ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

PIOTR ADAMIEC JERZY DZIUBIŃSKI EDMUND TASAK

WYTWARZANIE RUR I RUROCIĄGÓW DO TRANSPORTU PALIW CIEKŁYCH I GAZOWYCH



50 - LECIE POLITECHNIKI ŚLASKIEJ

# TRANSPORT z. 26

GLIWICE

# POLITECHNIKA ŚLĄSKA

# ZESZYTY NAUKOWE

Nr 1276

Piotr ADAMIEC, Jerzy DZIUBIŃSKI, Edmund TASAK

# WYTWARZANIE RUR I RUROCIĄGÓW DO TRANSPORTU PALIW CIEKŁYCH I GAZOWYCH



#### **OPINIODAWCY**

Prof. dr hab. inż. Andrzej Skorupa Dr hab. inż. Andrzej Zając Profesor Politechniki Krakowskiej

#### **KOLEGIUM REDAKCYJNE**

REDAKTOR NACZELNY	-	Prof. dr hab. inż. Jan Bandrowski
REDAKTOR DZIAŁU	_	Dr inż. Barbara Maciejna
SEKRETARZ REDAKCJI	_	Mgr Elżbieta Leśko

#### REDAKCJA

Mgr Roma Łoś

### REDAKCJA TECHNICZNA Alicja Nowacka

#### Wydano za zgodą Rektora Politechniki Śląskiej

Praca wykonana w ramach projektu celowego nr 7 7299 92C/1020 finansowanego częściowo przez KBN

PL ISSN 0209-3324

#### Wydawnictwo Politechniki Śląskiej ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

 Naki 150+53
 Ark. wyd. 9
 Ark. druk 7,625
 Papier offset kl. Ill 70x100. 80g
 Oddano do druku 20.07.95
 Druk ukończ. w sierpniu 1995

 Zam. 200|95
 Cena zł 4,5% (45.000,~)

Fotokopie, druk i oprawę

wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

### SPIS TRESCI

~	4.	<b>~</b>
3	c	1.

1.	WPROWADZENIE	5
2.	SPAWANE RURY STALOWE PRZEZNACZONE NA RUROCIĄGI DO PRZE-	
	SYŁU PALNYCH CIECZY I GAZOW	6
3.	SPAWALNOSC RUROCIĄGÓW	17
	3.1. Skłonność stali do pękania gorącego	18
	3.2. Skłonność stali do pękania zimnego	20
	3.3. Skłonność stali do pękania kruchego	32
	3.4. Inne pęknięcia decydujące o spawalności	37
4.	SPAWANIE ŁUKIEM KRYTYM W PROCESIE WYTWARZANIA RUR DUZYCH	
	SREDNIC	38
	4.1. Spawanie wzdłużne łukiem krytym rur o dużych	
	średnicach	39
	4.2. Spawanie spiralne łukiem krytym rur	46
	4.2.1. Ustawienie głowic spawalniczych	48
	4.2.2. Wpływ topnika na kształt spoiny	52
	4.3. Druty i topniki do spawania łukiem krytym rur	
	dużych średnic	53
	4.4. Rury spawane produkowane w Hucie Ferrum	55
	4.5. Wady spotykane w spawanych rurach dużych średnic	58
5.	SPAWANIE RUROCIĄGÓW TRANZYTOWYCH	62
	5.1. Spawanie obwodowe rurociągów celulozowymi elektro-	
	dami otulonymi - wytyczne	64
	5.2. Spawanie rurociągów elektrodami zasadowymi	65
	5.3. Spawanie rurociągów w osłonie gazów ochronnych	
	metodą GMAW	66
6.	KIERUNKI ROZWOJU STALI PRZEZNACZONYCH NA RURY DUZYCH	
	SREDNIC	71
7.	WŁASNOŚCI MECHANICZNE RUR SPAWANYCH WZDŁUŻNIE I SPIRAL-	
	NIE ZE STALI X52, X56, X65 - BADANIA WŁASNE	75
	7.1. Cel i zakres badań. Materiały stosowane do badań	75
	7.2. Wpływ cykli cieplnych na własności symulowanych SWC	76
	7.3. Własności mechaniczne złączy rur spawanych	79
	7.4. Ciągliwość stali niskostopowych stosowanych w bu-	
	dowie rurociągów	82

	7.4.1. Temperatura przejścia w stan kruchy określana	
	w próbie udarności	82
	7.4.2. Próba rozdzierania spadającym ciężarem (DWTT)	85
	7.5. Omówienie wyników badań	94
8.	BADANIE NIENISZCZĄCE RUR I RUROCIĄGOW [46]	96
9.	POLIETYLENOWA IZOLACJA RUR SPAWANYCH	102
	9.1. Izolacja rur taśmami polietylenowymi na zimno	103
	9.2. Izolacja taśmami polietylenowymi na gorąco - metoda	
	Synergy	104
	9.3. Polietylenowa izolacja rur metodą wytłaczania	106
	9.3.1. Izolacja rur metodą spiekania proszku poli-	
	etylenowego	107
	9.3.2. Izolacja rur metodą wytłaczania polietylenu	
	w formie rękawa	107
	9.3.3. Izolacja metodą wyciskania taśmy polietyleno-	
	wej owijającej rurę	108
LI	ΓΕRATURA	115
STE	RESZCZENIA	119

#### 1. WPROWADZENIE

Rosnące zużycie energii i wzrost zapotrzebowania na nośniki energii. a w szczególności na gaz ziemny, decyduje o rozwoju sieci rurociągów przemysłowych. Znaczne odległości dzielące źródła gazu ziemnego i ropy od miejsca jego zużycia prowadzą do budowy tranzytowych rurociągów o bardzo wysokich parametrach eksploatacyjnych, np. rurociągi gazowe o średnicach powyżej 1000 mm i ciśnieniach 10 MPa. Rurociągi takie wymagają stosowania wysokowytrzymałych rur o wytrzymałości powyżej 690 MPa (X80) i bardzo dobrej spawalności. Stąd obserwuje się rozwój niskostopowych stali (C ≤ 0,16%, Si ≤ 0,55%, Mn ≤ 1,9%) często z mikrododatkami Nb i Ti otrzymywanych poprzez kontrolowane walcowanie, nazywane obróbką cieplno-plastyczną (OCP). Stale takie wykorzystano w latach 80 do wykonania rur i budowy tranzytowych rurociągów gazowych w Czechach, Słowacji, Austrii i Niemczech [1,2,3]. Rury wykonano korzystając z niemieckiej normy DIN 17172 oraz normy amerykańskiej API 5L, 5LX oraz 5LS.

Celem opracowanej monografii jest przedstawienie informacji dotyczących stali stosowanych do budowy rurociągów do transportu paliw ciekłych i gazowych, ich spawalności oraz technologii spawania w procesie wytwarzania i montażu rur. Podano również charakterystykę własności metalurgicznych i mechanicznych decydujących o jakości rur i rurociągów. Informacje te mogą być wykorzystane przez inżynierów zajmujących się produkcją rur spawanych oraz technologią montażu rurociągów.

# 2. SPAWANE RURY STALOWE PRZEZNACZONE NA RUROCIĄGI DO PRZESYŁU PALNYCH CIECZY I GAZOW

Spawane rury stalowe mogą być produkowane ze stali:

- niskostopowych ogólnego przeznaczenia,
- niskostopowych drobnoziarnistych,
- niskostopowych obrabianych cieplno-plastycznie,
- niskostopowych ulepszanych cieplnie.

Schematycznie grupy te przedstawiono na rys. 1 w zależności od granicy plastyczności i temperatury przejścia w stan kruchości.



Rys. 1. Wpływ mikrostruktury i procesu wytwarzania stali na własności mechaniczne

Fig. 1. Influence of microstructure and production process on mechanical properties

Pierwszą grupę stali reprezentują stale zestawione w tablicach 1, 2 i 3 zgodnie z normami PN-79/H-74244, DIN 1626 i API Spec 5L. Ogólnie w grupie tych stali warunek ich stosowania na rury spawane stanowią ograniczenia składu chemicznego C  $\leq$  0,22%, Si  $\leq$  0,5%, Mn  $\leq$  1,6%, P  $\leq$  0,05%, S  $\leq$  0,05%, przy czym sumaryczna ilość pozostałych pierwiastków nie powinna przekraczać 0,8%, przy maksymalnej zawartości pojedynczych pierwiastków 0,3%. W przypadku kiedy grubość blach nie przekracza wielkości 30 mm, rury mogą być spawane bez wstępnego podgrzewania i obróbki cieplnej po spawaniu.

Tablica 1

Znak odmia-	Skład chemiczny, %						
małościowej	С	Mn	Si	Pmax	S <sub>max</sub>	Nb	
G205(G21)	0,09+0,15	0,35+0,60	max 0,03	0,040	0,040		
G235(G24)	max 0,22	max 1,10	0,10+0,35	0,050	0,050		
G295(G30)	max 0,18	0,70+1,30	0,30+0,55	0,040	0,040		
G355(G36)	max 0,22	1,00+1,50	0,20+0,55	0,040	0,040		
G390(G40)	0,15+0,19	1,20+1,50	0,30+0,50	0,040	0,040	0,015+0,035	

Skład chemiczny i własności mechaniczne stali na rury wg PN-79/H-74244

1) Dopuszcza się przekroczenie górnej granicy zawartości manganu, lecz nie więcej niż 1,65% pod warunkiem spełnienia równoważnika węgla  $C_{\rm E}$  = C + Mn/6 = max 0,48%.

Zakres	Znak	Własności	wytrzymałośc	iowe	Udarność	minimum
zewnę-	wytrzy-	Re	Rm	A <sub>5</sub>	KCU	2
Urznych	ciowej	MPa(kG/mm <sup>2</sup> )	MPa(kG/mm <sup>2</sup> )	7.	J/cm <sup>2</sup> (kG	m/cm <sup>2</sup> )
min					-20°C	-40°C
do	G205(G21)	205(21)	335(34)	26	-	-
168,3	G235(G24)	235(24)	375(38)	22	-	-
powyżej	G235(G24)	235(24)	375(38)	22	20(2)	-
168,3	G295(G30)	295(30)	420(43)	20	-	20(2)
do	G355(G36)	355(36)	490(50)	20	-	29(3)
613	G390(G40)	390(40)	520(53)	20	-	29(3)
powyżej 813	G235(G24)	235(24)	375(38)	22	-	-

#### Tablica 2

#### Stale na rury wg DIN 17172

#### A) Składy chemiczne

Rodzaj sta	ali	Sto-	5	Skład cl	nemiczny, 2	Pozo-		
Oznacze- nie	Nr stali	uspo- koje <sub>1</sub> ) nia	c <sup>2)</sup>	Si	Mn <sup>2</sup> ),3)	Р	s	scare
Sta	ale bez	obróbk	i cieplr	nej lub	po normal	izowan	iu	
StE 210.7	1.0307	R	0,17	0,45	≥ 0,35	0,040	0,035	
StE 240.7	1.0457	R	0,17	0,45	≥ 0,40	0,040	0,035	
StE 290.7	1.0484	RR <sup>5)</sup>	0,22	0,45	0,50+1,10	0,040	0,035	-
StE 320.7	1.0409	RR <sup>5)</sup>	0,22	0,45	1,00+1,50	0,040	0,035	
StE 360.7	1.0582	RR <sup>5)</sup>	0,22	0,55	0,70+1,30	0,040	0,035	
StE 385.7	1.8970	RR <sup>5)</sup>	0,23	0,55	0,90+1,50	0,040	0,035	5)
StE 415.7	1.8972	RR <sup>5)</sup>	0,23	0,55	1,00+1,50	0,040	0,035	
Sta	ale obra	abiane d	cieplno-	-plasty	cznie			
StE290.7TM	1.0429		0,12	0,40	0,50+1,50	0,035	0,025	
StE320.7TM	1.0430		0,12	0,40	0,70+1,50	0,035	0,025	
StE360.7TM	1.0578		0,12	0,45	0,90+1,50	0,035	0,025	
StE385.7TM	1.8971	RR <sup>5)</sup>	0,14	0,45	1,00+1,60	0,035	0,025	5)
StE415.7TM	1.8973		0,14	0,45	1,00+1,60	0,035	0,025	
StE445.7TM	1.8975		0,16	0,55	1,00+1,60	0,035	0,025	
StE480.7TM	1.8977		0,16	0,55	1,10+1,70	0,035	0,025	

- 1) R stale uspokojone, RR stale szczególnie uspokojone,
- Przy obniżeniu zawartości C o 0,01% jest możliwe dopuszczenie większej o 0,05% zawartości Mn, ale maksymalnie do 1,9%,
- Przy grubościach > 15 mm stali TM dopuszcza się przekroczenia zawarości Mn o 0,10%,
- A) Dla stali drobnoziarnisrtych zawartość Al jest ≥ 0,02% Al met.
- 5) Stale StE 360.7, StE 385.7 oraz StE 415.7 oprócz Al powinny zawierać inne pierwiastki, np. V i Nb dla uzyskania  $R_e$  i  $R_m$ . Dla stali StE 360.7, StE 385.7, StE 415.7 przy grubości  $\leq 15$  mm suma Nb+V powinna nie przekraczać – 0,15%, dla stali StE 290.7 TM, StE 320.7 TM, StE 360.7 TM – 0,16%, dla pozostałych stali TM – 0,18%. Przy grubościach > 15 mm dla stali StE 360.7 – 0,17%, a przy stalach StE 385.7 i StE 415.7 – 0,18%, przy StE 290.7 TM, StE 320.7 TM i StE 360.7 TM – 0,17%, dla pozostałych stali TM – 0,20%. Maksymalna zawartość V dla wszystkich przypadków wynosi  $\leq 0,12\%$ ,
- 6) Zawartość C nie może przekroczyć 0,04%.

Rodzaj	stali	Gra-	Wytrzy-	Dopuszczal	Wydłu- żenie	Trzpień	Ozn.
nieobro- bione lub normali- zowane	obrobione cieplno-pla- stycznie	plas- tycz- ności MPa min. 1,2	MPa tycznośc 4) małości 4) małości 4) doraźnej		A <sub>5</sub> % min.	przy próbie zgina- nia 180°	API 5LS
StE 210.7	-	210	320+440		26	2s	Α
StE 240.7	-	240	370+490		24	2s	В
StE 290.7	StE 290.7 TM	290	420+540	< 0.85	23	3s	X42
StE 320.7	StE 320.7 TM	320	460+580	\$ 0,05	21	4s	X46
StE 360.7	StE 360.7 TM	360	510+630		20	4s	X52
StE 385.7	StE 385.7 TM	385	530+680		19	5s	X56
StE 415.7	StE 416.7 TM	415	550+700	≤ 0,85 ≤ 0,90	18	5s	X60
-	StE 445.7 TM	445	560+710	≤ 0,90	18	6s	X65
-	StE 480.7 TM	480	600+750	≤ 0,90	18	6s	X70

## B) Własności mechaniczne 3)

- 1) Wyraźna granica plastyczności lub wyznaczona jako R<sub>e</sub>,
- 2) Jeżeli R<sub>e</sub> dla stali StE 415.7 TM jest większe od 520 MPa, dla StE 445.7 TM większe od 555 MPa, a dla StE 480.7 TM większe od 600 MPa, to stosunek granicy plastyczności do wytrzymałości doraźnej musi być ≤ 0,85,
- 3) Wartości w tablicy są ważne tylko do temperatury 50°C,
- 4) Dla stali bez obróbki lub po normalizowaniu od StE 210.7 do StE 320.7 wartości  $R_m$  nie mogą przekroczyć górnego poziomu powyżej 30 MPa, chyba że  $R_e/R_m < 0,8$ .
- 5) Wydłużenie A5 jest określane na próbkach poprzecznych.

Nominalna zewnętrzna	Rodzaj rury	Miejsce pobrania	Położenie próbki	Praca ude 0°0	erzenia C
d <sub>a</sub>		probki		Wartość średnia J 1), 2) min.	Wartość pojedyn- czej próbki J min.
do 500 <sup>3)</sup>	bez szwu grzewane spawane	materiał rodzimy	wzdłużnie do osi rury	47	38
powyżej 500	bez szwu zgrzewane spawane	materiał rodzimy	poprzecznie do osi rury	27 <sup>4)</sup>	22 <sup>4)</sup>
powyżej 500	spawane	spoina	poprzecznie do spony	27	22

C) Własności udarności KV, temperatura 0°C

- 1) Srednia wartość z 3 prób,
- 2) Próbę udarności przeprowadza się przy 0°C na próbkach ISO z ostrym karbem wg DIN 50 115. Dla próbek, których szerokość nie odpowiada znormalizowanej 10 mm, otrzymaną pracę uderzenia Av,p należy przeliczyć w pracę uderzenia Av wg wzoru Av = 8•10 Av,p/Sp, w którym Sp oznacza przekrój próbki w miejscu karbu.
- 3) W szczególnych przypadkach można przy zamówieniu uzgodnić dla rur o zewnętrznej średnicy od 300 do 500 mm i grubości ścianki od 6,3 mm badanie udarności w kierunku po obwodzie rury. Również wartość udarności można uzgodnić,
- 4) Dla gatunków stali StE 385.7 (1.8970), StE 385.7 TM (1.8971), StE 415.7 (1.8972), StE 415.7 TM (1.8973), StE 445.7 TM (1.8975) i StE 480.7 TM (1.8977) wynoszą minimalne wartości 31J dla wartości średniej i 24J dla wartości pojedynczej.

Stale mogą być uzyskane w procesie elektrycznym E, martekonwenterowym K. W zależności od procesu redukcji nowskim M i (sposobu uspokojenia) wyróżnić można stale nieuspokojone X, półuspokojone Y i uspokojone. W normie niemieckiej DIN 17100 wystale nieuspokojone U, uspokojone R i szczególnie różnia się uspokojone RR. Odpowiada to oznaczeniom w EN 10025. Stale te mobyć dostarczane jako nieobrobione cieplnie oraz normalizowagą ne. W przepisach niemieckich dla grupy stali niestopowych wyróżnia się dwie grupy jakości stali 2 i 3, np. St 37-2 lub St 37-3, które cechują się różnymi własnościami (tabl. 4).

Do produkcji rur niestopowych wykorzystuje się metody spawania elektrycznego i zgrzewania. W zależności od metody łączenia, zakresu badań i uprawnień zakładu w normie DIN 1626 przewiduje się różne współczynniki obliczeniowe spoin (tabl. 5).

W przypadku wymagań dotyczących temperatury pracy i ciśnienia w stalach niestopowych występują pewne zaostrzenia dotyczące zawartości węgla, siarki i fosforu oraz wymagana jest obecność 0,02% Al metalicznego w celu eliminacji ujemnych skutków obecności N (tabl. 6).

Tablica 3

	Ormonomia stali	Cmax	Mn <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>
Lp.	Oznaczenie stan	[%]	[%]	[%]	[%]
1.	A	0.21	0.90	0.030	0.030
2.	В	0.26	1.15	0.030	0.030
3.	X42	0.28	1.25	0.030	0.030
4.	X46	0.30	1.35	0.030	0.030
5.	X52	0.30	1.35	0.030	0.030
6.	X56	0.26	1.35	0.030	0.030
7.	X60	0.26	1.35	0.030	0.030
8.	X65	0.26	1.40	0.030	0.030
9.	X70	0.23	1.40	0.030	0.030
10.	X80	0.18	1.80	0.030	0.018

Skład chemiczny i własności mechaniczne stali na rury wg normy API Spec 5L

Uwagi: Zawartość Si musi być określona w analizie wytopowej. Nb, V, Ti i ich kombinacje stosowane wg uznania wytwórcy.

Lp.	Oznaczenie stali	R <sub>eH(0,5)</sub> min	R <sub>m</sub> min	As
		[MPa]	[MPa]	[%]
1.	А	207	331	28.5 - 36.0
2.	В	241	413	23.5 - 29.5
3.	X42	289	413	23.5 - 29.5
4.	X46	317	434	22.5 - 29.5
5.	X52	358	455	21.5 - 27.0
6.	X56	386	489	20.0 - 25.5
7.	X60	413	517	19.0 - 24.0
8.	X65	448	530	15.0 - 23.5
9.	X70	482	565	14.5 - 22.5
10.	X80	551	620	13.0 - 20.5

Uwagi: dla rur ekspandowanych  $R_e/R_m \leq 0.93$ 

A<sub>5</sub> - wartości zmienne w zależności od rodzaju próbki i

grubości ścianki (grubsza ścianka - wyższa wartość) Na żądanie zamawiającego wykonuje się badania przełomu próbek udarnościowych. Wg SR5 średnia z 3 próbek musi wykazywać min 60% przełomu ciągliwego dla 1 rury, a min 80% dla całego wytopu. Wg SR6 min. 80% badanych prób musi wykazywać min. 40% przełomu ciągliwego (dotyczy rur D  $\geq$  508 mm ze stali X52). Badania udarności wykonuje się w temp. podawanych przez zamawiającego, który podaje również wymaganą wartość energii.

