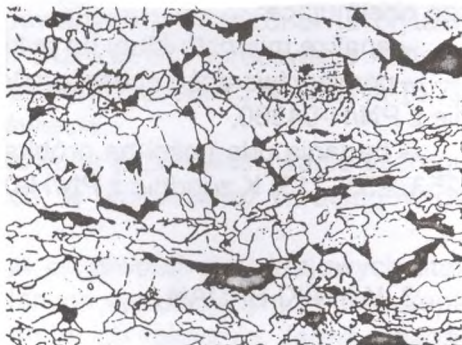


Powiększenie 400x

Stal 09G2ANb

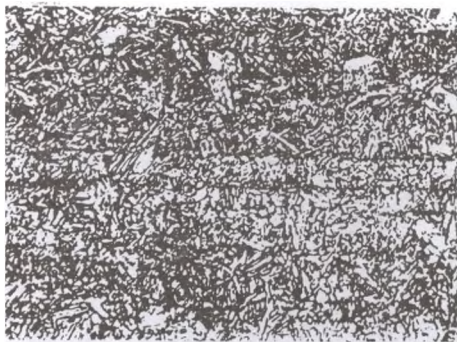


Powiększenie 160x



Powiększenie 400x

*Rys. 1. Mikrostruktura badanych stali w stanie wyjściowym.
Trawiono nitalem*



Powiększenie 160x



Powiększenie 400x

Rys. 2. Mikrostruktura próbki ze stali 16G2AV po symulacji cyklu cieplnego $t_{chl} = 10$ s. Trawiono nitalem

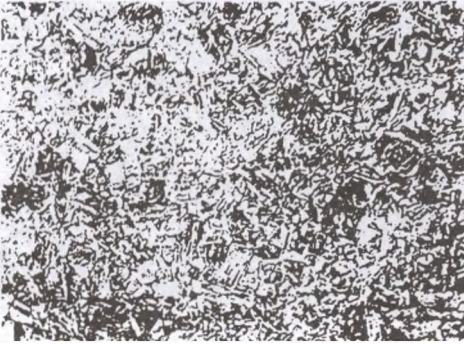
W próbkach badanej stali poddanych dłuższym czasom chłodzenia (od 20 s do 100 s) stwierdzono występowanie struktury ferrytyczno-perlitycznej z ferrytem w układzie Widmannstättena, przy czym wydłużenie czasu chłodzenia powodowało wzrost wielkości ziarna i zwiększenie ilości ferrytu.

Typowe mikrostruktury obserwowane w próbkach poddanych symulacji cykli cieplnych dla $t_{chl} = 20$ s i $t_{chl} = 100$ s przedstawiono na rys. 3.

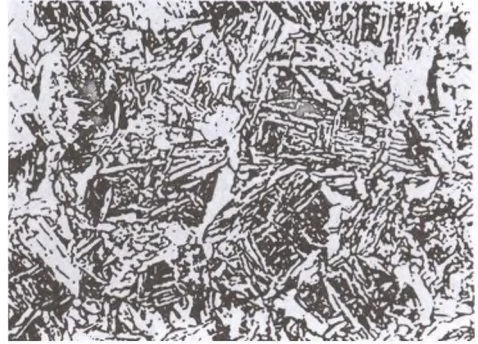
W próbkach ze stali 09G2ANb, poddanych symulacji cyklu cieplnego spawania $t_{chl} = 10$ s, stwierdzono występowanie pokazanej na rys. 4a struktury bainitycznej z widocznymi lokalnie granicami ziarn byłego austenitu. W próbkach poddanych cyklom cieplnym spawania z czasami chłodzenia od 20 s do 100 s obserwowano, podobnie jak w przypadku poprzedniej stali, strukturę ferrytyczno-perlityczną w układzie Widmannstättena uwidocznioną na rys. 4b, przy czym również zaobserwowano wzrost wielkości ziarna wraz z wydłużaniem się czasu chłodzenia próbek t_{chl} .