#### Wskazówki dotyczące doboru stali

Wskazówki	Klasa jakości stali			
Stall	2	3		
Stopień uspokojenia	nieuspokojona lub uspokojona	szczególnie uspokojona		
Udział pierwiastków powodujących kru- chość	stosunkowo duży	mały		
Odporność na kruche pękanie	średnia	wysoka		
Zdolność do odkształcania	na zimno ograniczona, na gorąco	na zimno i na gorąco		
Spawalność	ogólnie dobra	lepsza niż dobra		
Możliwości przeno- szenia obciążeń	średnie	wysokie		

Tablica 5

Współczynniki jakości dla spawanych i zgrzewanych rur wg DIN 1626

Rodzaj	Metody	Metody	Dopuszczenia			
rury	Spawania	ZBIZEWania	hor	zakładowe		
			Dez	bez odbioru	z odbiorem	
Rury ogólnego stosowa- nia	wszystkie	wszystkie	0,5	0,7	-	
Rury z atestem	ty1ko dwustron- ne	St 34-2 St 37-2 wszystkie St 42-2 St 52-3 tylko elek- trycznie	-	0,9	0,9	
Rury szczegól- nie bada- ne z atestem	tylko dwustron- ne	tylko elektrycznie	-	-	1,0	

Tablica 6

A. Stale na rury zwykłej jakości wg DIN 1626. Składy chemiczne

Rodzaj stali		Stopień uspokojenia	Skład chemiczny %				
Oznacze- nie	Nr stali	kojona R uspoko- jona RR szczegól- nie uspo- kojona	С	P max.	S max.	N <sup>1)</sup>	0,02% Almet
USt 37.0 St 37.0 St 44.0 St 52.0 <sup>2)</sup>	1.0253 1.0254 1.0256 1.0497	U R R RR	0,20 0,17 0,21 0,22	0,050 0,050 0,050 0,040	0,050 0,050 0,050 0,040	0,007 0,009 0,009	tak

1) Zawartość N nie może przekroczyć 0,012% przy analizie wytopowej i 0,014% przy analizie wyrywkowej,

2) Zawartości 0,55% Si i 1,60% Mn przy analizie wytopowej i 0,6% Si i 1,7% przy analizie wyrywkowej nie mogą być przekroczone.

B. Stale na rury wyższej jakości wg DIN 1628. Składy chemiczne

Rodzaj stali		Stopień uspoko- jenia	Skład chemiczny %					
Oznacze- nie	Nr stali		C max.	Si max.	Mn	P max.	S max.	0,02% Almet
St 37.4 St 44.4	1.0255	RR RR	0,17	0,35 0,35	≥0,35 ≥0,40	0,040 0,040	0,040 0,040	tak tak
St 52.4	1.0581	RR	0,22	0,55	≤1,60	0,040	0,040	tak

Stale niskostopowe drobnoziarniste należą do grupy stali SPW o granicy plastyczności do 500 MPa. Stale te są zwykle dostarczane po wyżarzaniu normalizującym i cechują się drobną strukturą ferrytyczno-perlityczną (d ~ 0,02 + 0,04 mm) i wysokimi własnościami plastycznymi. Własności te uzyskuje się sterowaniem procesami wydzieleniowymi, umocnieniem odkształceniowym na zimno (poniżej temperatury rekrystalizacji), umocnieniem substytucyjnym, obecnościami obcych atomów w sieci i przede wszystkim rozdrobnieniem ziarn. Udział poszczególnych procesów w czasie

różny i zależy od wymaganych własności wytwarzania stali jest plastycznych i wytrzymałościowych. Stale te posiadają stosunkowo zawartość wegla. która ze wzgledu na ich spawalność nie niska przekroczyć wartości 0.2%. Również zawartość siarki powinna ogranicza się do wielkości 0.035%, a zawartość fosforu do 0.04%. Obecność pierwiastków stopowych, które powoduja w procesie spawania utwardzenie strefy wpływu ciepła, nie powinna przekroczyć wielkości niezbednych do uzyskania sumarycznego efektu umocnienia i rozdrobnienia. Również podwyższona obecność mikrododatków niobu, tytanu i aluminium jest niepożądana, w szczególwanadu. ności kiedy prowadzi do nadmiernego wydzielenia weglików.

Natomiast w przypadku stali obrabianych cieplno-plastycznie o granicy plastyczności powyżej 500 MPa istotne znaczenie posiada zawartość w stali mikrododatku Nb w ilości 0,02 do 0,03%, którego obecność w procesie regulowanego walcowania może prowadzić do wzrostu wytrzymałości do wielkości 800+1000 MPa [4].



Rys. 2. Tendencje rozwojowe stali o dużej udarności, przeznaczonej na rurociągi

Fig. 2. Development of line pipe steel GRS 550 TM (X80) with high toughness

W pracy [1] przedstawiono wysokowytrzymałe stale obrabialne cieplno-plastycznie. Wysokie własności mechaniczne uzyskano poprzez obniżenie zawartości węgla do 0,12% i zastosowanie kombinacji pierwiastków Mn-Nb-V i Mn-Nb-Ti (rys. 2). Obecność mikrododatków w procesie regulowanego walcowania oddziałuje bardzo korzystnie na rekrystalizację i procesy wydzieleniowe prowadząc do uzyskania bardzo drobnoziarnistych struktur stali o granicy plastyczności powyżej 480 MPa i temperaturach przejścia poniżej -20°C, np. StE480.7TM, (X70).

Stwierdzono możliwość dalszego zwiększenia granicy plastyczności powyżej 550 MPa, przy równoczesnym zmniejszeniu zawartości węgla poniżej 0,12% w celu zapewnienia dobrej spawalności takich stali. W stalach tych występują struktury bardzo drobnoziarniste ferrytyczno-bainityczne, które uzyskuje się poprzez obecność w stali Ni, Mo, mikrododatków Ti lub B, szybkie schłodzenie do temperatur 550+500°C po zakończeniu kontrolowanego walcowania i następnie chłodzenie w powietrzu. Stale takie posiadają również temperatury przejścia, wyznaczone próbą DWT przy 15% udziale przełomu kruchego poniżej -20°C.

Proces wytwarzania wysokowytrzymałych stali, przy którym:

- w stali występuje odpowiedni układ pierwiastków Mn-Nb-Ti,
- stosunek Ti/N odpowiada co najmniej stosunkowi stechiometrycznemu 3,4, a tytan wiąże azot również w procesie chłodzenia,
- w czasie chłodzenia następuje wydzielanie się bogatych w węgiel węgliko-azotków niobu, które ulegają rozpuszczaniu i przechodzą do roztworu przy ponownym podgrzewaniu kęsisk, ale przy temperaturach niższych, niż ma to miejsce w stalach bez Ti,
- duże prawdopodobieństwo wydzieleń ma korzystny wpływ na wielkość ziarna w procesie zgrubnej fazy walcowania, na proces rekrystalizacji w dolnym obszarze występowania austenitu,
- po procesie kontrolowanego walcowania następuje szybkie schłodzenie do temperatur 550+500°C, a dalsze chłodzenie do temperatury otoczenia odbywa się w wolnym powietrzu,

nazywany jest procesem TM-Macos (Thermal Mechanical Mannesmann Accelerated Cooled Steel).

Proces taki zapewnia przy zawartości w stali C ≤ 0,10% i ok. 1,5% Mn uzyskanie granicy plastyczności minimalnej 480 MPa, np. stal STE480.7TM, a przy wzroście zawartości Mn do 25 zapewnia granicę plastyczności powyżej 550 MPa, np. stal GRS550TM (X80).

Dalsze podwyższenie własności wytrzymałościowych stali uzyskać można poprzez zastosowanie ulepszania cieplnego, tzn. procesu hartowania i następnego wysokiego odpuszczania. Stale takie zawierają poniżej 0,2% C, a graniczne zawartości innych pierwiastków wynoszą 1,0% Si, 1,0% Mn, 0,025% P, 0,025% S, 0,02% N, 0,005% B, 2,0% Cr, 1,5% Cn, 1,0% Mo, 0,10% Nb, 2,0% Ni, 0,20% Ti, 0,20% V, 0,15% V. Dla stali zawierających niskie zawartości węgla (< 0,2%) temperatura punktu  $M_s$  mieści się w zakresie pomiędzy 400 i 440°C. Niskowęglowy martenzyt zawiera stosunkowo niewielką liczbe atomów interstytucyjnych C.

Już przy chłodzeniu w procesie hartowania obserwuje się efekt częściowego odpuszczania (self-tempering) związany z tworzeniem się zarodków cementytu. Prowadzi to do ominięcia niekorzystnego etapu tworzenia się węglików typu ε oraz do niższego poziomu naprężeń III rodzaju. Taki niskowęglowy martenzyt jest prawie wolny od austenitu szczątkowego, co łącznie umożliwia uzyskanie stali cechujących się wysokimi własnościami wytrzymałościowymi i dobrą plastycznością w obniżonych temperaturach.

#### 3. SPAWALNOSC RUROCIAGOW

Z definicji spawalności - przez to pojęcie rozumie się możliwość uzyskania metodami spawalniczymi rurociągów o odpowiednich własnościach spełniających warunki odbioru. Ze spawalnością rurociągów związane są pojęcia (rys. 3) [4]:

- przydatności stali do spawania,
- możliwości technicznych poprawnego wykonania połączeń spawanych w procesie wytwarzania i łączenia rur,
- niezawodności realizacji założonych funkcji przez pospawany rurociąg gazowy.



- Rys. J. Ogólne pojęcie spawalności rurociągów jako funkcji przydatności stali do spawania rur, możliwości technicznych i niezawodności konstrukcji
- Fig. J. General concept of pipeline weldability as function of pipe steels usefulness, technical possibility and structure reliability

Pojęcia te są uogólnieniem czynników decydujących o spawalności rur, z których najważniejszymi czynnikami są czynniki materiałowe decydujące o możliwości pospawania rur bez pęknięć zarówno w procesie spawania, jak i w czasie użytkowania rurociągów.

#### 3.1. Skłonność stali do pękania gorącego

Czynnikami decydującymi o pękaniu gorącym stali przeznaczonych na rurociągi gazowe są:skład chemiczny, warunki krystalizacji, geometria połączenia i spoiny. Obrazem graficznym wpływu Ww. czynników na możliwość pękania gorącego w spoinie lub w strefie przetopienia jest zdefiniowany przez Prochorowa temperaturowy zakres kruchości TZK (rys. 4).



spadek temperatury -

- Rys. 4. Zakres temperaturowej kruchości AT (TZK) stali: CS – dopuszczalne odkształcenie, CST – dopuszczalna intensywność odkształcania
- Fig. 4. Temperature area of fracture AT (TZK) for steel: CS - strain limit, CST - intensity limit of strain

Skład chemiczny, a w szczególności zawartość węgla, siarki i fosforu decyduje o szerokości TZK. Przyjmuje się [5], że sumaryczna zawartość S i P powinna być mniejsza od wielkości 0,007X% C. Inne kryteria wg [6] przedstawiono na rys. 5. W opracowaniu [7] przedstawiono wyrażenie na wielkość HCS (Hot Cracking Sensitivity)

HCS = 
$$\frac{C (S + P + Si/25 + Ni/100)}{3 Mn + Cr + Mo + V} \times 10^{3}$$

gdzie: C, S, P, Si, Ni, Mn, Cr, Mo, V - zawartość procentowa pierwiastków stopowych w stali.



Rys. 5. Wpływ składu chemicznego stali wysokowytrzymałych na skłonność do pękania gorącego. Próba Houldcrofta: a) C i P, b) P, C, Ni, Mo, Cr, V

Fig. 5. Influence of chemical composite of high strength steels on hot crack susceptibility. Houldcroft test: a) C and P, b) P, C, Ni, Mo, Cr, V

przypadku kiedy HCS < 2 stale nie są skłonne do pękania gorą-W Natomiast przy wielkościach HCS > 2 w złączach spawanych cego. będą występować pęknięcia, a w zakresie wielkości HCS = 2+4 pęknięcia mogą występować w zależności od geometrii połączenia lub spoiny. W przypadku analizowanych stali na rurociągi gazowe zestawionych w tablicach 1+2 dla stali po obróbce ciepino-plastycznej nie występuje niebezpieczeństwo pękania gorącego, o czym świadczą wielkości wskaźników zestawionych w tabl. 7. Niebezpieczeństwo takie może wystąpić dla pozostałych stali. Ponadto należy uwzględnić geometrię spoiny, gdyż przy niekorzystnym współczynniku kształtu spoiny mogą wystąpić pęknięcia gorące, co może mieć miejsce w procesie wytwarzania rur.

Tablica 7

Wskaźniki	skłonności (stale wg	do pęknięć gorących PN-79/H-74244 i DIN	HCS stali 17172)	na	rury

Gatunek stali	HCS (max)	Gatunek stali	HCS (max)	Gatunek stali	HCS (max)
G 205	3,2	StE 210.7	6,5	StE 290.7 TM	1,7
G 235	3,6	StE 240.7	5,2	StE 320.7 TM	1,6
G 295	4,2	StE 290.7	3,9	StE 260.7 TM	1,4
G 355	2,8	StE 320.7	3,4	StE 385.7 TM	1,6
G 390	2,4	StE 360.7	2,8	StE 415.7 TM	1,6
		StE 385.7	2,9	StE 445.7 TM	2,0
		StE 415.7	2,9	StE 480.7 TM	1,8

Uwaga: Do obliczeń HCS przyjęto typowe zawartości pierwiastków w stali

#### 3.2. Skłonność stali do pękania zimnego

Występowanie pęknięć zimnych w złączach spawanych zależy od zawartości martenzytu w SWC, zawartości wodoru dyfundującego w spoinie oraz od wielkości własnych naprężeń spawalniczych.

Zawartość martenzytu w SWC zależy od spawalniczego cyklu cieplnego, a w szczególności od czasu chłodzenia punktów SWC w zakresie temperatur 800+500°C. Czas chłodzenia t<sub>8-5</sub> jest funkcją metody spawania (η), energii liniowej (Ε), geometrii połączenia (F<sub>3</sub>) oraz temperatury przedmiotu (T<sub>0</sub>). W przypadku 3-osiowego rozchodzenia się ciepła typowego dla spawania wielowarstwowego blach grubych czas t<sub>8-5</sub> jest opisany wyrażeniem:

$$t_{8-5} = \frac{1}{2 \pi \lambda} \eta F_3 E \left( \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right)$$

gdzie: t<sub>8-5</sub> - czas chłodzenia w zakresie temperatur 800+500°C, λ - przewodność cieplna, J/s cm deg, η - sprawność termiczna metody spawania; E0 - 0,8+0,9, MIG-MAG - 0,7+0,8, TIG - 0,6+0,7, EK = 1, F<sub>3</sub> - współczynnik kształtu złącza, napoina - 1, spoina V wielowarstwowa - 0,9, spoina pachwinowa 0,67, E - energia liniowa spawania, kJ/cm, E = u J/V,

W badaniach [1] utwardzenia w SWC stali przeznaczonych na rurociągi gazowe określono zależności maksymalnych twardości SWC od składu chemicznego i czasu chłodzenia  $t_{8-5}$  (rys. 6). Stwierdzono jednak, że brak typowych korelacji pomiędzy twardością SWC a równoważnikiem węgla C<sub>E</sub> liczonym zgodnie z wytycznymi MIS-u i koncern Mannesmanna zaproponował wyliczenie równoważnika C<sub>E</sub>(M) wg wyrażenia:

 $C_{E}(M) = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + \frac{Cn}{20}$ ,

Obliczenia wg ww. wyrażenia pozwalają na uzyskanie poprawnych zależności maksymalnych twardości od czasu t<sub>8-5</sub> (rys. 6a). W pracach własnych [8] twardości określone na próbkach symulowanych dla różnych stali (C<sub>F</sub> - 0,31+0,35) na rury spiralne mieszczą się w zakresie rozrzutu wyników pomiarów twardości HV5 6b). Uzyskane struktury dla 3 badanych stali są podobne (rys. 7-9). Dla cykli  $t_{8-5} = 10$  s uzyskuje się struktury baini-(rys. tyczne z wyraźnym zaznaczeniem granic austenitu. W strukturach występują duże równoległe płytki ferrytu lamelarnego o różnej gestości dyslokacji. W strukturze tej obserwuje się wegliki pomiędzy płytkami oraz wewnątrz płytek [9]. Wzrost czasu chłodzenia (t<sub>8-5</sub> - 20-50 s) prowadzi do pojawienia się ferrytu ziarnistego o małej gęstości dyslokacji na granicach byłego austenitu. Przy czasach  $t_{8-5}$  = 100 s w strukturze dodatkowo pojawia się perlit.

W przypadku struktur bainitycznych w SWC w obecności naprężeń i wodoru mogą wystąpić pęknięcia zimne. W pracy [2] przedstawiono schematycznie zależność zawartości wodoru dyfundującego w obszarze spoiny przetopowej od czasu chłodzenia w zakresie 800 + 100°C (rys. 10) oraz od czasu po spawaniu (rys. 11).

Zbliżone zależności uzyskano na drodze komputerowego modelowania termodyfuzji wodoru w połączeniach spawanych [10]. W obliczeniach wykorzystano temperaturowe zmiany współczynników dyfuzji wodoru w efekcie cyklu cieplnego. Stwierdzono, że koncentracja wodoru w SWC może osiągnąć wartości 30+40% sumarycznej wielkości wodoru w spoinie i w materiale rodzimym. W SWC zawartość wodoru wzrasta i osiąga maksimum po około 12 godzinach, a następnie maleje. Wzrost temperatury złącza, co technologicznie odpowiada zastosowaniu wstępnego podgrzewania, powoduje przesunięcie maksimum w stronę niższych czasów oraz wyraźne zmniejszenie się koncentracji wodoru.



- Rys. 6. Wpływ czasu chłodzenia w zakresie temperatur 800-500°C t<sub>8-5</sub> na twardość maksymalną SWC stali: a) X60 -  $C_e = 0,46\%$ ;  $C_{e(M)} = 0,29\%$ ; X70 -  $C_e = 0,40\%$ ;  $C_{e(M)} = 0,23\%$ ; GRS550 TM (X80) -  $C_e = 0,41\%$ ;
- Fig. 6. Influence of cooling time in temperature range 800-500°C t<sub>8-5</sub> on max. hardness of steels:

a)  $X60 - C_e = 0, 46\chi; C_{e(M)} = 0, 29\chi; X70 - C_e = 0, 40\chi;$   $C_{e(M)} = 0, 23\chi; GRS550 TM (X80) - C_e = 0, 41\chi;$   $C_{e(M)} = 0, 19\chi [1]$ b)  $X56 - C_e = 0, 31 + 0, 35\chi [8]$  $C_e = C + Mn/5 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$ 

C<sub>e(M)</sub>=C+Si/25+Mn/20+Cr/10+Ni/40+Mo/15+V/10+Cu/20

- 22 -



c)

- Rys. 7. Struktury bainityczne dla cyklu  $t_{B-5} = 10s$  w przypadku
- stali X56 o równoważniku wegla: a)  $C_e = 0,31\%$ ; b)  $C_e = 0,35\%$ ; c)  $C_e = 0,34\%$ Fig. 7. Bainitic microstructure of X56 steel after simulation of thermal cycle  $t_{8-5} = 10$  s,  $C_e$  equivalent: a)  $C_e = 0,31\%$ ; b)  $C_e = 0,35\%$ ; c)  $C_e = 0,34\%$



a)

b)



- Rys. 8. Struktury bainityczne z ferrytem po granicach ziarn bylego austenitu dla cyklu  $t_{B-5} = 30$  s w przypadku stali X56:
- a)  $C_e = 0,31\%$ ; b)  $C_e = 0,35\%$ ; c)  $C_e = 0,34\%$ Fig. 8. Bainitic microstructure with ferrite along primary austenite grains, thermal cycle  $t_{8-5} = 30$  s, X56 steel,  $C_e$ equivalent: a)  $C_e = 0,31\%$ ; b)  $C_e = 0,35\%$ ; c)  $C_e = 0,34\%$







c)

- Rys. 9. Struktury ferrytyczno-bainityczne z niewielką ilością perlitu dla cyklu t<sub>8-5</sub> = 100 s w przypadku stali X56 o równoważniku wegla: a) C<sub>e</sub> = 0,31%; b) C<sub>e</sub> = 0,35%; c) C<sub>e</sub> = 0,34% Fig. 9. Bainitic/ferritic microstructure with small amount of perlite, thermal cycle t<sub>8-5</sub> = 100 s, X56 steel, C<sub>e</sub> equi-
- valent: a)  $C_e = 0,31\%$ ; b)  $C_e = 0,35\%$ ; c)  $C_e = 0,34\%$



- Rys. 10. Wpływ czasu chłodzenia t<sub>800-100</sub> na zawartość wodoru w obszarze SWC warstwy przetopowej (schemat)
- Fig. 10. Influence of preheating temperature (expressed in terms of the cooling time  $t_{8/1}$  on hydrogen accumulation in the critical root pass HAZ region (schematic)



Rys. 11. Zależność zawartości wodoru w obszarze SWC warstwy przetopowej od czasu (schemat)

Fig. 11. Time dependance of hydrogen concentration in the critical root pass HAZ region (schematic)

Badania zawartości wodoru dyfundującego w spoinach elektrod zasadowych i celulozowych [1,2,3] wykorzystywanych do spawania gazociągów wykazały zawartości wodoru od 5 do 10  $\text{cm}^3/100\text{g}$  stopiwa w spoinie elektrod zasadowych i powyżej 40  $\text{cm}^3/100\text{g}$  w stopiwie elektrod celulozowych.

Do oceny wpływu zawartości wodoru na skłonność stali do pękania zimnego w pracy [3] wykorzystano próbę Tekkena. Wyniki wskazują wyraźnie, że skłonność połączeń spawanych ze stali GRS550TM (X80) do pękania wzrasta wraz ze wzrostem zawartości wodoru i maleje ze zmniejszaniem się sztywności złącza (grubości próbki), co pokazano na rys. 12.



- Rys. 12. Wyniki próby Tekken dla stali GRS550 TM (X80) 1 - elektroda zasadowa, zawartość wodoru dyfundującego 5 ml/100 g stopiwa, 2 - elektroda zasadowa, zaw. wodoru dyf. 5 ml/100 g, 3 - elektroda zasadowa, zaw. wodoru dyf. 10 ml/100 g, 4 - elektroda celulozowa, zaw. wodoru dyf. 40 ml/100 g
- Fig. 12. Behaviour of steel GRS550 TM (X80) in Tekken Test 1 - basic electrode, Hydrogen content  $H_D$  5 ml/100g of weld deposit, 2 - basic electrode  $H_D$  = 5 ml/100g, 3 basic electrode  $H_D$  = 10 ml/100g, 4 - cellulosic electrode  $H_D$  = 40 ml/100g

Do badań skłonności stali X70 i X80 do pękania zimnego wykorzystano również próbę implant-test. Wyznaczone wielkości granicznego naprężenia  $\sigma_{SFL}$  zestawiono na rys. 13. Graniczne naprężenie  $\sigma_{SFL}$  wzrasta wraz ze zmniejszaniem się zawartości wodoru w stopiwie (elektrody zasadowe) oraz wraz ze wzrostem temperatury wstępnego podgrzewania. Temperatura wstępnego podgrzania zapewniająca brak pęknięć zimnych rośnie ze wzrostem zawartości wodoru w spoinie, np. powyżej 120°C dla H<sub>o</sub> > 40 cm<sup>3</sup>/100g (elektrody celulozowe) oraz ze wzrostem równoważnika węgla. Zależności te przedstawiono na rys. 14 i 15 [2,3]. Niebezpieczeństwo pękania zależy również od grubości spawanych elementów oraz rodzaju złącza (rys. 16 i 17). W przypadku stali wysokowytrzymałych na rurociągi gazowe przy spawaniu montażowym na budowach autorzy technologii [1,2,3] dla uniknięcia pęknięć zalecają podgrzewanie wstępne do temperatury 80°C przy spawaniu elektrodami zasadowymi oraz 120°C przy spawaniu elektrodami celulozowymi.



- Rys. 13. Wyniki próby implant przeprowadzonej elektrodami celulozowymi i zasadowymi dla stali GRS550 TM (X80) i stali XTO. ● - elektroda celulozowa, zawartość wodoru dyfundującego 40 ml/100 g, ■ - elektroda zasadowa, zawartość wodoru dyfundującego ≤ 5 ml/100 g. Energia liniowa łuku 8-9 kJ/cm, grubość płyty 20 mm
- Fig. 13. Results of implant test performed with cellulosic and basic electrodes on GRS550 TM (X80) and X70 steels.

   cellulosic electrode H<sub>D</sub> = 40 ml/100 g, = basic electrode H<sub>D</sub> ≤ 5 ml/100 g. Heat input 8-9 kJ/cm. Plate thickness 20 mm



- Rys. 14. Wpływ zawartości wodoru dyfundującego na temperaturę podgrzewania, określoną na podstawie próby implant, dla spawania stali GRS550TM(X80). Warunki spawania: energia liniowa łuku 8-9 kJ/cm, grubość płyty 15-20 mm. Równoważnik węgla C<sub>E</sub> wg MIS 4 - 0,42%, 4 - 0,41%, ● - 0,43%, o - 0,44%
- Fig. 14. Influence of the hydrogen content on the preheating determined in the implant test for the crack-free welding of steel GRS550 TM (X80). Welding conditions: heat input 8-9 kJ/cm, plate thickness 15-20 mm. C - equivalent IIW Δ - 0,42%, Δ - 0,41%, • - 0,43%, o - 0,44%



Rys. 15. Zależność temperatury podgrzewania określonej na podstawie próby implant od równoważnika węgla C<sub>E</sub> wg Mannesmanna. Spawanie elektrodami zasadowymi (linia 1 - zawartość wodoru dyfundującego 5 ml/100 g, linia 2 - zaw. wodoru 10 ml/100 g) i celulozowymi (linia 3 - zaw. wodoru 40 ml/100 g). Warunki próby implant: próbka ø 6 mm z karbem spiralnym, energia liniowa łuku 8-9 kJ/cm, grubość płyty 20 mm
Fig. 15. Preheating temperature for crack resistance as a fun-

Fig. 15. Thenealing temperature for the resistance as a function of the C - equivalent acc. to Mannesmann. Welding with basic coated electrodes (1 - Hydrogen content  $H_D = 5 \text{ ml/100 g of weld deposit, } 2 - H_D = 10 \text{ ml/100 g}$ ). Welding with cellulosic electrodes (3 -  $H_D = 40 \text{ ml/100 g}$ ). Conditions of implant test: specimen 6 mm diameter with spiral notch, heat input 8-9 kJ/cm, plate thickness 20 mm

- 30 -



Rys. 16. Obszary dopuszczalnych energii liniowych łuku w zależności od grubości blach ze stali StE460: a) złącza doczołowe, b) złącza pachwinowe. Warunki spawania: temperatura podgrzewania 150°C, t<sub>8/5max</sub> = 255, t<sub>8/5min</sub> = 65

Fig. 16. Area of heat input limit versus StE460 steel plate thickness: a) butt joints, b) fillet joints. Welding conditions: preheat temperature 150°C, t<sub>8/5max</sub> = 25s,



Rys. 17. Obszary dopuszczalnych energii liniowych łuku w zależności od grubości blach ze stali StE690: a) złącza doczołowe, b) złącza pachwinowe Warunki spawania: temperatura podgrzewania 150°C, t 8/5max = 20 s, t 8/5min = 10 s

Fig. 17. Area heat input limit versus StE690 steel plate thickness: a) butt joints, b) fillet joints. Welding conditions: preheat temperature 150°C, t8/5max = 20 s, t8/5min = 10 s 3.3. Skłonność stali do pękania kruchego

Pękanie kruche połączeń spawanych jako rodzaj pękania eksploatacyjnego może występować w materiale rodzimym, SWC oraz w spoinie. Obecność takiego pękania jest związana z przejściem materiału ze stanu plastycznego w stan kruchy, spowodowanym czynnikami zewnętrznymi i obciążeniem eksploatacyjnym. Do czynników tych należy zaliczyć:

- obecność karbów,
- obniżenie temperatury,
- zwiększenie szybkości odkształcania,
- i wieloosiowy stan naprężenia.

Próby odporności na pękanie kruche zmierzają do wyznaczenia wielkości krytycznych (np. K<sub>IC</sub>), charakteryzujących jakość złącza spawanego, które w połączeniu z wielkościami obliczanymi dla obciążenia eksploatacyjnego pozwalają na wyznaczenie wymiarów geometrycznych spawanych konstrukcji.

Porównanie wyników prób pękania kruchego, a w szczególności wyników prób udarnościowych pozwala na określenie spawalności i przydatności stali na konstrukcje spawane.



Rys. 18. Zależność temperatury przejścia i twardości SWC od czasu chłodzenia t<sub>8/5</sub> (schemat)

Fig. 18. Transition temperature and HAZ hardness versus t<sub>8/5</sub> cooling time (schematic)

W przypadku spawania stali o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości o odporności połączenia na kruche pękanie decydować będą przede wszystkim własności plastyczne złącza. Własności mechaniczne złącza są wynikiem oddziaływania spawalniczego cyklu cieplnego, a w szczególności wielkości czasu chłodzenia w zakresie temperatur 800+500°C ( $t_{8-5}$ ). Schematycznie na rys. 18 przedstawiono charakterystyczne cechy materiałowe HV i Tp decydujące o kruchości SWC w funkcji czasu chłodzenia t $_{8-5}$ . Zabiegi technologiczne przy spawaniu zwykle mają na cełu szukanie pewnego kompromisu pomiędzy własnościami wytrzymałościowymi (HV) i plastycznymi (Tp), stąd parametry spawania powinny zapewniać możliwość uzyskania czasów chłodzenia t $_{8-5}$  w obszarze II (rys. 18).

Innym sposobem określenia spawalności stali, głównie stali SPW i wysokiej wytrzymałości jest wykorzystanie kryterium mechaniki pękania. W tym przypadku współczynnik intensywności naprężeń K opisuje pole naprężeń w pobliżu wierzchołka szczeliny, a porównanie jego wielkości ze współczynnikiem krytycznym K<sub>C</sub> pozwala określić dopuszczalne naprężenie, wielkość wady lub skłonność stali do pękania kruchego Hp dla zbiornika ciśnieniowego lub rurociągu o grubości blachy t. Przy założeniu obecności wady o powierzchni 2txt dopuszczalne naprężenie można określić z wyrażenia:

$$\sigma_{dop} = 0,55 \frac{K_{Ic}}{\sqrt{t}}$$
 lub

$$\sigma_{dop} = \left( \frac{\delta_c E R_e}{\Pi t} \right)^{1/2}$$

gdzie: σ<sub>dop</sub> - naprężenie dopuszczalne, MPa,

K<sub>Ic</sub> – krytyczny współczynnik intensywności naprężeń, MPA √m<sup>-</sup>,

δ<sub>c</sub> - wielkości COD, m,

E – moduł Younga, MPa,

R<sub>o</sub> - granica plastyczności, MPa,

t - grubość blachy, m.

Kryterium mechaniki pękania przy zastosowaniu do połączeń spawanych posiada wiele wad, m.in.: duży koszt badań dla wyznaczenia wielkości krytycznych, trudności przeniesienia wyników z próbek na skomplikowane elementy oraz trudne zdefiniowanie położenia i wielkości wady w złączach spawanych.

Do oceny skłonności do pękania kruchego można wykorzystać również koncepcję temperatury ciągliwości zerowej NDT, w której naprężenie granicy plastyczności osiąga wartość naprężenia pękania (rys. 19). Na temperaturę NDT posiada wpływ stan naprężeń będący m.in. wynikiem cech geometrycznych konstrukcji spawanej. W praktyce miarą spawalności konstrukcji jest wielkość  $\Delta T$  stanowiąca różnicę między T<sub>NDT</sub> a temperaturą przejścia T<sub>p</sub> (KV) wyznaczoną próbą udarnościową KV przy kryterium pracy łamania KV = 27 J.

$$\Delta T = T_{NDT} - T_{p} (KV)$$



Rys. 19. Zależność granicy plastyczności i wytrzymałości od temperatury

Fig. 19. Yield point and strength versus temperature

Tablica 8

Poprawki  $\Delta T$  do wyliczenia temperatury przejścia w stan kruchości różnych złączy T<sub>KZ</sub> w stosunku do temperatury wyznaczonej próbą KV, T<sub>KZ</sub> = T<sub>KV</sub> +  $\Delta T$ 

Rodzaj złącza	Grubość blachy mm	∆T °c
F złącze nakładkowe	10 20 30 40	- 20 - 14 - 9 + 4
F złącze nakładkowe	10 20 30 40	- 75 - 70 - 65 - 53
F złącze doczołowe	10 20 30 40	- 50 - 48 - 33 - 30
F F złącze doczołowe	10 20 30 40	- 130 - 120 - 108 - 103

W tablicy 8 zestawiono wielkości ΔT dla kilku typowych połączeń spawanych ze stali RSt37-2 [11].

Najczęściej jednak skłonność stali i połączeń spawanych do pękania określa się na podstawie wyników próby udarności KV przeprowadzonej w zakresie temperatur +20 + -20°C. Tak wyznaczona krzywa przejścia w stan kruchości pozwala na określenie temperatury przejścia, np. przy kryterium KV = 27 J, pozwala na porównanie własności plastycznych spoiny i SWC oraz porównanie własności złącza z własnościami stali.

Metodę tę wykorzystano przy badaniach własności złączy spawanych w przypadku rurociągów gazowych ze stali wysokiej wytrzymałości obrabianych cieplno-plastycznie. Przy spawaniu rurociągów gazowych wylotowych ze stali GRS550 TM uzyskane udarności dla spoiny i SWC przedstawiono na rys. 20. Wyniki udarności SWC są wyraźnie wyższe od udarności spoiny, choć niższe od udarności materiału rodzimego (KV (0°C) = 188 J) [3].



Rys. 20. Udarność SWC i spoiny złączy wykonanych elektrodami zasadowymi. Spawana rura ø 1420 mm x 15,6 mm ze stali GRS550 TM

Fig. 20. Weld and HAZ toughness resulting from combined vertical -down and vertical-up welding with basic electrodes; pipe GRS550 TM, 1420 x 15,6 mm

Świadczy to o bardzo dobrej spawalności stali GRS550 TM, w której skład chemiczny i układ wydzieleń eliminuje praktycznie występowanie grubej, przegrzanej struktury o niskiej udarności w SWC. Również w badaniach symulacyjnych własności SWC stali X56 po obróbce cieplno-plastycznej stwierdzono małą skłonność struktury SWC do wzrostu ziarn przy różnych czasach chłodzenia t<sub>8-5</sub>, a uzyskiwane wielkości udarności były niższe od udarności w stą-
nie dostawy (rys. 21), co jest pewną prawidłowością w badaniach symulowanych SWC. W rzeczywistości udarności SWC złącza są wyższe.



Rys. 21. Zmiany udarności w funkcji czasu t<sub>8-5</sub> w temperaturach badania: -20°C, -40°C, -60°C; a) stał X65, C<sub>e</sub> = 0,31%; b) stał X65, C<sub>e</sub> = 0,35%

Rys. 21. Notch toughness versus t<sub>8-5</sub> time. Test temperatures: -20°C, -40°C, -60°C; a) X65 steel, C<sub>e</sub> = 0,31%; b) X65 steel, C<sub>e</sub> = 0,35% Wyniki badania udarności SWC stali po obróbce cieplno-plastycznej wskazują, że o odporności na pękanie kruche rurociągów decydują własności plastyczne spoin. Własności te zależą przede wszystkim od techniki spawania i materiałów dodatkowych stosowanych przy spawaniu rur i rurociągów.

#### 3.4. Inne pęknięcia decydujące o spawalności

Ważnym problemem w konstrukcjach spawanych są pęknięcia lamelarne. Są one wynikiem obecności w walcowanej stali płaskich wtrąceń niemetalicznych, np. MnS, SiO<sub>2</sub> lub Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Występują one w stalach uspokojonych lub specjalnie uspokojonych. Pęknięcia posiadają charakter schodkowy i mają miejsce w połączeniach teowych. W przypadku rurociągów, ze względu na czystość metalurgiczną stali oraz brak połączeń teowych pękanie lamelarne nie stanowi problemu technologicznego.

Również pęknięcia wyżarzeniowe nie decydują o spawalności stali obrabialnych cieplno-plastycznie. Praktyczna technologia montażu rurociągów nie przewiduje obróbki cieplnej po spawaniu.

W pracy [12] wspomina się o występowaniu korozji naprężeniowej w rurociągach gazowych i obecności mikropęknięć w rurach po eksploatacji ok. 20-letniej. Pęknięcia te mogą być częściowo "załeczone" poprzez przeprężenie odcinków rurociągu lub wymianę skorodowanych odcinków.

## 4. SPAWANIE ŁUKIEM KRYTYM W PROCESIE WYTWARZANIA RUR DUZYCH SREDNIC

W latach 70 i 80 obserwuje się wyraźny wzrost produkcji rur stalowych, przy czym udział w produkcji rur bezszwowych ciągnionych maleje w porównaniu do udziału rur spawanych (tabl. 9)

Tablica 9

Udział rur spawanych i bezszwowych w produkcji rur

Lata	Procentowy udział rur %					
	spawanych	bezszwowych				
1960	51	49				
1968	60	40				
1985	70	30				

Technologia budowy tranzytowych rurociągów gazowych wymaga stosowania rur dużych średnic od 500 mm do 2500 mm. Rury dużych średnic ze względów technicznych (wymagania kwalifikacyjne) i ekonomicznych produkowane są głównie jako wzdłużnie i spiralnie spawane, przy czym w zakresie średnic 500-1600 mm koszty wytwarzania rur wzdłużnie spawanych są porównywalne z rurami spiralnie spawanymi. Natomiast powyżej średnic 1600 (64 cale) dostępne są tylko rury spiralnie spawane.

Produkowane obecnie spawane rury dużych średnic posiadają współczynnik wytrzymałości złącza spawanego równy 1, co oznacza, że wytrzymałość spoiny i SWC jest co najmniej równa wytrzymałości blachy.

Rury ze spoiną wzdłużną mogą być spawane jednostronnie na podkładce topnikowej [17] lub znacznie częściej dwustronnie, przy czym można spawać jedną elektrodą lub wieloelektrodowo [18]. Rury ze spoiną spiralną są zwykle spawane dwustronnie jedno- lub wieloelektrodowo.

#### 4.1. Spawanie wzdłużne łukiem krytym rur o dużych średnicach

Rury dużych średnic ze spoinami wzdłużnymi są zwykle spawane dwustronnie. W przypadku spawania jednoelektrodowego przygotowanie krawędzi do spawania i zalecane przez firmę ESAB parametry zestawiono w tablicy 10.

Przy \* spawaniu rur można wykorzystać źródła prądu stałego o płaskiej lub opadającej charakterystyce oraz przemiennego o opadającej charakterystyce statycznej (rys. 22). W przypadku stosowania źródeł o opadającej charakterystyce szybkość podawania drutu elektrodowego jest sterowana napięciem łuku, natomiast przy zastosowaniu prostowników o płaskiej charakterystyce drut podawany jest ze stałą szybkością i ma miejsce samoregulacja łuku spawalniczego.

Przy spawaniu wieloelektrodowym spoin wzdłużnych wykorzystuje się układy przedstawione na rys. 23.

W przypadku spawania spoin wzdłużnych przy rurach o dużych średnicach każda elektroda jest zasilana z osobnego źródła prądu i dla każdej z osobna można regulować parametry łuku. Zasadniczo proces spawania odbywa się w jednej kąpieli metalowej i żużlowej. W takich przypadkach odstęp między elektrodami wynosi zwykle od 12 do 16 mm [20] i rzadko przekracza wielkość 25 mm (1 cala) [21]. Istnieje również możliwość spawania na tzw. "gorącym żużlu", kiedy istnieje kilka kąpieli metalicznych, odpowiednio do ilości drutów elektrodowych. W takim przypadku odległość między drutami może dochodzić do 200 mm.

Ze schematów spawania wieloelektrodowego na rys. 23 wynika, że można przy spawaniu wykorzystać źródła prądu stałego i przemiennego. W zasadzie, na pierwszej elektrodzie stosuje się zwykle prąd stały (+ na elektrodzie), który zapewnia głębokie wtopienie, a na kolejnych prąd przemienny zapewniający m.in. ładny wygląd lica. Głębokie wtopienie prowadzi do niekorzystnego układu krystalizacji pierwotnej, w którym kryształy kolumnowe tworzące spoinę powstają prawie poziomo i mogą prowadzić do gorących pęknięć krystalizacyjnych (rys. 24). Stąd konieczność ponownego przetopienia krystalizującej spoiny kolejnym łukiem, który zasilany prądem przemiennym posiada mniejszą głębokość penetracji (2/3 głębokości łuku stałego) i zapewnia ładne lico spoiny.