Struktury w próbkach ze stali 09G2ANb poddanych symulacji cyklu cieplnego przy $t_{chl} = 10$ s i $t_{chl} = 100$ s przedstawiono na rys. 4.

a



Powiększenie 160x

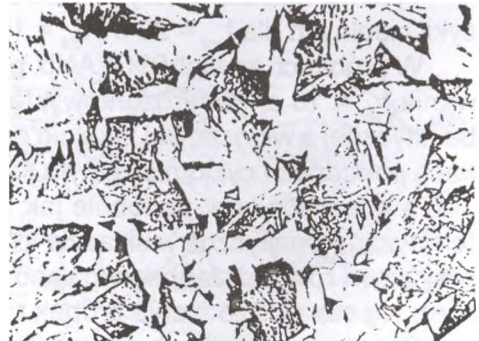


Powiększenie 400x

b



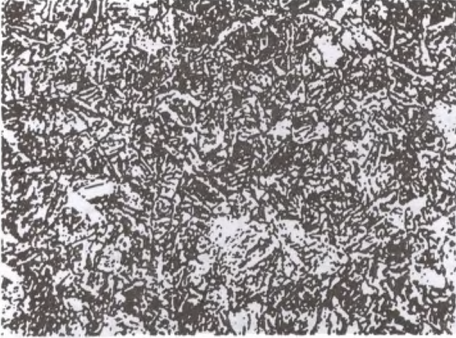
Powiększenie 160x



Powiększenie 400x

Rys. 3. Mikrostruktura próbek ze stali 16G2AV po symulacji cyklu cieplnego spawania z czasami chłodzenia: a - 20 s, b - 100 s. Trawiono nitaliem

a



Powiększenie 160x



Powiększenie 400x

b



Powiększenie 160x



Powiększenie 400x

Rys. 4. Mikrostruktura próbek ze stali 09G2ANb poddanych symulacji cyklu cieplnego z czasami chłodzenia: a = 10 s, b = 100 s. Trawiono nitaliem

3.2. Pomiary twardości

Wyniki pomiarów twardości HV5 zestawiono w tabeli 2. W opracowaniu wyników uwzględniono średnią arytmetyczną i odchylenie standardowe.

Tabela 2

Wyniki pomiarów twardości

Znak stali	Nr próbki	t_{chl}	Twardość - HV5				Odchylenie standardowe S
			1	2	3	wart. sred.	
09G2ANb	0	Stan wyjśc.	134	147	156	146	11,1
	1	10	246	254	247	252	5,7
	4	20	195	188	192	192	2,5
	7	30	161	161	156	159	2,9
	10	50	148	161	166	158	8,3
	13	100	158	161	161	160	1,7
16G2AV	20	stan wyjśc.	135	123	133	130	6,4
	21	10	252	252	246	250	3,5
	24	20	192	175	175	180	9,8
	27	30	166	166	161	164	2,9
	30	50	158	156	140	151	9,9
	33	100	134	133	129	134	3,7

Uzyskane wyniki pomiarów twardości dobrze korelują z przedstawionym wcześniej opisem struktur badanych próbek. Najwyższą twardość dla obydwu badanych stali uzyskano dla próbek poddanych symulacji cyklu cieplnego $t_{chl}=10$ s. Twardości uzyskane przy $t_{chl}=(20-100)$ s są wyższe od stanu wyjściowego, lecz średnio o (25-35)% niższe od twardości uzyskanych dla $t_{chl} = 10$ s. Warto również zauważyć, że wartość odchylenia standardowego dla próbek o najwyższej twardości ($t_{chl} = 10$ s) jest o około 50 % mniejsza niż dla stanu wyjściowego.

3.3. Badania udarności

Wyniki badań udarności zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Wyniki badań udarności

Znak stali	t_{chl} [s]	Temperatura badania								
		253 K			233 K			213 K		
		nr pr.	KCV [J/cm ²]	KCV _{gr} [J/cm ²]	nr pr.	KCV [J/cm ²]	KCV _{gr} [J/cm ²]	nr pr.	KCV [J/cm ²]	KCV _{gr} [J/cm ²]
09G2ANb	10	1	49 71	60	2	15 1515 22	17	3	22 15	18
	20	4	12 15 17	15	5	15 15 20	17	6	25 7	16
	30	7	10 15	12	8	22 27 15	21	9	12 12	12
	50	10	27 20	23	11	17 15 34	22	12	10 12	11
	100	13	17 20 20	19	14	15 17	16	15	7 7	7
16G2AV	10	21	22 29 25	25	22	17 15 22	18	23	12 10	11
	20	24	17 15 17	16	25	15 10 15	13	26	12 7	9
	30	27	12 17 15	15	28	12 10 10	11	29	7 7	7
	50	30	20 10 25	18	31	12 12 17	14	32	12 7	9
	100	33	22 17 20	20	34	12 20 10	14	35	15 10	12