Tablica 10

Sposób przygotowania krawędzi i zestawienie zalecanych parametrów spawania łukiem krytym [19]

Rodzaj złącza	Grubość blachy mm	Średni– ca dru– tu mm	Nr warstwy	Napięcie łuku V	Natężenie prądu A	Prędkość spawania m/h
	6	4	1	35	300	50
	8	4	1	35	350 450	46
1	10	4	1	35	500	42
2	12	5	2	35	550 600	38
	14	5	2 1 2	35 35 35	700 650 750	35
70.	16	5	1	35	700	35
1	18	6	1	36	800	30
<u> </u>	20	6	2 1 2	38 36 38	925 850	27
	18	6	1	36	700	30
70.	20	6	1	36 36 36 36	800	25
×=+1	25	6	1		850	20
	30	6	1 2	36 36	900 900 1000	15
	2	2	1	28	325	75
	4	2,5	1	30	450	40
	6	3	1	31	510	30
	8	3	1	32	525	26
∠_ <sub>Cu</sub>	10	3	1	33	600	23
	12	3	1	33	625	20

- 40 -

- 41 -



Rys. 22. Typowe charakterystyki statyczne dla prostowników spawalniczych: LG800-1 – charakterystyka opadająca, LCG800-1 – charakterystyka plaska, VDE – charakterystyka łuku

Fig. 22. Typical static characteristics of welding rectifiers: LG800-1 - drooping characteristic, LCG800-1 - flat characteristic, VDE - arc characteristic

Stosowanie do spawania rur układów wieloelektrodowych umożliwia uzyskanie większych szybkości spawania. Na przykład dla spawania blach o grubości ok. 12 mm przy spawaniu 1 elektrodą szybkość wynosi ok. 1 m/min, przy spawaniu 2 elektrodami (tandem) do 2 m/min, a przy spawaniu 3 elektrodami szybkość spawania dochodzi do 3 m/min.



Rys. 23. Układy elektrod przy wieloelektrodowym spawaniu łukiem krytym

Fig. 23. Electrode sets at multielectrode submerged arc welding



Rys. 24. Wpływ geometrii spoiny na skłonność do pękania krystalizacyjnego. Kryterium: B/T ≥ 1 - brak pęknięć, B/T ≤ 1 - pęknięcia

Fig. 24. Influence of weld geometry on crystallization cracking. Criterion:  $B/T \ge 1$  - no cracks,  $B/T \le 1$  - cracks Przykłady warunków spawania wieloelektrodowego przedstawiono w tablicach 11 i 12 [20].

Tablica 11

 $\sim 1$ 

Parametry spawania tandemowego. Drut elekt. S2, topnik LW320

Gru-	Stro-	Ilość	Drut Próg		Prąd spaw.		Napięcie		Szyb-
bla-	złą-	waistw	elekt.	a	1,	2,	1,	2,	spaw.
mm	CZA		10, IIII	шш	A	А	v	V	cm/min
10	1	-	2 5+2 5		500	350	30	36	110
10	2	-	2, J+2, J		600	350	30	36	110
20	1	1	4 + 4	7	600	600 600	26	27	100
	2	-	1 + 1		900	500	28	36	110
	1	1 2-3			500	500 650	26	27	120
30	2	1 2-3	4 + 4	4	900 650	650 650	32 30	32 32	75 120
Przys	totowar	nie krav	vedzi do	spawa	ania				
	P	rzygotowa	nie krawędz	i					
				1111111	¥/////	////////	///////////////////////////////////////		
	9	od 8 do	12 mm		-		a = 7		
				7	60°7	Γ			
					SAAAA	HHAN			
	g	od 12 do	24 mm		<u> </u>	1			
						'	a = 4		
				7	60°				
					VIIII	<u> </u>			
					X444	IHHH			
				<u></u>	70°	///////////////////////////////////////	///////		
	ç	g od 24 do	50 mm	1		,			
	I	folerancje	: Próg a +	0,5 mm	; Kat +3	•;			
	(	)dstęp ≼ O	,5 mm		-0				1
	1	Istawienie	elektrod	~	.=(+)				
			010111100	70°	9	oo			
	<u> </u>								
					12 k	ierunek	spawania		

Uwaga: drut S2 - drut niskomanganowy wg DIN 8559, topnik LW320 jest topnikiem zasadowym firmy Messer Griesheim, B = 1,5 Zestawienie warunków spawania 3-elektrodowego. Drut elekt. S2, topnik LW 642



Uwaga: drut S2 - drut niskomanganowy wg DIN 8559, topnik LW642 jest topnikiem zasadowym firmy Messer Griesheim, B = 1,6

Warunki spawania tandemowego według danych amerykańskich [21] zestawiono w tablicy 13. Ogólnie w USA stosuje się wyraźnie wyższe parametry prądowe, szczególnie na pierwszej elektrodzie.

Tablica 13

Zestawienie warunków spawania tandemowego wg [21]

Pozycja spawania: pozioma Spawalność stali: dobra Spawanie dwustronne		1 8	~		7	1.1.	-12º	etupek
	19,1-3		4	×.	2		st	bawania
Grubość blachy (mm)	19	9,1	2	5,4	3:	1,8	30	3,1
Warstwa	1	2	1	2	1	2	1	2
Srednica elektrody (mm): prowadzącej nr 1	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
wleczonej nr 2	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
Natężenie prądu (A): elektroda nr 1 prąd stały, + na el.	950	1050	950	1050	950	1075	1075	1150
elektroda nr 2 prąd przemienny	700	800	700	850	750	850	850	900
Napięcie łuku (V): elektroda nr 1	35	36	36	38	36	38	36	40
elektroda nr 2	40	41	41	43	42	43	43	44
Prędkość spawania (m/min)	1,0	0,76	0,66	0,56	0, 51	0,42	0,51	0,38
Zużycie elektrod (kg/m)	1,	.00	1,	46	1,	98	2,	51
Zużycie topnika (kg/m)	0,72.	-0,96	0,90	-1,28	1,38	-1,95	1,50	-2,10
Całkowity czas (h/m)	0,0	0386	0,0	0554	0,1	0726	0,0	0769
Głębokość A (mm)	3,2		6,	4	9,	. 5	11,	. 1
Głębokość B (mm)	6,4		9,5		12,7		15,	9
Kąt C (deg)	90		80		70			50
Kąt D (deg)	ç	90	80		70		0.	70
Odstęp elektrod S (mm)	22,	, 2	25,	4	28,	, 6	31	, 8

Obecnie w produkcji rur dużych średnic przeważają układy wieloelektrodowe, głównie 3-elektrodowe. Stosuje się również metodę sczepiania metodą MAG z zewnątrz rury i kolejno spawania 3-elektrodowego od wewnątrz rury, a następnie od zewnątrz.

#### 4.2. Spawanie spiralne łukiem krytym rur

Rury spiralnie spawane są produkowane w procesie ciągłym z taśmy gorąco walcowanej odwijanej z kręgów lub z blach, które są wzajemnie spawane tworząc długą taśmę. Dwustronne spiralne spawanie poprzedza proces zwijania taśmy wokół trzpienia lub poprzez jej podawanie pod pewnym kątem w kierunku osi rury.





Fib . : Dical static characteristic of welding transformer LT .00-1, VDE - arc characteristic

awanie może odbywać się jako jednoelektrodowe oraz wieloelektrodowe prądem stałym lub przemiennym. W przypadku spawania jednoelektrodowego można spawać prądem przemiennym, wykorzystując transformator o opadającej charakterystyce (rys. 25) lub prądem stałym (+ na elektrodzie) prostownikiem o płaskiej charakterystyce statycznej (rys. 22). Zastosowanie płaskiej charakterystyki pozwala zmniejszyć gęstość prądu o 60+80 A/mm<sup>2</sup>, w porównaniu do spawania prądem przemiennym. Płaska charakterystyka umożliwia uzyskanie drobnokroplowego (pseudonatryskowego [22]) przechodzenia metalu w łuku, co jednak pogarsza wygląd lica. Przy spawaniu prądem stałym rur spiralnych obserwuje się również ugięcie łuku elektrycznego, spowodowane wpływem geometrycznym spawanej rury. Zastosowanie w tych przypadkach prądu przemiennego zapobiega ugięciu łuku i przy nieco wyższych parametrach prądowych zapewnia równomierne kroplowe przechodzenie metalu do jeziorka i ładny wygląd lica spoiny. W tablicy 14 zestawiono typowe warunki spawania dwustronnego rur spiralnych.

Tablica 14

Parametry spawania dwustronnego i schemat wykonania połączenia

Grubość blachy S mm	Strona złącza	Prąd spaw. A	Napięcie V	Szybkość spawania cm/min	Drut elekt. ø mm	Przygot. krawędzi
6	1 2	450 500	32 30	70-100 70-100	3-4 3-4	I
8	1 2	450 550	32 30	70-105 65-105	3-4 4	I
10	1 2	500 680	32 32	70- 80 60- 80	4 4	I
12	1 2	600 750	33 34	60 55- 65	4-5 5	Ι
14	1 2	650 800	33 35	50 45- 50	5 5	I
16	1 2	700 850	33 35	45 40	5 5	
18	1 2	850 1100	36 38	40 35	5-6 5-6	Y
20	1 2	950 1100	36 38	40 35	5-6 5-6	
12,7	1 2	800 900	37 37	90 90	5 5	[22]
12,7	1 2	700 950	35 36	70 70	5 4,8	[ [21]

jeżeli jest konieczne, należy ukosować \ 2. warstwa |



Zastosowanie do spiralnego spawania rur układów wieloelektrodowych umożliwia uzyskanie następujących korzyści:

- większa ilość stopiwa,
- wyższa szybkość spawania,
- wyższa dopuszczalna granica obciążenia prądowego topników,
- możliwość dwustronnego spawania rur o grubościach do 40 mm,
- wyższa odporność na powstawanie gorących pęknięć krystalizacyjnych,
- zmniejszenie sumarycznej energii liniowej spawania,
- korzystniejsze struktury w SWC,
- możliwość optymalnego przyłączenia źródeł prądu, powodującego małe ugięcie łuków i równomierne obciążenie sieci.

W praktýce przemysłowej przyjmuje się, że spawanie tandemowe stosowane jest do spiralnego spawania rur o średnicach powyżej 700 mm, a spawanie 3-elektrodowe do rur o średnicach powyżej 900 mm. Ograniczenia te wynikają z konieczności utrzymania dużego jeziorka w pozycji zbliżonej do poziomej. Warunki spawania spiralnego zalecane przez producentów rur zbliżone są do parametrów w tablicach 11+13.

O jakości spoin spiralnych decyduje ich geometria oraz własności mechaniczne. O geometrii i wyglądzie zewnętrznym spoin decyduje ustawienie głowic spawalniczych oraz prawidłowe zasypywanie łuku spawalniczego topnikiem, natomiast o własnościach mechanicznych spoin decyduje przede wszystkim dobór materiałów dodatkowych.

#### 4.2.1. Ustawienie głowic spawalniczych

Ustawienie głowicy wewnętrznej i zewnętrznej przy spawaniu spiralnym rur zależy od ich średnicy, grubości ścianki oraz prędkości spawania. Schemat wpływu ustawienia głowicy na kształt spoiny przedstawiono na rys. 26 [20].

Podobnie w przypadku głowicy wewnętrznej ustawienie decyduje o kształcie spoiny [21], co przedstawiono na rys. 27.

Praktycznie przy spawaniu spiralnym ustawienie głowicy definiowane jest przez następujące parametry geometryczne (rys. 28):

- wielkość przemieszczenia "w" pierwszej elektrody od wierzchołka rury,
- kąt pochylenia "α" pierwszej elektrody w stosunku do osi pionowej,
- wolny wylot pierwszej elektrody "1".



Rys. 26. Wpływ ustawienia elektrody na kształt spoiny obwodowej Fig. 26. Influence of electrode setting on shape of circumferential weld



Rys. 27. Wpływ przemieszczenia elektrody na kształt spoiny. Przemieszczenie, przy którym unika się ściekania płynnego jeziorka, daje poprawny kształt spoiny (a). Nadmierne lub nieodpowiednie przemieszczanie daje niewłaściwy kształt spoiny (b) i (c)

Fig. 27. Influence of electrode displacement on weld shape

Przy spawaniu 1-elektrodowym obserwuje się wraz ze wzrostem wielkości "w" w układzie zewnętrznym wzrost szerokości spoiny i występowanie tzw. "muldy". Zmniejszenie wielkości "w" powoduje zawężenie spoiny i powstawanie tzw. "grzebienia". W układzie wewnętrznej głowicy sytuacja jest odwrotna, tzn. za mała wielkość "w" powoduje poszerzenie spoiny i tworzenie muldy, natomiast za duże przemieszczenie "w" zawęża spoinę prowadząc do podtopień i występowania grzebienia [20]. Również zwiększenie kąta " $\alpha$ " ustawienia 1 elektrody (powyżej 8°) powoduje wzrost szerokości i pojawienia się muldy, gdyż elektroda i łuk elektryczny oddziałują jak "pług" (rys. 29). Wielkość kąta  $\alpha$  małeje do zera wraz ze wzrostem grubości ścianki spawanych rur. Wielkość "w" zewnętrznej głowicy może być zwiększona wraz ze wzrostem średnicy spawanej rury.



Rys. 28. Ustawienie głowicy Fig. 28. Head setting



Rys. 29. Kształt spoiny przy kącie  $\alpha < 90^{\circ}$ Fig. 29. Weld shape at angle  $\alpha < 90^{\circ}$ 

Za wielkość optymalną dla głowicy zewnętrznej przy spawaniu spiralnym rur o średnicy 1200 mm i grubości 12,7 mm przyjmuje się następujące wielkości: w = 30 mm,  $\alpha$  = 8°, l = 40 mm, I = 900 A, U = 37 V, V<sub>S</sub> = 0,9 m/min [22]. Ogólnie wielkość wylotu elektrody oblicza się jako

$$1 = 8 \times \phi_D$$
, mm

W przypadku ustawiania głowicy wewnętrznej, szczególnie przy spawaniu spiralnym rur o średnicach poniżej 500 mm, istnieje konieczność zmniejszenia wielkości "w" do zera, ze względu na ściekanie płynnego metalu i uzyskanie niekorzystnego kształtu spoiny. Wstępne podginanie taśmy umożliwia optymalizację wielkości "w" i wyraźną poprawę kształtu wewnętrznej spoiny (rys. 30).



- Rys. 30. Ustawienie głowicy wewnętrznej a) w dotychczas pracujących urządzeniach – spoina ścieka, co powoduje niekorzystny kształt spoiny, b) w nowym urządzeniu – możliwe jest jarzenie łuku powyżej najniższego punktu rury
- Fig. 30. Setting of internal head a) in up to now welding machine - weld flows down and causes unprofitable shape of weld, b) in new welding machine - it is possible arc burning above the lowest pipe point

Według zaleceń firmy MEG [22] do spawania spiralnego rur, w szczególności ze stali wysokowytrzymałych, optymalnym rozwiązaniem jest spawanie tandemowe, które umożliwia zwiększenie szybkości spawania od 1,9 do 2,2 m/min. Zaleca się kombinację:

- 1 elektroda prąd stały (+ na elektrodzie), źródło prądu o płaskiej charakterystyce,
- 2 elektroda (i dalsze) prąd przemienny, charakterystyka opadająca.

Układ taki zapewnia odpowiednią głębokość wtopienia (co zapewnia łuk 1 elektrody) i poprawny, ładny kształt spoiny w efekcie oddziaływania następnych elektrod.

#### 4.2.2. Wpływ topnika na kształt spoiny

Do spawania spiralnego rur, w szczególności ze stali wysokowytrzymałych, zaleca się stosowanie topników aglomerowanych o wytrzymałości prądowej do 1400 A zawierających podwyższone zawartości Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i MgO. Powstające w procesie spawania pary metali powinny zapewnić stabilizację łuku przy spawaniu prądem stałym i przemiennym.

Ciężar nasypowy topnika powinien mieścić się w zakresie: 0,8 + 1,2 kg/l. Topnik powinien posiadać odpowiednią ziarnistość (20 + 40 wg Tylera). Spawanie drobnymi topnikami umożliwia uzyskiwanie ładnego lica, jednak w przypadku spawania zardzewiałych blach topnik taki hamuje proces odgazowywania spoin.

Bardzo duże znaczenie posiada również grubość warstwy zasypywanego topnika. Załeca się stosowanie grubości topnika równej ok. 2/3 długości wolnego wylotu elektrody. Grubość taka powoduje, że w procesie spawania łuk lekko prześwituje. Zbyt gruba warstwa topnika powoduje duży nacisk topnika na płynną spoinę, utrudniając odgazowanie spoiny, co prowadzi do wgłębień w licu spoiny (rys. 31).



Rys. 31. Szkic wyglądu powierzchni spoiny z wgłębieniami (odciskami gazowymi)

Fig. 31. Draft of weld surface appearance with dimples (gas dimples)

Zasypywany topnik w obszarze łuku powinien tworzyć ustabilizowaną warstwę i nie może zakłócać procesu krystalizacji spoiny (rys. 32).

Zastosowany topnik do spiralnego spawania musi być wysuszony w temperaturze 300°C ± 50°C przez okres min. 4 godzin. Zasypnik topnika i urządzenie odsysające musi być czyste, bez zanieczyszczeń wodą i olejem. Urządzenie odsysające powinno być wyposażone w oddzielacz magnetyczny cząstek metalicznych, oddzielacz pyłu i mieszalnik pozwalający na wprowadzenie nowego topnika do układu.



Rys. 32. Ustawienie zasypnika topnika i głowicy spawalniczej Fig. 32. Setting of flux dispenser and welding head

## 4.3. Druty i topniki do spawania łukiem krytym rur dużych średnic

Budowane i projektowane w ostatnich latach rurociągi wysokociśnieniowe wymagają rur o wysokiej wytrzymałości i jakości. Stosowane rury to przede wszystkim odmiany wytrzymałości wg API SPEC5L: X52, X56, X60, X65, X70 i X80. Do spawania takich rur producenci stosują druty elektrodowe i topniki umożliwiające uzyskanie spoin spełniających warunki odbioru, tzn. kryteria dotyczące wytrzymałości, ciągłiwości oraz odporności na pękanie zimne (wodorowe). Warunkiem uzyskania wysokiej plastyczności i odporności na pękanie wodorowe jest stosowanie zasadowych topników (B > 1,2 dla B wg MISu), które muszą być suszone, np. w przypadku spawania rur ze stali o R<sub>a</sub>:

- min. 355 MPa w temperaturze - 250°C przez 2 godziny,

 większej od 355 MPa w temperaturze - 300+350°C przez 2 godziny,

- maksymalny czas suszenia 10 godzin.

Wymagane własności wytrzymałościowe uzyskiwane są poprzez stosowanie odpowiednich drutów elektrodowych niskostopowych zawierających kombinację pierwiastków Mn-Mo-Ni.

Firma Oerlikon [23] zaleca do spawania dwustronnego rur topnik OP122 (BFB165AC12MHP5 wg DIN 32522), który jest aglomerowanym topnikiem zasadowym o współczynniku B ~ 1,7. Orientacyjny skład chemiczny to 20% (SiO<sub>2</sub> + TiO<sub>2</sub>), 30% (CaO + MgO), 25% (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MnO) oraz 25% CaF<sub>2</sub>. Topnik może być wykorzystany przy spawaniu prądem stałym (+ na elektrodzie) oraz przemiennym do 1200 A. Przy spawaniu rur zaleca się stosowanie drutów manganowych typu S2 (DIN 8557) oraz manganowo-molibdenowych S2Mo (DIN 8557) i manganowo-niklowych S2Ni1 (DIN 8557).

Firma Thyssen [24] zaleca do spawania rur topnik UV 420, przeznaczony do spawania prądem stałym i przemiennym do 1000 A. Topnik jest topnikiem zasadowym o podwyższonej zawartości  $Al_2O_3$ typu BAB177AC 10-3-20 wg DIN 3552, który w zależności od wytrzymałości spawanych rur może być stosowany z drutami elektrodowymi S2, S3, S2Mo, S3Mo (DIN 8557).

Firma ESAB [19] do spawania rur zaleca aglomerowany topnik OKFlux 10.71, który jest topnikiem do spawania prądem stałym i przemiennym (do 1200 A). Współczynnik zasadowości wynosi B = 1,6  $(Al_2O_3 + CaO + MgO min 45\%)$ . Zaleca się go do spawania łącznie z drutami manganowymi i manganowo-molibdenowymi typu S2, S3, S2Mo o S3Mo (wg DIN 8557).

Podobne kombinacje zaleca FERSAB [25] polski wytwórca topników na licencji firmy ESAB. Proponuje również wykorzystanie polskich drutów manganowo-niklowych SpG4N do spawania rur wzdłużnych i spiralnych.

Firma Messer-Griesheim [20] do spawania rur zaleca aglomerowany topnik LW642 zasadowy (B = 1,6) o orientacyjnym składzie: 30% (SiO<sub>2</sub> + TiO<sub>2</sub>), 30% (CaO +MgO) i 30% (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MnO). Topnik jest przeznaczony do spawania prądem stałym i zmiennym w połączeniu z drutami elektrodowymi S2 i S2Mo, S2Ni2 wg DIN 8557. Charakterystykę metalurgiczną ww. topników OP122 i LW 642 przedstawiono na rys. 33.