Jak wynika z danych zamieszczonych w tabeli 3, stal z niobem, pomimo wyższych parametrów wytrzymałościowych, wykazała porównywalną, a często nawet wyższą udarność niż stal z wanadem.

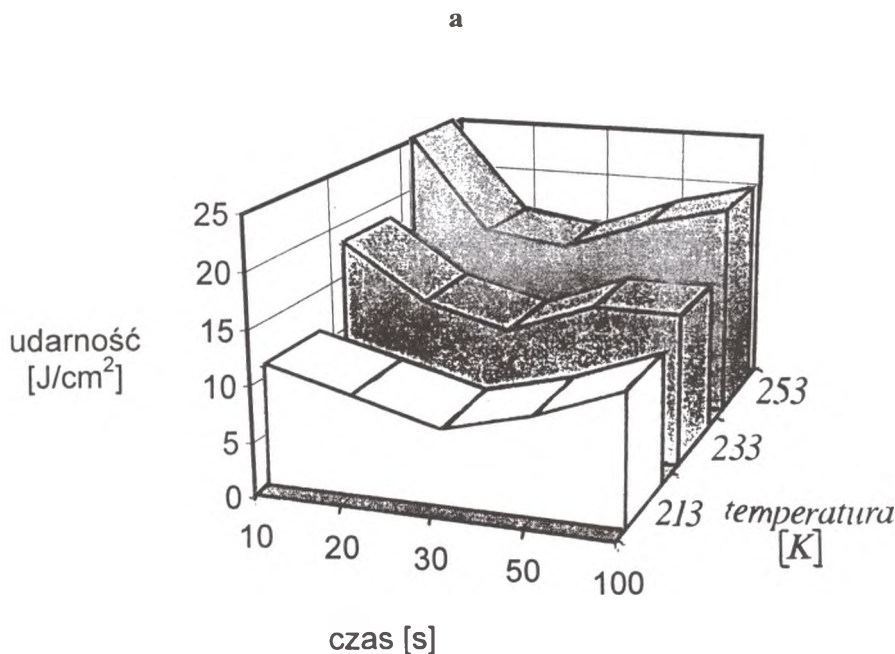
4. WNIOSKI

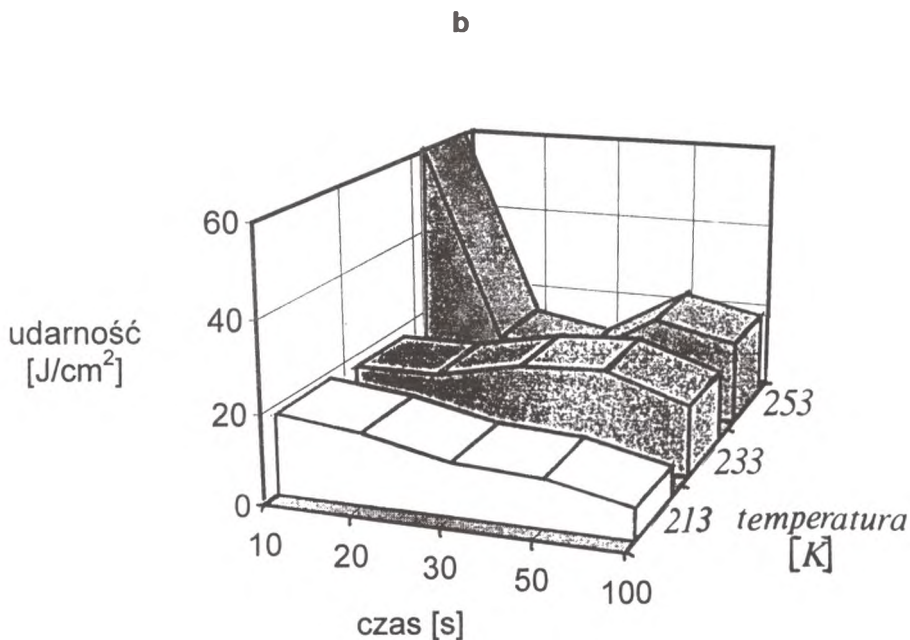
W celu lepszego zobrazowania wyników badań, uzyskanych w zakresie udarności, dokonano wykreślnego ujęcia udarności badanych stali w funkcji czasu chłodzenia i temperatury badania, co pokazano na rys. 5.