Rys. 33. Własności metalurgiczne topników I = 580 A, U = 20 V, v = 45 cm/min; topnik LW 642, --- topnik OP 122; AC - przyrosty pierwiastków w napoinie, C<sub>Mn</sub>, C<sub>Si</sub>, C<sub>C</sub> = zawartość pierwiastków w drucie elektrodowym Fig. 33. Metallurgical properties of fluxes I = 580 A, U = 20 V, v = 45 cm/min;

Is the call of the properties of index I = 580 A, U = 20 V, v = 45 cm/min; ---- LW 642 flux, --- OP 122 flux; $\Delta C - \text{ Increments of elements in weld, } C_{Mn'} C_{Si'}, C_C - C_C - C_C + C_C +$  Kombinacje zalecanych drutów i topników do spawania rur dużych średnic zestawiono w tablicy 15.

Tablica 15

Zastosowanie kombinacji drutów i topników do spawania łukiem krytym rur dużych średnic

		Rury zgodnie z API SPEC 5L						
	X42	X46	X52	X56	X60	X65	X70	X80
Occliber	OP122	0P122	OP122	0P122	OP122	0P122	0P122	
Derlikon	S2Mo	S2Mo	S2Mo	S2Mo	S2Mo	S2Mo	S2Mo	
THYSSEN "	UV420	UV420	UV420	UV420	UV420	UV420	UV420	
Union	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	
ESAB	OK1071	OK1071	OK1071	OK1071	OK1071	OK1071	OK1071	
FERSAD	S1	S1	S2	S2Mo	S2Mo	S3Mo	S3Mo	
Messer	LW642	LW642	LW642	LW642	LW642	LW642	LW642	LW642
Griesheim	S1	S1	S2	S2	S2Mo	s2Mo	S2Ni2	S2Ni2

#### 4.4. Rury spawane produkowane w Hucie Ferrum [45]

Huta Ferrum wykonuje rury stalowe wzdłużnie i spiralnie spawane, które mogą być przeznaczone do budowy rurociągów na wodę, gaz, ropę naftową i inne media oraz wykorzystane jako elementy konstrukcyjne. Produkowane rury wykonuje się zgodnie z wymaganiami norm API, DIN i PN, ze stali niestopowych i niskostopowych w zależności od wymaganych własności wytrzymałościowych rur.

Rury spawane wzdłużnie produkowane są w zakresie średnic od 508 do 2220 mm i grubości ścianek 6,3+17,5 mm i długości od 6 do 8 m. Rury ekspandowane produkuje się z jedną spoiną wzdłużną do średnicy 1016 mm. Rury o większych średnicach produkuje się jako nieekspandowane z dwoma (do 1620 mm) lub trzema spoinami wzdłużnymi.

Zestawienie produkowanych rur wzdłużnie spawanych podano w tablicy 16.

Natomiast rury spawane spiralnie produkowane są w zakresie średnic od 159 do 711 mm, grubości od 3,6 do 14,2 mm oraz długościach od 4 do 14 m. Aktualnie jest uruchamiane nowe urządzenie do spiralnego spawania rur o średnicach do 1220 mm. Zestawienie produkowanych rur spiralnie spawanych podano w tablicy 17.

## Program produkcji rur spawanych wzdlużnie w Hucie Ferrum

Sredi	nica		Nieekspandowane							
rur	ętrzna	Odmiany wyt	Odmiany wytrzymałościowe wg Polskiej Normy API Spec 5L Grubość ścian					ki mm cal		
mm	cal	G235 B	G295 X-42	X-46	G355 X-52	G390 X-56	В	X - 48 X - 46 X - 52		
508	20	6,3-11,0 0,248-0,433 0,248-0,346								
610	24	6,3- 0,248-	11,0 0,433		7,1-10,0					
711 813	28 32	8,0- 0,315-	12,5		8,0-11,0 0,315-0,433					
914 1016	36 40		8,0	- 12 , 5 - 0 , 492			8,0-16,0 0,315-0,630	8,0-14,2		
1220	48					-	8,0-17,5 0,315-0,688	0,313-0,339		
1420	56						8,8-17,5 0,346-0,688	8,8-14,2 0,346-0,559		
1620	64									
1820	72	]					10,0-17.5	10,0-14,2		
2020	80	]					0,394-0,688	0,394-0,559		
2220	87									

#### Tablica 17

#### Program produkcji rur spawanych spiralnie w Hucie Ferrum

Sree zewi rur	inica nętrzna	Odmiany	wytrzymał	oáciowe wg	Polskiej API Spe	Normy c 5L	Gruboáć á	Sruboáć ácianki	
mm	cal	G235 B	G295 X-42	X-46	G355 X-52	G390 X-56	X-60	X-65	<del>X-70</del>
159,0 168,3 193,7	6 <sup>1/4</sup> 6 <sup>5/8</sup> 7 <sup>5/8</sup>	3,6-5	<u>3,6-5,0</u> 0,141-0,197 <u>0,157</u>		D-5,0 7-0,197				
219,1 244,5	8 5/8 9 5/8	4,0-6	4,0-6,3 157-0,248 0,157		0-5,6 7-0,220				
273,0	10 3/4	4,0-7,1 0,157-0,280	4,0-7,1 ,157-0,280 4,5-7,1 0,177-0,280		4,5-6,3				
323,9	12 3/4	4,5-8,0 0,177-0,315					0	4,5-7,1	
355,6	i 4	5,0-8,8 0,197-0,346						5,0-8,0	
405,4	16	5,0-10,0				5,0-8,8 0,197-0,346	0	197-0,315	
457,0	18	C	5,6-ii,0 ,220-0,433	5	5,6-	-10,0	0,	5,6-8,8	
508,0	20	c	6,3-11,0 ,248-0,433	5	6,3- 0,248-	-10,0	0,	6,3-8,8 ,248-0,346	
559,0	22	<u>6,3-12,5</u> 0,248-0,492			6,3- 0,248-	-11,0	0,	6,3-10,0	
610,0	2.4	7,1-12,5			7,1-	7,1-11,0		7,1-10,0	
660,0	26	7,1-14,2	7,1-12,5 0,280-0,492 0,1			7,1-11,0	0,	280-0,394	
711,0	28	8,0-14,2 0,315-0,559	8,0-12,5 0,315-0,492				0,	8,0-11,0 315-0,433	

- 57 -

.

4.5. Wady spotykane w spawanych rurach dużych średnic

Z głównych wad spotykanych w spoinach rur dużych średnic należy wymienić: - pory i pęcherze. - pęknięcia, - nieregularność spoiny od strony lica i podtopienia. Pory i pecherze są wynikiem m.in.: - zbyt małej warstwy topnika, - stosowania wilgotnego, nie wysuszonego topnika, - stosowania topnika o małej ziarnistości i zbyt dużym ciężarze nasypowym, - zbyt małego wtopienia drugiej warstwy, - za dużego napięcia łuku i szybkości spawania, - za małej zawartości w drucie elektrodowym pierwiastków stopowych o charakterze redukującym, np. MnSiAl, - za dużej zawartości gazów w spawanych blachach (N<sub>2</sub>). Powodem peknięć w spoinach są: - nieprawidłowe spoiny sczepne. - nieprawidłowe parametry spawania, np. za niskie napięcie łuku, za duży prad spawania, zbyt duże wtopienie, zła biegunowość prądu stałego na elektrodzie, zły kontakt prądowy, - zła kombinacja drut elektrodowy - topnik, prowadząca do nieprawidłowego składu chemicznego stopiwa, np. Mn/Si < 1,7, - nieprawidłowa kolejność spawania, - brak lub zbyt niska temperatura wstępnego podgrzania, - złe przygotowanie krawędzi, np. zbyt duży odstęp, - za duży udział zanieczyszczonego materiału rodzimego. Wady lica spowodowane sa: - za wysoką warstwą topnika, - wilgotnością topnika lub spawanych blach, - wadliwym kontaktem prądowym, - nieprawidłowymi parametrami spawania (V<sub>S</sub>, I<sub>S</sub> i U<sub>S</sub>), - nierównomiernym podawaniem drutu elektrodowego, - zbyt dużym odstępem i nieprawidłowym przygotowaniem krawędzi, - nieprawidłową warstwą przetopową. Wady warstwy graniowej są wynikiem: - złego przygotowania krawędzi i ustawienia rury, - złych parametrów spawania (I<sub>s</sub>, U<sub>s</sub>), - złego prowadzenia drutu i jego nierównomiernego podawania, - wadliwego kontaktu prądowego, - złej ziarnistości topnika, - nieprawidłowych spoin sczepnych.

- Trudności przy usuwaniu żużla spowodowane są:
- nieprawidłowym kształtem rowka spawalniczego,

- złym topnikiem,

- złymi parametrami spawania.

Typowe wady występujące przy dwustronnym spawaniu rur, ich przyczyny oraz sposoby zapobiegania zestawiono w tablicy 18.

Tablica 18

 $(\mathbf{x})$ 

Wady, przyczyny i możliwości zapobiegania przy spawaniu rur dużych średnic

Wady	Przyczyny i sposoby zapobiegania
1	2
Pory i pęcherze, łańcuchy pęcherzy	Należy wyczyścić powierzchnie rowka oraz obszar spawania ze rdzy, smarów i wilgoci
granic do lica	W celu usunięcia wady powierzchniowej i wilgoci nagrzać krawędzie palnikiem
	Przy spawaniu w temp. poniżej 10°C zawsze należy krawędzie podgrzewać. Należy stoso- wać suszenie topnika i spawać topnikiem gorącym
	Zmniejszyć szybkość spawania. Stosować topniki do spawania dużymi prędkościami nieczułe na wilgoć i rdzę
Łańcuchy pęcherzy	Powodem może być ugięcie łuku i jego nie- równomierności
	Sprawdzić kontakt prądowy. Zastosować kilka równoległych kontaktów
	Stosować prąd przemienny do spawania, a w przypadku spawania prądem stałym sto- sować możliwie niskie napięcia łuku, np. przy I = 450 A - U = 22+24 V
Gniazda pęcherzy	Spowodowane przez oddziaływanie atmosfery
	Warstwa topnika jest za mała, np. wskutek trudności przesuwu głowicy
Wzdłużne pęknię-	Złe sczepianie krawędzi
w środku spoiny	Nieprawidłowy stosunek głębokości wtopie- nia do szerokości spoiny. Przy spawaniu 1-elektrodowym stosunek powinien być 1:1,2; natomiast przy 2-elektrodowym 1:1
	Zbyt duża zawartość siarki w blachach i występowanie zawalcowań
	Należy stosować druty zawierające Mo, a stosunek Mn/Si w spoinie powinien być większy od 2:1
	Należy stosować spawanie wielowarstwowe
	Należy unikać spoin o kształcie "grzyba"
	Należy unikać możliwości przemieszczania się krawędzi spawanych w czasie spawania

## c.d. tablicy 18

1	2					
Pęknięcia gorące poprzeczne do spoiny	Powodem występowania jest zbyt duża zawar- tość pierwiastków stopowych (Mn, C) i zła kombinacja drutu elektrodowego i topnika					
	Należy stosować niskostopowe druty i nie- aktywne topniki					
	Należy zwiększyć temperaturę wstępnego podgrzewania					
	Należy unikać zewnętrznych obciążeń w cza- sie spawania i krzepnięcia spoiny, np.przy spawaniu obwodowym rur					
Pęknięcia w kra- terze końcowym	Nieprawidłowe spoiny sczepne w obszarze końców spoin					
i na koncu sporny	Stosować wybiegi, szczególnie w przypadku spawania rur (zbiorników) dużych średnic o małej grubości blach					
	Należy zmienić technologię spawania					
Pęknięcia naprężeniowe	Należy unikać wilgoci na blachach i w topniku					
	Należy zastosować odpowiednią kombinację drutu i topnika zapewniającą odpowiednią wytrzymałość spoiny					
	Należy stosować wstępne podgrzewacze i wolne chłodzenie					
Nadmierna wyso- kość lica	Należy zastosować niższy prąd spawania, większe napięcie i wyższą szybkość spa- wania					
Za niskie lico	Należy zwiększyć prąd spawania, obniżyć napięcie i szybkość spawania					
Nierównomierne lico	Należy zastosować większą średnicę drutu elektrodowego, skontrolować kontakt pra- dowy, obniżyć wysokość topnika i spawać topnikiem drobnym i gorącym					
Podtopienia na krawędziach spoin	Należy skontrolować kontakty prądowe i parametry spawania					
spoiny	Obniżyć napięcie spawania i spawać drob- nym topnikiem. Korzystne jest stosowanie większych średnic elektrod					
Nierówna szero-	Należy sprawdzić kontakt prądowy					
KUSC Sporny	W czasie spawania napięcie powinno być stabilne, bez wahań					
-	Należy sprawdzić rolki prostujące drut elektrodowy					
	Sprawdzić szybkość spawania					

# c.d. tablicy 18

1	2				
Miejscowe zwęże- nia spoiny	W przypadku spawania prądem przemiennym nieprawidłowy topnik				
Slady pęcherzy	Spawanie zbyt chłodnych blach				
let" na powierz- chni spoiny	Stosować wstępne podgrzewanie i należy spawać gorącym topnikiem				
Brak przetopie- nia	Należy sprawdzić przygotowanie rowka i wysokość wolnego wylotu elektrody i ustawienia elektrody. Zmniejszyć wolny koniec				
Przepalenia	Podnieść napięcie spawania lub zmniejszyć prąd				
Trudności przy usuwaniu żużla	Do zmniejszenia przyczepności żużla pro- wadzą takie czyyniki, jak np. szybkie spa- wanie, niskie napięcie łuku, zmniejszenie prądu spawania				
	Zmniejszenie przyczepności można uzyskać przez przechłodzenie spoiny				
	Do usuwania żużla należy stosować przeci- naki o długości ok. 600 mm o stępionym ostrzu				

### 5. SPAWANIE RUROCIĄGÓW TRANZYTOWYCH

Wysokociśnieniowe rurociągi (pow. 6,4 MPa) do transportu mediów ciekłych i gazowych zaliczyć należy do konstrukcji spawanych klasy I, których uszkodzenie może zagrozić życiu ludzkiemu i spowodować znaczne straty materialne. Do spawania takich rurociągów typowane są zakłady posiadające odpowiednią kadrę spawalniczą i spawaczy oraz wyposażenie do robót spawalniczych i kontroli połączeń spawanych, np. zakłady kategorii I posiadające uprawnienia Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach.

Spawacze wyznaczeni do spawania rurociągów ze stali wysokowytrzymałych powinni posiadać uprawnienia R2.1E lub R2.1MAG w zależności od technologii spawania. Dodatkowo spawacze muszą wykonać pozytywnie tzw. próby metody obejmujące kontrolę umiejętności wykonania spoin w najtrudniejszych miejscach rurociągu.

W większości przypadków spawania tranzytowych rurociągów gazowych prace spawalnicze są realizowane zgodnie z wymaganiami Amerykańskiego Instytutu Naftowego (API). Przy pracach wykorzystywane są głównie normy API 5LX i API 1104.

Technologia prac spawalniczych przy montażu rurociągów tranzytowych powinna obejmować m.in. następujące czynności [16]: - przygotowanie brzegów rur do spawania,

- piz/gotowanie bizegow i ui do spawani
- centrowanie i sczepianie krawędzi,
- podgrzewanie wstępne,
- spawanie styków montażowych i ich oznaczenie,
- wykonywanie podpór,
- wykonywanie wstawek,
- kontrolę wstępną, bieżącą i końcową,
- przygotowanie dokumentacji do odbioru.

W pracy [3] podano zalecane procedury spawania montażowego rurociągów dużych średnic. Przy opracowaniu wykorzystano zalecenia Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa [14,15], normy DIN 17172 i API Spec 5L. Do spawania rurociągów rekomenduje się metodę spawania ręcznego, elektrodami celulozowymi (metodą opadową) i zasadowymi oraz metodą w osłonie gazu ochronnego (GMAW), przy czym jako gaz wykorzystuje się mieszankę 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub> lub 92% Ar + 8% O<sub>2</sub>. Zastosowanie elektrod celulozowych zwiększa wyraźnie wydajność spawania ręcznego, która jest porównywalna z wydajnością spawania GMAW (rys. 34).



Rys. 34. Wpływ metody spawania na czas wykonania warstwy przetopowej

Fig. 34. Influence of welding method on performance time of root pass

Metoda półautomatycznego oraz coraz częściej automatycznego spawania osłonie gazów ochronnych (GMAW) [16] ma wiele zalet W obok WW. wydajności procesu. Zastosowanie metody spawania "krótkim łukiem" z drobnokroplowym (100+160 kropli/s) przejściem metalu jeziorka spawalniczego umożliwia uzyskanie spoin o do zawartości wodoru dyfundującego (H<sub>o</sub> < 5 ml/100 g), o duniskiej żej głębokości wtopienia i prawidłowym kształcie oraz o ładnym wygladzie lica.

- 5.1. Spawanie obwodowe rurociągów celulozowymi elektrodami otulonymi - wytyczne
- Krawędzie łączonych rur powinny być przygotowane mechanicznie zgodnie z rys. 35a, b.
- Spawacze powinni posiadać uprawnienia do spawania niskostopowych stali elektrodami celulozowymi zgodnie z EN287, API1104, itp.
- Do spawania należy stosować elektrody celulozowe o właściwościach stopiwa odpowiadających własnościom spawanych rur posiadające odpowiednie dopuszczenia, np. AWS-E6010, E7010, E8010-G, E-9010-G.



- Rys. 35. Przygotowanie krawędzi blach do spawania rurociągów: a) i b) elektrodami otulonymi, odstęp między blachami ok. 1,5 mm; X – wielkość zależna od grubości blachy, c) i d) – metodą GMAW przy wykonywaniu warstwy graniowej od wewnętrznej strony rury (c) i zewnętrznej (d)
- Rys. 35. Preparing of plate edges for pipe-line welding: a) and b) with coating electrodes, spacing of the edges approx. 1,5 mm; X - quantity dependent on plate thickness, c) and d) - GMAW method by cap pass (c) and root pass (d)

Elektrody celulozowe nie powinny być powtórnie suszone. Do spawania rur o grubościach powyżej 7 mm należy stosować elektrody o średnicy ø4 dla wykonania warstwy przetopowej oraz tzw. ściegu gorącego (hot pass).

Do wypełnienia i wykonania lica należy zastosować elektrody ø5. Parametry spawania powinny być zgodne z zaleceniami podawanymi przez producenta elektrod.

- Krawędzie przed spawaniem należy podgrzać palnikami ręcznymi lub pierścieniowymi na szerokości min. 50 mm zgodnie z zaleceniami dla stali i grubości rur.
- Przed spawaniem rury powinny być osiowane za pomocą centrowników (mechanicznych, pneumatycznych lub hydraulicznych),
- Warstwy graniowe przy średnicach powinno spawać:
  - 400 mm < ø < 900 mm 2+3 spawaczy
    - > 500 mm 4 spawaczy.

Stosowana energia liniowa łuku powinna mieścić się w zakresie 6-12 kJ/m. Warstwa graniowa powinna być spawana opadowo.

- Warstwę "gorącą" (hot pass) należy wykonać bezpośrednio po spawaniu warstwy przetopowej (czas przerwy: max. 6 min). Zasady wykonania są identyczne jak warstwy przetopowej.
- Przy wypełnianiu rowka spawalniczego stosuje się zwykle elektrody ø5 mm, a energia liniowa wzrasta do wartości 8+15 kJ/cm. Należy utrzymać temperaturę międzyściegową większą lub równą temperaturze wstępnego podgrzania. Spawanie wykonywane jest również przez 2-4 spawaczy podobnie jak warstwą przetopową. Sciegi powinny być czyszczone szczotkami mechanicznymi.
- Po spawaniu w celu zmniejszenia szybkości chłodzenia spoiny należy obłożyć matami izolacyjnymi.
- Przed, w czasie i po spawaniu należy prowadzić kontrolę procesu spawania. Po spawaniu wykorzystuje się badanie radiograficzne (RTG) lub ultradźwiękowe (US) zgodnie z przepisami API 1104.

#### 5.2. Spawanie rurociągów elektrodami zasadowymi

Spawanie elektrodami zasadowymi może odbywać się metodą opadową z góry w dół oraz z dołu do góry. Zastosowanie suszonych elektrod zasadowych (350°C/3h) umożliwia uzyskanie stopiwa zawierającego wodór dyfundujący w ilościach poniżej 5 ml/100g, co pozwala na wyraźną redukcję temperatury wstępnego podgrzewania, a często nawet na rezygnację z podgrzewania wstępnego przed spawaniem.

Zasady dotyczące wykonywania połączeń spawanych są podobne jak przy spawaniu rur elektrodami celulozowymi. Różnice sprowadzają się do stosowania suszonych elektrod zasadowych o średnicach:

- ø2,5, ø3 przy wykonywaniu przetopienia,
- ø4, ø5 przy wypełnianiu rowka spawalniczego i wykonywaniu lica.

Elektrody zasadowe mogą być ponownie suszone (350°C/2h). Przy łączeniu rur o średnicach powyżej 400 mm spawanie wykonuje zwykle 2 spawaczy. Energia liniowa przy spawaniu opadowym wynosi 8-12 kJ/cm, a przy spawaniu z dołu do góry 25 kJ/cm.

#### 5.3. Spawanie rurociągów w osłonie gazów ochronnych metodą GMAW

Mechanizacja procesu spawania prowadzi do polepszenia jakości uzyskanych połączeń oraz zwiększenia wydajności spawania. W przypadku spawania GMAW należy krawędzie przygotować zgodnie z API Spec.5L lub DIN 17172 (rys. 35c, d). Przygotowanie takie tworzy tzw. "wąski rowek" (narrow groove), który wypełniony jest metodą opadową przez uprawnionych spawaczy. Dopuszcza się w szczególnych przypadkach wykonanie warstwy przetopowej ręcznie elektrodą celulozową lub zasadową (zgodnie z 5.1 i 5.2).

Przy spawaniu GMAW istnieją 2 sposoby wykonania przetopienia, a mianowicie od strony zewnętrznej (jak przy spawaniu EO) na podkładce miedzianej oraz od strony wewnętrznej. Jako druty elektrodowe do wykonania przetopienia stosuje się dopuszczone przez towarzystwa kwalifikacyjne (TUV, AWS) druty:

typu SG2 (ER 70S-2) dla stali X70 oraz

SG3 (ER 70S-6) dia stali X80

o średnicy 0,8 lub 1,2 mm.

Jako gaz ochronny stosowane są mieszanki typu 82% Ar + 18%  $CO_2$ lub 92% Ar + 8%  $O_2$ . Dopuszcza się stosowanie spawania w  $CO_2$ . Przy spawaniu GMAW druga warstwa wykonywana jest jako hot pass, bezpośrednio po wykonaniu warstwy przetopowej.

Odmianą spawania GMAW jest spawanie rurociągów drutami proszkowymi samoosłonowymi. Do zalet tego spawania należy przede wszystkim możliwość spawania montażowego ze względu na niewrażliwość procesu na boczny wiatr oraz duża wydajność stapiania. Metoda ta obecnie stosowana jest zamiennie w stosunku do spawania rurociągów elektrodami otulonymi [40].

Spawanie powinno odbywać się zgodnie z instrukcją technologiczną, która oprócz przygotowania do spawania i kosztu spawania powinna zawierać instrukcje kontroli wstępnej, bieżącej i po spawaniu. Złącza spawane powinny być badane metodami nieniszczącymi RTG lub US zgodnie z przepisami dotyczącymi odbioru pospawanych rurociągów (np. API 1104).

Budowa rurociągów wymaga stosowania odpowiednich metod organizacyjnych, które zapewniają uzyskanie efektów technicznych i ekonomicznych. Efekty te można uzyskać poprzez wykonanie odpowiedniej jakości rurociągów, o której stanowi przede wszystkim wysoka jakość robót spawalniczych przy minimalnych kosztach.

Podstawową metodą racjonalnej organizacji jest metoda potokowa prowadzenia robót montażowych zgodnie z harmonogramem uwzględniającym technologiczną kolejność wykonywania takich czynności, jak: prace ziemne, roboty spawalniczo-montażowe, izolacja, układanie i zasypywanie rurociągu oraz próby wytrzymałościowe. Uproszczony schemat wykonywanych czynności przy budowie rurociągu zestawiono na rys. 36a. Przykład metody potokowej spawania rurociągów przedstawiono w [41].

Rurociąg gazowy pod nazwą Trans Austria Gasleitung był układany ze spawanych wzdłużnie rur o długościach od 6 do 18 mm w przygotowanym terenie na trasę. Spawanie rurociągu odbywało się w tzw. ciągu technologicznym składającym się z 18 stanowisk, na których były m.in. następujące główne operacje: podgrzewanie wstępne łączonych krawędzi, spawanie warstwy przetopowej (1 stanowisko), spawanie tzw. warstwy gorącej (hot pass 2 stanowiska), spawanie warstw wypełniających (10 stanowisk), spawanie lica (2 stanowiska).

Wymienione operacje uzupełnione były pracami pomocniczymi w celu zapewnienia jakości połączeń, np. szlifowania przetopienia, szczotkowania, podgrzewania międzyoperacyjnego. Schemat ciągu technologicznego spawania przedstawiono na rys. 36b.

Do spawania rurociągu przewidziano metodę spawania opadowego elektrodami celulozowymi firmy Böhler w gatunku FOX CEL i FOX CEL 83. Warstwe przetopową wykonało 3 spawaczy na jednym stanowisku zgodnie ze schematem na rys. 36c. Na kolejnych 2 stanowisspawaczy spawało spoinę gorącą - hot pass i dalej na 10 kach 4 stanowiskach wykonywano warstwy wypełniające. Na ostatnich 2 stanowiskach spawano warstwy licowe. Łączone krawędzie podgrzeobrotowymi do temperatury 110°C. Temperatura ta wano palnikami była również utrzymywaną temperaturą międzyściegową. Wszystkie spoiny międzyoperacyjne były podgrzewane palnikiem pierścieniowym od zewnątrz i osłaniane kocami azbestowymi na szerokości ok. Wykonane spoiny były odpowiednio oznaczone, tak że 300 mm. istniała możliwość jednoznacznego przyporządkowania daty i zmiany spawania oraz spawacza każdemu odcinkowi spoiny.

Spawane złącza były badane radiograficznie (RTG) i mechanicznie. Zakres kontroli RTG obejmował 100% wykonanych spoin, natomiast badanie mechaniczne było co 200 złączy. Wyniki badań mechanicznych służyły przede wszystkim do weryfikacji przyjętej technologii spawania rurociągu. Warunki montażu rurociągu określały wymaganą klasę jakości radiogramów na poziomie klasy BS wg DIN 8563.





Rys. 36b



SPAWANIE WARSTWY PRZETOPOWEJ

- Rys. 36. Schemat wykonywania rurociągów tranzytowych: a) ogólny schemat prac, b) schemat ciągu technologicz-nego spawania, c) schemat układania kolejnych warstw przy spawaniu rur o grubości 13,3 mm
- Fig. 36. Plan of transit pipe-line performance: a) general algorithm of works, b) plan of welding pro-cedure, c) plan of performance following layers during pipe welding, tube plate thickness 13,3 mm

## 6. KIERUNKI ROZWOJU STALI PRZEZNACZONYCH NA RURY DUZYCH SREDNIC

Stały wzrost wydobycia gazu i ropy naftowej wymaga rozwoju stali, który zapewni przyrost ilościowy układanych rurociągów o coraz większych średnicach i ciśnieniach. Jednocześnie obserwuje się wzrost wymagań technicznych w stosunku do nowych rurociągów tranzytowych, który wynika między innymi z:

- odkrywania nowych, ale bardziej odłegłych złóż gazu i ropy,
- eksploatacji złóż na dnie głębokich mórz i oceanów,
- eksploatacji złóż na obszarach arktycznych o niskich temperaturach otoczenia,
- konieczności eksploatacji złóż o zwiększonej agresywności korozyjnej, np. kwaśnego gazu,
- wzrostu długości rurociągów transportujących gazy o podwyższonej agresywności korozyjnej oraz gazy syntetyczne.

Modernizacja stali na rury dla rurociągów tranzytowych gazów i ropy następuje w dwóch kierunkach, a mianowicie:

- podwyższania wytrzymałości i grubości stali na rury oraz

- podwyższenia odporności tych stali na oddziaływanie wodoru.

W pierwszym przypadku obserwuje się zamierzenia obniżenia w stalach niskostopowych o obniżonej zawartości węgla (< 0,1% C) wielkości ziarna poniżej 10 wg ASTM. Uzyskuje się to między innymi poprzez stosowanie procesu TM-MACOS (proces regulowanego walcowania firmy Mannesmann) z przyspieszonym chłodzeniem dla stali posiadających odpowiednią kombinację mikrododatków [27]. W celu zapewnienia własności wytrzymałościowych (pow. 550 MPa) dla blach o grubościach powyżej 30 mm stosuje się dodatek molibdenu (do 0,15% Mo) i niklu, przy jednoczesnej modyfikacji kombinacji mikrododatków zmierzającej głównie do zastępowania wanadu mikrododatkiem tytanu. Zabiegi takie umożliwiają uzyskanie stali o wytrzymałości powyżej 550 MPa dla blach o grubościach powyżej 32 (rys. 37). Stale te cechują się również bardzo dobrą plasmm tycznością, tzn. wymagane udarności KV, które powinny być zabezpieczone w temperaturze 0°C, są gwarantowane w temperaturze
-20°C. Również temperatura przejścia określona próbą DWTT przy 85% udziale przełomu plastycznego znajduje się poniżej -20°C.





Fig. 37. Influence of thickness on strength properties of high strength steels for pipes

drugim przypadku wytwórcy stali dążą do wytworzenia ga-W tunków odpornych na pękanie w warunkach eksploatacji w środowisku wilgotnego siarkowodoru, np. stali na rurociągi do transportu kwaśnego gazu. W spawanych rurach w obecności wilgotnego siarkowodoru mogą występować pęknięcia w wyniku korozji naprężeniowej - Sulfide Stress Corrosion Cracking) i pekniecia wodorowe (SSCC (HIC - Hydrogen Induced Cracking) [28]. Stale takie zawierają od 0,05% C, Mn w ilościach od 1,0 do 1,4% w zależności od 0,03 do wytrzymałości i grubości stali oraz kombinację mikrokategorii dodatków V i Nb. Zastosowanie procesu wytwarzania TM-MACOS przy przyspieszonym chłodzeniu i zmiennej temperaturze końca walcowania od 790 do 700°C pozwala na uzyskanie stali o wymaganej wytrzymałości i plastyczności (rys. 38).

Do oceny przydatności stali do eksploatacji w mediach agresywnych wilgotnego siarkowodoru wykorzystuje się wielkość CAR stanowiącą stosunek powierzchni pęknięć określonych ultradżwiękowo do całkowitej powierzchni próbki. W badaniach wykorzystuje się próby pękania z regulowanym naprężeniem próbek nawodorowywanych. - 73 -



- Rys. 38. Wpływ sposobu wytworzania stali na własności mechaniczne i odporność na pękanie wodorowe w medium o pH3: TE temperatura końca walcowania, TM – stale obrabiane cieplno-plastycznie, TM-MACOS – stal obrabiana ciep-Ino-plastycznie zgodnie z technologią firmy Mannesmann, HIC – pęknięcia wodorowe, CAR – współczynnik pęknięć powierzchniowych [1]
- Fig. 38. Influence of steel making on mechanical properties and hydrogen cracking resistance in pH3 medium. TE - rolling finish temperature, TM - thermo-mechanically treated steels, TM-MACOS - thermo-mechanically treated steels according to Mannesmann procedure, HIC - hydrogen induced cracking, CAR - crack area ratio

W pracy [27] przedstawiono kierunki rozwoju stali na rurociągi tranzytowe w formie wykresu (rys. 39). Z tych prognoz należy do 2000 roku oczekiwać zastosowania na rurociągi stali X90 grubościach do 25 mm lub stali X80 o grubości do 32 mm. Stale 0 odporne na pękanie wodorowe, o obniżonej zawartości węgla (do 0,05%) i siarki (poniżej 0,0015%) posiadają zwykle niższe własności wytrzymałościowe (X65, X70) i mogą być stosowane do grubości 35 mm. Problemy wytwarzania wysokowytrzymałych stali na tranzytowe rurociągi gazowe wymagają współdziałania i współpracy wszystkich zainteresowanych państw i tylko ścisła kooperacja pozwoli na techniczną i ekonomiczną optymalizację produkcji rur w Europie.



- Rys. 39. Prognozy produkcji stali wysokowytrzymałych (A) i odpornych na pękanie wodorowe (B) na rury i rurociągi do 2000 roku: CE<sub>PCM</sub> – równoważnik C zgodnie z firmą Mannesmann
- Fig. 39. Prognosis of high strength steels (A) and hydrogen cracking resistance steels (B) for pipe and pipe~line to 2000 year: CE<sub>PCB</sub> - C equivalent according to Mannesmann

# 7. WŁASNOŚCI MECHANICZNE RUR SPAWANYCH WZDŁUŻNIE I SPIRALNIE ZE STALI X52, X56, X65 – BADANIA WŁASNE

## 7.1. Cel i zakres badań. Materiały stosowane do badań

Celem badań własnych [42-44, 47-50] było ustalenie wytycznych spawania oraz ocena własności mechanicznych i jakości rur spawanych wzdłużnie i spiralnie do przesyłu paliw ciekłych i gazowych wytwarzanych w Hucie Ferrum. Zakres pracy obejmował badania symulacyjne i próby złączy spawanych:

- badania symulowanych SWC (struktura, twardość, udarność),

- wykonanie płyt próbnych i określenie własności mechanicznych,
- określenie własności mechanicznych i geometrii złączy rur,
- kontrolę radiograficzną jakości złączy rur,
- ocenę makroskopową złączy,
- wyznaczenie temperatury przejścia w stan kruchy spoin, SWC i materiału rodzimego.

Do badań wykorzystano blachy ze stali gatunku X52, X56 oraz X65 (wg API 5L). Badane stale posiadały grubość X52 - 7,1 mm, X56 - 12,5 mm i X65 - 12,7 mm.

Skład chemiczny oraz własności mechaniczne badanych stali zestawiono w tablicach 19, 20. Wyniki analizy składu chemicznego i badania własności mechanicznych blach wykazały zgodność wyników z wymaganiami norm.

Tablica 19

Lp.	Gatunek stali	С	Mn	Si	Р	S	Nb	v	Cr
1	X52	0,16	0,89	0,43	0,011	0,011	-	-	_
2	X56	0,09	1,32	0,30	0,020	0,007	0,04	_	0,03
3	X65	0,11	1,32	0,25	0,018	0,007	-	0,006	0,04

Skład chemiczny badanych stali [%]

Tablica 20

Lp.	Gatunek stali	<sup>R</sup> e [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> /R <sub>m</sub>	A <sub>5</sub> [%]	<sup>KV</sup> -20°C [J]
1	X52	387	560	0,60	25	61
2	X56	444	600	0,74	22	73
3	X65	502	652	0,77	20	139

Własności mechaniczne badanych stali

7.2. Wpływ cykli cieplnych na własności symulowanych SWC

W badaniach stali X56 i X65 symulowano spawalnicze cykle cieplne o temperaturze maksymalnej 1250°C i czasach chłodzenia  $t_{8-5}$  w zakresie temperatur 800+500°C równych 5, 20, 50 i 100s. Dobrane do badań czasy  $t_{8-5}$  odpowiadają energiom spawania odpowiednio 1,0; 2,0; 3,5 i 4,5 MJ/m. Wielkości te określono na podstawie nomogramów. Obrobione cieplnie próbki wykorzystano do badań metalograficznych, pomiarów twardości i badań udarności. Twardość zmierzono metodą Vickersa przy obciążeniu 49N (HV5), natomiast udarność badano na próbkach typu Charpy V w temperaturach: 0, -20, -40 oraz -60°C.

Badane stale posiadają w stanie dostawy strukturę ferrytyczno-perlityczną. Symulowany cykl cieplny prowadzi do powstania w próbkach struktury bainitycznej i często przy czasach t $_{8-5}$ dłuższych od 5 sekund do wydzielania się ferrytu po granicach ziarn byłego austenitu. Większe ilości ferrytu w strukturze bainitycznej stwierdzono w stali X56 (rys. 40).

Wyniki pomiarów twardości (rys. 41) wykazały, że badane stale w stanie dostawy posiadają twardość: X56 - 142 HV, a X65 -187 HV. Po symulacji cykli spawalniczych twardości wzrastają, przy czym przyrost ten jest największy przy  $t_{8-5} = 5s$  i wynosi ponad 100 HV. Dla dłuższych cykli wzrost ten jest odpowiednio mniejszy i wynosi około 50 HV dla czasów  $t_{8-5} = 20s$  oraz około 20 HV dla cykli  $t_{8-5} = 50$  i 100s.



- 77 -

c)

d)

nys.	40.	Scruktura Starr w probkach po Symuracji cyklu ciepine-
		go:
		a) stal 152 to = 55 DOW 1004
		$a_{1}$ star hoz, $c_{8-5} = 0.5$ , pow. rook,
		b) stal \$52 to == 1005 DOW 100x
		2, 2001, 102, 08-5 1003, 2001, 2001,
		c) stal X65, t <sub>8-5</sub> = 5s, pow. 100x,
		a) stal XOS, $t_{B-5} = 100s$ , pow. $100x$
Fig	10	Microstructure of steal after simulation of thermal
118.	10.	incrostructure of steel after simulation of thermal
		cycles of welding:
		a) X52 steel, t <sub>8-5</sub> = 5s, Magn. 100x,
		<i>b) X52 steel, t<sub>R-5</sub> = 100s, Magn. 100x,</i>
		al VEE atack to - Ea Maga 100%
		$C = XOS SCEET, C_{B-5} = SS, Magn. 100x,$
		d1 Y65 stool t = 100s Maga 100x
		$a_{1}$ AUS SLEEL, $c_{8-5} = 1005$ , Magn. 100x



Rys. 41. Twardość HV5 próbek w stanie dostawy oraz po symulacji cyklu cieplnego

Fig. 41. Hardness (HV5) at the as-delivered state and after simulation of thermal cycle





Fig. 42. Impact energy at the as-delivered state and after simulation of a thermal cycle. Test temperature of -20°C

Do badań udarności wykorzystano symulowane próbki z karbem Charpy V wycięte poprzecznie do kierunku walcowania. Stwierdzono, że energia łamania symulowanych próbek ze stali X56 i X65

- 78 -

jest wyraźnie niższa od energii łamania blach w stanie dostawy i wynosi około 15+20 J, przy czym niższe energie łamania zaobserwowano dla stali X56 (rys. 42).

## 7.3. Własności mechaniczne złączy rur spawanych

Spawanie rur przeprowadzono z zastosowaniem parametrów dobranych na podstawie analizy wyników badań własności mechanicznych próbek pobranych z płyt próbnych. Wykonano rury o wymiarach: stal X52 - ø 508 x 7,1 mm; stal X56 - ø 711 x 12,5 mm; stal X65 - ø 1220 x 12,7 mm. Do spawania stali X52 i X56 stosowano szwedzką kombinację firmy ESAB: drut OK 12.22 ø 4 łacznie z topnikiem OK Flux 10.71 (B = 1,6), a w przypadku stali X65 kombinację niemiecką: drut S2Mo ø 5 oraz topnik BF-6 (B = 1,6). Rury spawano stosując następujące parametry: stal X52 I = 700 A, U = 30 V, v = 1,8 m/min (spoiny zewnętrzna i wewnętrzna), stal X56 - spoina wewnetrzna - głowica 1 I = 650 A, U = 27 V, v = 1,1 m/min, głowica 2 I = 760 A, U = 40 V, v = 1,1 m/min; spoina zewnetrzna – głowica 1 l = 710 A, U = 32 V, = 1,4 m/min, głowica 2 I = 660 A, U = 42 V, v = 1,4 m/min; stal X65 I = 900 A, U = 31 V, v = 1,1 m/min (spoiny zewnętrzna i wewnetrzna).

Wyniki przeprowadzonych badań własności mechanicznych złączy spawanych rur i materiału rodzimego, wymiary geometryczne spoin, a także równoważniki węgla dla spoiny i materiału rodzimego przedstawiono w tablicy 21.

Tablica 21

Własności mechaniczne i geometria złączy spawanych rur

Gat.	Układ	E	Ψ=	h <sub>n</sub>	C,[%]		KV <sub>orc</sub> [J]		R <sub>e0.5</sub> [MPa]		R <sub>e</sub> /R <sub>m</sub>	
stali	glowic	[MJ/m]	b/h <sub>w</sub>	[mm]	MR	S	MR	S	MR	Z	MR	Z
X52	lw+lz	0,7	2.1-2.8	1.2-1.5	0.31	0.27	82	75	361	-	0.64	-
X56	2w+2z	2:0	2.6-2.7	1.5-3.0	0.31	0.34	66	62	444	435	0.74	0.73
X65	1w+1z	1.5	2.0-2.1	1.0-1.5	0.33	0.31	144	135	499	446	0.77	0.74

Uwagi: rury ze stali X52 i X65 spawano spiralnie, a rury ze stali X56 wzdłużnie.