Najwyższą udarność uzyskano dla próbek poddanych symulacji cyklu cieplnego spawania $t_{\text{ch}}=10$ s, co odpowiada energii liniowej łuku $1,4 \cdot 10^8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$, czyli próbek o strukturze bainitycznej (stal 09G2ANb) i bainityczno-ferrytycznej (stal 16G2AV) (rys. 2 i 4a) i najwyższej twardości wynoszącej (250-252)HV5 (tabela 2).

Wysoką ciągliwość złączy spawanych badanych stali, w rozważanym stanie, należy tłumaczyć przede wszystkim równomierną drobnoziarnistością i umiarkowanym umocnieniem w strefie wpływu ciepła przez wydzielenia węgliaozotków V i Nb [1,3]. Warto w tym przypadku zauważyć, podkreślany wcześniej, szczególnie korzystny wpływ niobu (stal 09G2ANb) na udarność.

Wydłużenie czasu t_{ch} , wywołując wzrost wielkości ziarna i pojawienie się niekorzystnej struktury ferrytu w układzie Widmannstättena, powoduje spadek udarności, szczególnie widoczny w odniesieniu do stali z niobem (rys. 5a).





Rys. 5. Udarność próbek poddanych symulacji cyklu cieplnego spawania w funkcji czasu chłodzenia i temperatury badania: a – stal 16G2AV, b – stal 09G2ANb

Reasumując, w wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, iż optymalna energia liniowa łuku, dla obydwu badanych stali, szczególnie zaś stali o podwyższonej wytrzymałości z niobem, odpowiada wartości $1,4 \cdot 10^8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$.

Wykonane przy podanej wyżej wartości energii liniowej łuku laboratoryjne i przemysłowe próby spawania wykazały wysoką ciągliwość spoiny i strefy wpływu ciepła w uzyskanych złączach, potwierdzając słuszność wysuniętego w niniejszej pracy wniosku.

LITERATURA

- [1] Dahl W., Diekmann J. i inni: *Einfluss des Prozessparameter bei einer thermomechanischen Behandlung auf die Eigenschaften mikrolegierter Baustähle*. Stahl und Eisen 1988, nr 11, s. 31.
- [2] Kuznecov V.J., Żuravleva A.D. i inni: *Osvoenije proizvodstva serovodorodostojkich neftiegazoprovodnych trub iz stali 12GF na Volżskom trubnom zavode*. Met. Term. Obrab. Metallov 1993, nr 12, s. 24.

- [3] Tasak E.: *Metalurgia i metaloznawstwo połączeń spawanych*. Skr. uczel. AGH, nr 945, Kraków 1985.
- [4] Hrivnak I.: *Zvaritelnost oceli*. Alfa, Bratislava 1979.
- [5] Paszinski V.V., Dacko O.I., Paszinskaja E.G.: *Isledovane vzaimosfazi nieuprugich svojstv i mechaniczeskich charakteristik niskolegirovannyh stalej dla magistralnych truboprovodov*. Izv. Vuz. – Czern. Metall. 1992, nr 2, s. 95.
- [6] Szorszorov M.H., Klebanov G.N.: *Metodika i maszina IMET-1 dla issledovanija izmenenija struktury i mechaniczeskich svojstv metalla pri svarke*. Filial. VINITI AN SSSR, 1958, nr M-57-134, s. 12.
- [7] Szorszorov M.H., Bielov V.V.: *Fazovye prevraszczenija i izmenenija svojstv stali pri svarke*. Izd. Nauka, Moskva 1972.