Oznaczenia: 1w + 1z - jedna głowica wewnętrzna i zewnętrzna, 2w + 2z - dwie głowice wewnętrzne i zewnętrzne, E - energia liniowa łuku, ψ - współczynnik kształtu spoiny, b szerokość spoiny, h<sub>w</sub> - głębokość wtopienia, h<sub>n</sub> - wysokość nadlewu, MR - materiał rodzimy, S - spoina, Z - złącze We wszystkich przypadkach uzyskano klasę wadliwości złączy R1 wg PN-87/M-69772. Próby zginania złączy 180°C przy d = 5 g dały we wszystkich przypadkach wynik pozytywny.

Zgodnie z wymaganiami norm DIN 17172 i API 5L badania właswytrzymałościowych przeprowadza się najczęściej na próbności wycietych ze złączy i materiału rodzimego poprzecznie do kach spawania. Przygotowanie próbki poprzecznej wymaga prokierunku zakrzywionego fragmentu rury, co powoduje wprowadzenie stowania do materiału odkształceń rozciagających i ściskających. Odprowadzą do zmian własności wytrzymałościowych kształcenia te materiału, w wyniku czego wartości granicy plastyczności uzyskiwyprostowanych próbkach nie zawsze są miarą rzeczywisna wane tych własności rur. Badania własności blach, taśm i wykonanych z rur wykazują, że granica plastyczności próbek prostowanych nich jest z reguły niższa od granicy plastyczności próbek pobranych z blachy płaskiej.



Rys. 43. Porównanie wyników badań własnych otrzymanych dla próbki wyciętej z rury nie prostowanej i próbki wyprostowanej z danymi iiteraturowymi [5]. Punktami oznaczono wyniki badań własnych (średnia z 5 próbek)

Fig. 43. Comparison of the own (points - mean values of 5 specimens) and Ref. [5] test results of straightened and nonstraightened samples

Na rys. 43 pokazano wyniki badań własnych oraz wg [29] stwierdzono, że w zakresie 310+550 MPa próby rozciągania próbek nie prostowanych dają wyższe wartości granicy plastyczności niż próby rozciągania próbek wyprostowanych. Różnica ta wzrasta ze wzrostem granicy plastyczności badanych stali. Zjawisko to jest wynikiem efektu Bauschingera, który polega na tym, że odkształ-

canie na zimno poprzez ściskanie prowadzi do obniżenia granicy przy rozciaganiu. Dla stali o niskiej granicy plastyczności plastyczności, mniejszej od 310 MPa (X42) efekt umocnienia zgniotem jest silniejszy od efektu Bauschingera i próbki prostowane posiadaja wyższą granicę plastyczności niż próbki nie (rys. 43). Prace Harrisona i współautorów [30] wykaprostowane zały. że wpływ efektu Bauschingera wzrasta ze wzrostem granicy plastyczności, co potwierdza poprzednie stwierdzenia. Procesy formowania i spawania prowadza nie tylko do zmiany własności wytrzymałościowych, ale również własności plastycznych ocenianych najczęściej w próbie łamania udarowego. Rys. 44 przedstawia zależność energii łamania od temperatury dla materiału rodzimego blachy (X56) i spoiny wykonanej na płytach próbnych oraz wycietych z rury. Przyjmując temperaturę przejścia T<sub>p</sub> w stan kruchy poziomie 27 J można stwierdzić, że proces formowania rury i na ekspandowania przesuwa T<sub>p</sub> blachy z -70°C do -39°C, czyli o około 30°C, natomiast dla spoiny  $T_n$  pozostaje bez zmian, gdyż spoina nie jest formowana.





Fig. 44. Relationship between the impact energy of X56 steel specimens and the test temperature

7.4. Ciągliwość stali niskostopowych stosowanych w budowie rurociągów

Podstawowa różnica pomiędzy pękaniem ciągliwym i kruchym polega na różnej wielkości lokalnego odkształcenia plastycznego, potrzebnego do realizacji tych dwóch rodzajów pękania. Kruchemu pękaniu towarzyszy bardzo małe lokalne odkształcenie plastycznie; w związku z tym potrzebuje ono bardzo małej energli napędowej i może poruszać się z dużymi prędkościami. Natomiast pękanie ciągliwe przebiega znacznie wolniej, ponleważ poprzedza je bardzo duże odkształcenie plastyczne. Badania prowadzone w Battelle wykazały, że istnieje wyraźna korelacja pomiędzy szybkością rozwoju pęknięcia w rurociągach pracujących pod ciśnieniem a sposobem pękania ocenionym na podstawie wyglądu powierzchni przełomu (rys. 45).





Okazało się, że pęknięcia kruche rozwijają się z prędkościami do 762 m/s, podczas gdy pęknięcia ciągliwe z prędkościami około 152 m/s [31]. Porównanie tych prędkości z prędkością dekompresji metanu 396 m/s doprowadziło do wniosku, że rozprzestrzenianie się pęknięć kruchych na duże odległości jest związane z tym, że wierzchołek pęknięcia przemieszcza się szybciej od następującej dekompresji gazu. Natomiast podczas wolniejszego rozwoju pęknięcia ciągliwego dekompresja powoduje stopniowe zmniejszenie się naprężeń w wierzchołku, tak że z czasem naprężenie osiąga wartość zbyt małą, by móc podtrzymać dalszy rozwój pęknięcia. Takie pęknięcia są zatem zatrzymywane. Eksperymentalnie ustalono, że pęknięcia zawierające 70-90% przełomu ciągliwego ulegają wyhamowaniu.

Do oceny odporności stali na kruche pękanie stosuje się w zasadzie dwie podstawowe próby technologiczne:

- próbę udarności z karbem Charpy V,

- próbę rozdzierania spadającym ciężarem (Drop Weight Tear Test). Jako kryterium w próbie udarnościowej przyjmuje się tempreaturę przejścia w stan kruchy (T<sub>p</sub>) przy danym poziomie zaabsorbowanej energii lub przy danym poziomie przełomu ciągliwego, lub poziom zaabsorbowanej energii przy danej tempraturze. Porównanie stali przy tym ostatnim kryterium jest możliwe, w przypadku gdy nie wykazują one rozwarstwień w czasie pękania. Jednakże znaczna ilość produkowanych obecnie stali na rurociągi to stale po regulowanym walcowaniu, które są szczególnie skłonne do rozwarstwień w czasie próby łamania [32,33,34]. W próbie udarnościowej próbka jest na tyle mała, że wpływ rozwarstwień na poziom zaabsorbowanej energii jest zbyt silny. Dlatego też do oceny odporności stali na kruche pękanie powinno stosować się powszechnie próbę DWTT. Zalety tej próby są następujące:

- temperatura przejścia w stan kruchy T<sub>p</sub> przy próbie DWTT odpowiada temperaturze występującej w rzeczywistym rurociągu,
- przełom w próbie DWTT odpowiada rzeczywistemu wyglądowi przełomu w rurze.

# 7.4.1. Temperatura przejścia w stan kruchy określana w próbie udarności

Jako kryteria wyznaczania temperatury przejścia w stan kruchy na podstawie prób udarności przyjęto energię łamania 27 J lub 50% przełomu kruchego. Wyniki prób dla rur ze stali X56 i X65 przedstawiono na rys. 46. Z przedstawionych wykresów wynika, że przy kryterium 27 J spoina i SWC w złączach ze stali X65 mają temperaturę przejścia poniżej - 60°C, natomiast spoina w złączach ze stali X56 i sama stal X56 wykazują temperaturę przejścia w stan kruchy około - 55°C. Przy kryterium 50% przełomu kruchego spoina, SWC i sama stal X56 wykazują temperaturę przejścia w stan kruchy około - 30°C.





Rys. 46. Energia łamania próbek udarnościowych i % przełomu kruchego w funkcji temperatury badania dla złączy spawanych rur ze stali X56 i X65:

 a) spoina, b) SWC, c) materiał rodzimy;
 KV, ---- % przełomu kruchego

 Fig. 46. Impact energy and percentage of brittle fracture surfa-

ce as a function of the test temperature for welded joints of X56 and X65 steels: a) weld, b) HAZ, c) base material;

- KV, ---- % of brittle fracture area

### 7.4.2. Próba rozdzierania spadającym ciężarem (DWTT)

### Sposób przeprowadzenia próby

Próbe DWTT [35] przeprowadza się dla rur przewodowych o średnicy zewnetrznej D>508 mm i grubości ścianki g<40 mm. Próbki ze ścianki rury wycina sie mechanicznie lub palnikiem gazowym w aby oś podłużna próbki znajdowała się w kierunku taki sposób. obwodowym rury. Sposób wycinania próbek z rur spawanych wzdłużnie i spiralnie przedstawiono na rys. 47. natomiast ich wymiary na rys. 48. Do próby DWTT próbki muszą być całkowicie spłaszczone lub środek o długości 25-50 mm może zachować pierwotną krzywiznę rury. Na brzegu próbki wykonuje się karb w taki sposób, aby pod dnem karbu w czasie próby zapoczątkowane zostało pęknięcie kruche. Norma API [35] zaleca wykonanie karbu metoda wyciskanja za\*pomoca ostrego przecinaka (promień karbu R = 0,025 mm, kąt rozwarcia 45° ± 2°). Próbki z rury o grubości g<19 mm muszą mieć grubość równa pełnej grubości ścianki rury, natomiast próbz rury o grubości ścianki g>19 mm mogą być albo próbkami o ki pełnej grubości ścianki, albo próbkami o zredukowanej grubości minimum 19 mm, za pomoca obrabiarki mechanicznej jednej lub do obu powierzchni. Próbki, które zostały zredukowane na grubość mniejszą od grubości ścianki rury, muszą być łamane w temperaturze obniżonej o wartość podaną w tablicy 22.



Rys. 47. Sposób wycinania próbek ze ścianki rury do próby DWTT [35] Fig. 47. Way of DWTT specimen cutting out from tube plate [35]



Rys. 48. Wymiary próbek, młota oraz podpór do próby DWTT [35] Fig. 48. Drop-weight tear specimen and support dimensions [35]

Tablica 22

Wielkość koniecznego obniżenia temperatury łamania przy stosowaniu próbek pocienionych do grubości 19 mm.

Grubość ścianki rury [mm]	Wartość redukcji temperatury [°C]
19 - 22	6
22 - 35	11
35 - 40	17

Próbki złamane uznaje się za dobre, gdy przełom kruchy występuje od wierzchołka karbu lub w których przełom ciągliwy występuje na całej powierzchni. W produkowanych ostatnio stalach o wysokiej ciągliwości na rury przewodowe w próbie DWTT pojawia się przełom to tzw. "zjawisko przełomu odwróconego" nietypowy. Jest ("inverse fracture appearance"). W związku z tym przy ocenie pola powierzchni przełomu kruchego zgodnie z normą API próbki te uznaje się za nieważne. Rys. 49 ilustruje schematycznie typowe wyglądy przełomu przy próbie DWTT. Na podstawie prób COD że zjawisko przełomu "odwróconego" jest wynikiem stwierdzono, dużej odporności stali na zarodkowanie pękania [37]. Podjęto wiec wiele prac [36,37,38] w celu stworzenia lokalnego wzrostu kruchości w końcówce karbu w próbie DWTT.

Wzrost kruchości można osiągnąć poprzez wykonanie napoiny i nacięcie mechaniczne, wykonanie napoiny metodą TIG i tłoczenie

- 86 -

karbu lub przetopienie wiązką elektronów ustawionego kołka z materiału twardego w miejscu, gdzie ma być wykonany karb.

Opracowane metody były jednak trudne do powszechnego stosowania i nie gwarantowały powtarzalności wyników. W normie API w roku 1994 [39] wprowadzono więc zalecenie stosowania dla stali wysokowytrzymałych karbu typu "chevron" (rys. 50), który obniża znacznie energię potrzebną do złamania próbki (rys. 51) oraz gwarantuje pojawienie się na dnie karbu przełomu kruchego.





- Rys. 49. Przełomy w próbie DWTT. Porównanie między pojawieniem się normalnego (a) i nietypowego (b) przełomu
- Fig. 49. Fractures in DWTT. Comparison between normal (a) and anomalous fractures

### Ocena powierzchni przełomu

Przy określaniu udziału powierzchni przełomu ciągliwego pomija się ocenę powierzchni przełomu na odległości jednej grubości próbki od grani karbu i strony karbu (rys. 52a). Czasami można spotkać próbki o wyglądzie przełomu jak na rys. 52b. Środkowa część przełomu wykazuje przerywane obszary kruche (C) i plastyczne. Powierzchnie ciągliwe (plastyczne) w obszarze przerywanego przełomu kruchego i ciągliwego muszą być pominięte przy ocenie.

W stalach skłonnych do rozwarstwiania (po regulowanym walcowaniu) bardzo często w strefie rozwarstwienia pojawia się przełom kruchy. Jeżeli przełom kruchy biegnie w rozwarstwieniu



- Rys. 50. Próbka DWTT z karbem typu chevron (a) oraz szczegóły i wymiary karbu chevron (b)
- Fig. 50. DWTT Specimen with Chevron notch (a) and dimensions of Chevron notch

równolegle do powierzchni blachy, jest przy ocenie pomijany (rys. 53a), natomiast występowanie przełomu kruchego w pasmach biegnących pod kątem do powierzchni blachy musi być uwzględnione przy ocenie przełomu (rys. 53b).



Rys. 51. Związek między energiami łamania próbek Charpy V a energiami łamania próbki DWTT z karbem wytłaczanym i z karbem typu chevron

Fig. 51. DWTT impact energy with pressed notch and Chevron notch versus impact energy

Udział przełomu ciągliwego może być wyznaczony kilkoma sposobami:

- metodą planimetrowania (na fotografii lub rzutowaniem optycznym powierzchni przełomu),
- porównując powierzchnię przełomu ze wzorcowym zestawem fotografii lub przełomów,
- metodą zależną od konfiguracji powierzchni przełomu.

Rys. 54 oraz 55 przedstawiają trzy reprezentatywne powierzchnie przełomu. Dla próbek wykazujących powierzchnie przełomu między A i B (rys. 54) obszar ciągliwy można obliczyć z zależności

$$4 \text{ SA} = 1 - \frac{0,75 \text{ X Y}}{(71,12 - 2g)g}$$
(1)

#### gdzie:

- e: %SA udział procentowy obszaru ciągliwego,
  - g grubość próbki [mm],
  - X szerokość przełomu kruchego w odległości g od dna karbu (rys. 55) [mm],
  - Y długość obszaru kruchego [mm].



C - oznacza obszary o wyglądzie przełomu kruchego

- Rys. 52. Powierzchnie przełomu próbki DWTT uwzględniane przy ocenie przełomu ciągliwego (a) próbki wykazującej w środku obszary kruche i ciągliwe (b)
- Fig. 52. Fracture surface included in shear area determination (a) and alternate shear-cleavage fracture appearance

Zależność (1) stosuje się do przypadków między 100% i 45% obszaru ciągliwego. W celu ułatwienia pomiarów powierzchni przełomu ciągliwego wykorzystując zależność (1) zostały sporządzone nomogramy dla różnych grubości ścianek.

Przykład nomogramu przedstawiono na rys. 56. W zakresie udziału powierzchni ciągliwej między 45% i 0% reprezentowanym przez powierzchnię przełomu, którą przedstawia rys. 54"C" % SA otrzymuje się przez wykonanie 3 lub 4 pomiarów całkowitych grubości warg ścięcia, uśredniając je i dzieląc przez grubość próbki.



- Rys. 53. Ocena obszaru przełomu ciągliwego w próbkach wykazują-cych rozwarstwienie; C obszar kruchy, SA obszar CIABLIWY

  - a) przełom kruchy (w rozwarstwieniu) biegnący równoleg-le do powierzchni blachy nie jest uwzględniany,
    b) przełom kruchy (w rozwartswieniu) biegnący pod kątem do powierzchni blachy jest uwzględniony przy ocenie przełomu ciągliwego
- Shear Fig. 53. area determination in specimens with lamination;

  - Shear area determination in specimens with lamination;
     C cleavage area, SA shear area
     a) cleavage fracture (in lamination) running parallel
     to plate surface is not taken into consideration
     b) cleavage fracture (in lamination) running under angle to plate surface is taken into consideration in ductile fracture determination

- 90 -



mniej niż 45% ścięcia

Rys. 54. Typowe powierzchnie przełomów w próbie DWTT Fig. 54. Representative DWTT fracture surfaces



Rys. 55. Sposób pomiaru obszaru ścięcia dla przypadku między 100% i 45% powierzchni przełomu ciągliwego

Fig. 55. Measurment of shear area in case between 100% and 45% ductility fracture surface



Rys. 56. Nomogram do wyznaczenia udziału przełomu ciągliwego dla rury o grubości ścianki g = 12, 7 mm Fig. 56. Chart for determination percent shear for tube thickness g = 12, 7 mm

Wyniki badań

Przygotowane zgodnie z normą API próbki (rys. 47, 48) wycięte z materiału rodzimego (MR) badanej rury łamano w temperaturach -30°C do +20°C na młocie spadowym o energii 4000J. Dodatkowo pobrano próbki ze złącza spawanego z rury spawanej spiralnie ze stali X65. Wygląd przełomów wybranych próbek przedstawiono na rys. 57, natomiast zależność udziału przełomu ciągliwego od temperatury na rys. 58.

Przyjmując kryterium 40% przełomu ciągliwego dla wyników prób DWTT (zgodnie z API), próbki wycięte z rury spiralnie spąwanej ze stali X52 mają temperaturę przejścia w stan kruchy na poziomie -20°C, ze stali X56 poniżej -20°C, ze stali X65 poniżej -30°C, a spoina w złączu ze stali X65 -10°C (rys. 58).



Rys. 57. Przykłady wyglądu przełomów z próby DWTT badanych stali w temperaturach od -20°C do +20°C

Fig. 57. Examples of fractures appearance of tested steels.DWTT in temperatures: -20°C + +20°C



Rys. 58. Zależność udziału przełomu ciągliwego w próbie DWTT od temperatury badania. Rury spawane spiralnie ze stali X52, X56 i X65

Fig. 58. Relationship between the percentage of shear area and test temperature. DWTT test. BM - base material

Przyjmując kryterium 75% przełomu ciągliwego, temperatury przejścia w stan kruchy wynosiły: dla materiału rodzimego rur ze stali X52 -15°C, ze stali X56 -15°C, ze stali X65 poniżej -30°C, a dla spoiny w złaczu rury ze stali X65 -1°C.

Wyniki ww. badań pozwalają również na stwierdzenie, że badane rury spełniają wymagania API, to znaczy minimum 40% przełomu ciągliwego w temperaturze +10°C oraz wymagania Gas Council minimu 75% przełomu ciągliwego w temperaturze 0°C. Wymagane niekiedy kryterium 85% przełomu ciągliwego przy temperaturze -20°C spełniają tylko rury spiralnie spawane wykonane ze stali X65.

#### 7.5. Omówienie wyników badań

Przeprowadzone badania wpływu symulowanych cykli cieplnych spawania na udarność, twardość i strukturę stali X56 i X65 wykazały, że cykl cieplny spawania powoduje powstanie w badanych stalach struktury bainitycznej, a dodatkowo przy dłuższych czasach t<sub>8-5</sub> wydzielanie ferrytu po granicach ziarn byłego austenitu, przy czym większe ilości ferrytu stwierdzono w próbkach stali X56 (rys. 40). Zmiany struktury prowadzą do wzrostu twardości z 187 HV do maksymalnie 295 HV w stali X65 i z 142 HV do 255 HV dla stali X56. Wymienione przyrosty twardości wystąpiły przy cyklu t<sub>8-5</sub> 5 s. Wzrost twardości przy dłuższych czasach wytrzymania jest mniejszy i wynosi dla cyklu trwającego 100 s w przypadku stali X56 – 18 HV, a dla stali X65 – 25 HV (rys. 41).

Próba udarności stali poddanych symulowanym cyklom cieplnym spawania wykazała spadek energii łamania próbek symulowanych w stosunku do próbek w stanie dostawy. Dla stali X56 i X65 obserwuje się zmniejszenie energii łamania ze wzrostem czasu chłodzenia t<sub>8-5</sub>. Wynika stąd zalecenie stosowania do spawania tych stali niskich energii liniowych łuku. Zarówno w stanie dostawy, jak i w całym zakresie zmian t<sub>8-5</sub> stwierdzono niższe energie łamania dla stali X56 (rys. 42).

Wyniki badań złączy spawanych (tabl. 21) wykonanych przy energiach spawania 0,7+2,0 MJ/m drutami OK 12.22 (stale X52 i X56) i S2Mo (X65) oraz odpowiednio topnikami OK Flux 10.71 i BF-6 wykazały, że:

- wytrzymałość złączy rur jest zbliżona do wytrzymałości materiału rodzimego i spełnia warunki odbioru,
- zginanie złączy przy d = 5 g daje wynik pozytywny 180°,
- stosunek  $R_e/R_m$  dla materiału rodzimego i złączy wynosi 0,64+0,77 spełniając warunek  $R_e/R_m \le 0,85$  wg DIN 17172,
- energia łamania materiału rodzimego, SWC i spoin KV w temperaturze 0°C jest wyższa od wymaganych 27 J,

- wysokość nadlewu spoin nie przekracza 3 mm, a więc jest spełniony warunek normy DIN 1626,
- współczynnik kształtu spoiny  $\psi$  dla złączy ze stali X65 zawiera się w przedziale 2,0+2,1, a więc jest zbliżony do zalecanej wartości 2, natomiast dla złączy ze stali X52 i X56 nieznacznie ten warunek przekracza,

- wadliwość złączy mieści się w dopuszczalnych granicach.

Badania temperatur przejścia w stan kruchy na poziomie 27 J wykazały, że złącza ze stali X56 mają temperaturę przejścia poniżej -50°C, a złącza ze stali X65 poniżej -60°C (rys. 46). Dokładniejsze badania własności mechanicznych wskazują, że formowanie w procesie wytwarzania rury prowadzi do obniżenia własności wytrzymałościowych i plastycznych rury (rys. 43,44), co ma związek z efektem Bauschingera.

Wyniki badań ciągliwości uzyskane w próbie DWTT wykazały, że wszystkie badane materiały spełniają wymagania norm API i Gas Counsil (rys. 58).

## 8. BADANIE NIENISZCZĄCE RUR i RUROCIĄGÓW [46]

Coraz wyższe parametry projektowanych rurociągów zmuszają do zastosowania przez producentów lepszych rur i doskonalszych metod badania, dotyczy to zwłaszcza badań nieniszczących rur u wytwórcy, bo tylko w warunkach produkcyjnych można je dokładnie zbadać. W zakresie metod badań nieniszczących stosowane są głównie metody rentgenowskie, metody radiologiczne (radioskopowe), powszechnie stosowane badania ultradźwiękowe oraz magnetyczne. Każda z tych metod ma określone możliwości wykrywania wad w zależności od ich charakteru. Ogólnym dążeniem przewijającym się w normach jest ujednolicenie kryteriów oceny dla różnych metod, a zwłaszcza zrównania w ocenie metody rentgenowskiej i ultradźwiękowej jako dwóch podstawowych metod podczas badania rur. Jest to zrozumiałe, ponieważ obie metody stosowane są często zamiennie.

Jednak należy pamiętać, że określane wielkości wad w metodzie ultradźwiękowej mogą być uważane jedynie za wielkości równoważne do wielkości rzeczywistych wad. Z tego wzgledu też dobierając określoną metodę badania nieniszczącego należy mieć na uwadze rodzaj wad, jakie mają być wykryte. Powszechnie do badań nieniszczących rur stosowana jest metoda ultradźwiekowa ze względu na czułość badania i dobra wykrywalność wad płaskich groźnych dla elementów pracujących pod ciśnieniem. Szeroko obecnie stosowana jest metoda radiologiczna (radioskopowa) jako metoda wydajna w procesie badania i znacznie tańsza od tradycyjnej radiografii. Połączenie tej metody z metodą ultradźwiękową umożliwiającą pełną automatyzację badań daje możliwość uzyskania wyrobu o dobrej pewności i jakości.

W badaniach ultradźwiękowych złączy spawanych rur stosuje się zautomatyzowane urządzenia umożliwiające badania z prędkością ok. 10 m/min. Od urządzeń wymaga się automatycznego prowadzenia zespołu badającego z głowicami względem osi spoiny z dokładnością co najmniej 1 mm. Ustawiona czułość badania na wzorcach testowych, którymi są odcinki rur lub kształtki z nacięciami lub nawierconymi otworkami, musi być podczas badania automatycznie korygowana ze względu na zmieniające się warunki sprzężenia głowica-materiał. Urządzenia te całkowicie rejestrują przebieg badania oraz zaznaczają miejsca, w których wielkości przekroczyły poziom ustawiony, wymagany określoną normą. wad Schemat takiego badania przedstawiono na rys. 59. Dość powszechnie stosowana w badaniach rur jest metoda radiologiczna (radioskopowa), która umożliwia ciągłą obserwację złącza spawanego i jego ocenę. Jest to metoda znacznie tańsza od tradycyjnej radiografii, ale przede wszystkim znacznie wydajniejsza. Dotychczasowa wykrywalność, wynosząca ok. 4% w stosunku do ok. 2% osiągalnych w radiografii przy normalnej klasie, była dość sceptycznie przyjmowana przez odbiorców. Dziś metoda ta jest ogólnie przyjęta w badaniu rur wg normy API. Obecny postęp elektroniki udoskonalił ja, wprowadzajac komputerowe przetwarzanie obrazu oraz sposoby filtracji z równoczesnym powiększeniem nawet do pięciu razy dając wykrywalność poniżej 1%.



Rys. 59. Schemat badania ultradźwiękowego złączy spawanych Fig. 59. Plan of ultrasonic test of welded joints

W celu zobrazowania możliwości tej metody pokazano na rys. 60 obraz radiograficzny z pęknięciem powierzchniowym widocznym na makrozgładzie, które jest dość trudno dostrzegalne przy ogiądaniu radiogramu. Na rys. 61 pokazano to samo miejsce w technice telewizyjnej z obróbką komputerową i powiększeniem 5x dającym wykrywalność ok. 0,8%. Na zdjęciu pęknięcie jest dobrze widoczne i nie ma wątpliwości co do rodzaju wady.



Rys. 61. Obraz zintegrowany elektronicznie, pow. 5x Fig. 61. Electronic integrated picture. Magn. 5x

W celu przeprowadzenia badań nieniszczących rur istnieje wiele norm oraz projektów ujmujących badania nieniszczące w różny sposób, jednak kryteria oceny są dość zbliżone. Stosowane są przeważnie następujące normy:

API 5L - norma ta oprócz wymagań dla rur określa sposoby i kryteria oceny złączy spawanych dla metody ultradźwiękowej i radiologicznej.

DIN 1626 - dla oceny nieniszczącej złączy spawanych przywołuje DIN 17172 Kartę Badawczą Zelaza i Stali SEP 1916 oraz Warunki Dostawy Zelaza i Stali SEL 072-77.

Projekt normy – projekt tej normy dla badań nieniszczących przy-EN 10217 wołuje normę ISO 9765 w zakresie metody ultradźwiękowej oraz ISO 1106/3 dla badań radiograficznych.

Projekt normy – projekt tej normy na gazociągi czynników palnych EN 10208 cz.1 oprócz kryteriów oceny złączy spawanych przywołuje w tym zakresie normę ISO 9765.

Projekt normy - projekt tej normy, której ukazanie zapowiadane PN "Rury prze- jest do końca 1994 r., określa między innymi za wodowe klasa A kres i kryteria oceny złączy spawanych. do budowy

gazociągów"

W celu bliższego zobrazowania zakresu badań bez szczegółowego omawiania kryteriów oceny przedstawiono je dla wymienionych norm w tablicy 23.

Tablica 23

Obszar	Złącze s	spawane	Mate-	Mate-	Mate-	Spoina poprze- czna przy rurach	
Dadaiila	wady wzdłu- żne	wady poprze- czne	strefa przy- spoino-	końce rur po obwo-	rury		
Norm			wa	dzie		spiral- nych	
DIN 1626 DIN 17172	100%	100%	100%	100%	wg uzgod- nień	100%	
API 5L	100%	zaleca- ne	nie wy- magane	nie wy- magane	nie wy- magane	100%	
Projekt EN 10217	100%	100%	nie wy- magane	nie wy- magane	nie wy- magane	100%	
Projekt EN 10208	100%	100%	nie wy- magane	100%	nie wy- magane	100%	
Projekt PN	100%	100%	nie wy- magane	100%	nie wy- magane	100%	

Zakres badań nieniszczących rur

Projekt polskiej normy na rury przewodowe klasa A do budowy gazociągów jest odpowiednikiem normy EN 10208. Zarówno sposób badania, jak i oceny złączy spawanych są identyczne. Z wyjątkiem szczegółów oba projekty norm w zakresie badań są zbliżone do szeroko stosowanej normy API. Różnią się rodzajem stosowanych wzorców i sposobem ustalania czułości badania.

W normach tych zrezygnowano z potrzeby badania stref przyspoinowych i materiału, tak jak dotychczas ujmowała to norma DIN 1626 przywołując SEL 1916. Zamiast tej normy opracowano projekt normy EN 10217, który zakres badań określa prawie identycznie jak projekt normy EN 10208 i projekt PN. Można powiedzieć, że projekty tych norm są zbliżone w sposobie podejścia w tej kwestii do normy API.

Badania magnetyczno-proszkowe stosowane są do wykrywania wad wychodzących na powierzchnię lub podpowierzchniowych w połączeniach spawanych materiałów ferromagnetycznych. Badania te są stosowane głównie do wykrywania pęknięć. W przypadku wykrywania wad podpowierzchniowych należy mieć do metody magnetycznoproszkowej ograniczone zaufanie i sprawdzić na wzorcach jej czułość. Do prowadzenia badań magnetyczno-proszkowych niezbędne są defektoskopy magnetyczne, demagnetyzatory, wzorce, wskaźniki pola magnetycznego (proszki, zawiesiny, wskaźniki pola szczątkowego) oraz mierniki natężenia pola magnetycznego.

Jak wiadomo, jakość produkowanych wyrobów nie zawsze zależy od posiadanych urządzeń badawczych. Dla pełnego zagwarantowania odpowiedniego poziomu jakości produkowanych wyrobów niezbędny jest system zapewnienia jakości. Polski projekt normy na rury przewodowe zalecił posiadanie systemu zapewnienia jakości ISO 9000 dla producentów. Stanowi to znaczny postęp w podejściu, ale należy przypomnieć, że producenci rur wg API posiadający certyfikat do oznaczania swoich wyrobów muszą mieć podobny system zapewnienia jakości przy ubieganiu się o znak API.

W podsumowaniu można stwierdzić, że:

- Badania nieniszczące wymagają nowoczesnej aparatury badawczej oraz odpowiednio przeszkolonego i uprawnionego personelu.
- Podstawowymi metodami badań nieniszczących rur są: metoda ultradźwiękowa, radiologiczna i magnetyczna.
- Większość powszechnie stosowanych i opracowanych projektów norm jest zbieżna w podejściu i ocenie złączy spawanych.
- Wymagania zmierzają w kierunku posiadania przez producentów rur systemu zapewnienia jakości dającego gwarancję wysokiej jakości wyrobów.

Oprócz kontroli w procesie wytwarzania rur ważnym zagadnieniem jest również kontrola złączy spawanych w trakcie spawania montażowego. W ramach tej kontroli prowadzone są oględziny zewnętrzne wykonywanych złączy oraz badania nieniszczące i niszczące połączeń spawanych.

Badania nieniszczące są prowadzone przez ruchome laboratorium metodami radiograficznymi lub ultradźwiękowymi (np. zgodnie z API 1104). Zakres tej kontroli obejmuje 100% wykonanych połączeń. W ramach badań niszczących, mających na celu weryfikację technologii, kontrolę wykonuje się co 200 złącze. Warunki odbioru podane w dokumentacji rurociągu określają wymagania w stosunku do dopuszczalnych wad i możliwości ewentualnych poprawek.

### 9. POLIETYLENOWA IZOLACJA RUR SPAWANYCH

Do niedawna izolacja bitumiczna była jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod antykorozyjnego zabezpieczania rur przewodowych. Wielkość dotychczas zbudowanych rurociągów w świecie jest pokryta powłokami asfaltowymi z mineralnym wypełnia-Izolacja bitumiczna charakteryzuje się jednak niską przyczem. czepnością powłoki do rury, małą odpornością mechaniczną utrudniającą transport rur, jak również brakiem odporności na działania promieni ultrafioletowych, co wymaga dodatkowego jej zabezpieczenia. Wszystkie te własności w połączeniu z niską żywotnością są coraz trudniej akceptowane przez odbiorców rur. Budowa rurociągu jest inwestycją kosztowną i dlatego jego wykonawcy żądaja od producentów rur powłoki, która gwarantowałaby przede wszystkim dłuższą żywotność rurociągu poprzez podwyższenie takich własności, jak przyczepność powłoki do rury, wzrost szczelności, odporności na uderzenie i na wgniatanie. Te dwa ostatnie parametry są bardzo ważne dla wykonawców rurociągów ze względu na uciążliwy miedzyoperacyjny transport rur na placu budowy, jak również rodzaj gruntu, w jakim układany jest rurociąg. Wzrost własności mechanicznych powłoki prowadzi do obniżenia kosztów budowy i eksploatacji rurociągu.

W latach poprzednich przy izolowaniu rur modyfikowanym asfaltem nie zwracano uwagi na ochronę środowiska naturalnego w takim stopniu, jak to się czyni obecnie. Nie tylko środowisko naturalne jest zagrożone, ale przede wszystkim ludzie, którzy wykonują te izolacje, czy to na wydziale produkcyjnym czy przy budowie rurociągu izolując miejsca łączenia rur. Nakładanie izolacji bitumicznej powodowało wysyłanie w rejonie Huty Ferrum do atmosfery rocznie:

10.249 kg/rok - węglowodorów alifatycznych,

2.998 kg/rok - węglowodorów aromatycznych,

2,2 kg/rok - benzo-a-pirenu.

Przytoczone tu cyfry obrazują, jak szkodliwa dla środowiska jest sama technologia wykonywania tej izolacji, i jak degenerująco wpływa na glebę. Szeroka działalność światowych organizacji ochrony środowiska naturalnego sprawiła, że w dziedzinie izolacji rozpoczęto poszukiwania materiałów do izolowania rurociągów, które byłyby obojętne dla środowiska, a technologia wytwarzania z nich powłok izolacyjnych i nieuciążliwa dla ludzi oraz pozbawiona emisji węglowodorów do atmosfery. Poszukiwania te, jak i wieloletnie badania doprowadziły do tego, że coraz częściej izolacja bitumiczna jest wypierana przez powłoki z tworzyw sztucznych, które są dla środowiska naturalnego obojętne, a ich żywotność gwarantowana jest na 50 lat.

Huta "Ferrum" jako główny w Polsce producent rur spawanych, chcąc utrzymać swoją pozycję w kraju od 1992 roku wdraża technologie izolacji oparte na zastosowaniu tworzyw sztucznych, których bazą jest polietylen. Stosowane aktualnie technologie izolowania rur tworzywami sztucznymi pozwoliły zaspokoić wymagania odbiorców rur co do jakości izolacji i zwiększenia żywotności rurociągu do 50 lat, pod warunkiem że powłoki spełniają wymagania norm DIN 30672 i DIN 30670.

Warstwy ochronne z tworzyw sztucznych oprócz zwiększenia jakości powłok antykorozyjnych nie wpływają degenerująco na ochronę środowiska naturalnego, gdyż stosowane technologie są ekologicznie czyste zarówno w sferze wytwarzania, jak i eksploatacji gotowego wyrobu.

Aktualnie w kraju stosowane są następujące technologie izolacji rur:

- nakładanie taśm polietylenowych na zimno.

- nakładanie taśm polietylenowych na gorąco tzw. system SYNERGY,

- ekstruzyjne trzywarstwowe nakładanie polietylenu.

9.1. Izolacja rur taśmami polietylenowymi na zimno

Zastosowanie tej metody nakładania powłok izolacyjnych nie sprawia większych problemów technologicznych, gdyż do tej technologii wykorzystać można istniejące ciągi do nakładania izolacji bitumicznej. Powłoki z taśm polietylenowych nakładanych na zimno wykonuje się zgodnie z normą DIN 30672 z 1991 roku. Główni producenci taśm to Altene z Włoch, Denso z Niemiec oraz Polyken Technologies z USA.

Jednym z warunków prawidłowego nałożenia powłoki jest dobre przygotowanie powierzchni rury. Taśmy polietylenowe nakładane na zimno czy gorąco wymagają stopnia oczyszczenia powierzchni Sa 2 1/2 wg ISO 8501-1 (śrutowanie do połysku metalicznego). Powłoka wykonana z taśm polietylenowych na zimno oprócz swoich zalet posiada również wady, a mianowicie niezbyt szczelnie pokrywa powierzchnię rury w strefie przyspoinowej. Strefa przyspoinowa pod powłoką jest praktycznie zabezpieczona tylko podkładem, jaki stosuje się do zwiększenia przyczepności taśm do powierzchni rury. Zabezpieczenie tej strefy wymaga dodatkowej operacji nakładania z każdego końca rury po obu stronach spoiny, kitu lub miękkiej taśmy uszczelniającej, tak aby po nałożeniu powłoki woda nie dostawała się pod powłokę. Brak uszczelnienia na całej długości spoiny jest kłopotliwy dla wykonawców rurociągu, ponieważ w wypadku przecinania rur należy strefę przyspoinową zabezpieczyć specjalnym kitem.

#### 9.2. Izolacja taśmami polietylenowymi na gorąco - metoda Synergy

Aby podwyższyć jakość izolacji polietylenowej, w 1993 roku wdrożono w Hucie "Ferrum" technologię izolacji systemu Synergy, która spełniała wymagania w zakresie prawidłowego zabezpieczenia strefy przyspoinowej oraz nie wymagała dużych nakładów inwestycyjnych. System Synergy jako system izolacji wielowarstwowych został opracowany w USA i składa się z termicznie aktywnego podkładu (primera), termoplastycznego elastomeru stanowiącego warstwę środkową i łączącej się z nią poliolefiniowej warstwy zewnętrznej. Zadaniem podkładu jest:

- utworzenie cienkiej ciągłej warstwy przylegającej bezpośrednio do powierzchni rur i zagwarantowanie natychmiastowego przylegania i przyklejenia warstwy środkowej,
- zabezpieczenie powierzchni rury przed korozją za pomocą inhibitorów SCC ( Stress Corrosion Cracking) dodanych do składu podkładu.

Druga warstwa składa się z chemicznie modyfikowanego elastomeru. Ten składnik jest nanoszony na powierzchnię folii z modyfikowanych poliolefin i następnie przygotowany do dystrybucji w postaci gotowych do zastosowania rolek. Modyfikowany elastomer jest zaprojektowany tak, aby następowało chemiczne połączenie ze składnikami podkładu, co powoduje połączenie zwenętrznej powierzchni rury z warstwą poliolefinową.

Ostatnia warstwa zewnętrzna składa się z polimeru na bazie poliolefin, uformowanego w postaci arkusza zwiniętego w rolkę. Powłoka ta jest przygotowana do chemicznego i mechanicznego związania się z warstwą środkową. W rezultacie otrzymujemy kompletny system okrywający rurę, który łączy w sobie własności ochrony antykorozyjnej oraz mechanicznego zabezpieczenia. Nowa metoda wielowarstwowego systemu pokrywania rur jest zaprojektowana do przemysłowego zastosowania w ciągłym procesie, przy użyciu stacjonarnego urządzenia. Dla zapewnienia najwyższych standardów jakości w zależności od wymagań konkretnego zastosowania, instalacja służąca do nanoszenia izolacji jest wyposażona w mierniki i regulatory służące do ustalania parametrów procesu izolowania.

Technologia nakładania powłoki systemem Synergy wymaga wielu procesów cząstkowych, które schematycznie przedstawiono na rys. 62.



- Rys. 62. Schemat układu do izolacji taśmami polietylenowymi na gorąco – metoda Synergy 1 – śrutownica zewnętrzna rur, 2 – ruszt podawczy rur, 3 – piec podgrzewający rurę, 4 – nanoszenie podkładu, 5 – instalacja odciągowa oparów, 6 – urządzenie izolujące, 7 – piec wygrzewający rurę z nałożoną taśmą, 8 – strefa chłodzenia wodnego, 9 – stanowisko wygrzewania taśm
- Fig. 62. Plan of hot pipe covering with polyethylene tapes Synergy method 1 - external shot peening machine for pipes, 2 feeding grate for pipes, 3 - holding furnace for pipes, 4 - ground coating, 5 - installation for vapours removing, 6 - izolation system, 7 - furnace for soaking of covering pipe, 8 - water cooling zone, 9 - soaking stand of covering pipe
- Usunięcia powierzchniowych zanieczyszczeń, które jak rdza, zendra czy przyklejenia odprysków spawalniczych przez śrutowanie (poz.1). Powierzchnia rury po śrutowaniu musi posiadać stopień zanieczyszczenia Sa 2 1/2 wg ISO 8501-1.
- Wstępne podgrzewanie rur w piecu elektrycznym przelotowym. Rura przechodzi przez piec ruchem posuwisto-obrotowym i zostaje podgrzana do temp. 85°C. Piec posiada możliwość regulacji nagrzewania w zależności od średnicy rury i grubości jej ścianki (poz.3).

- Nanoszenie podkładu na powierzchnię rury za pomocą pistoletu natryskowego. Grubość naniesionej warstwy 30 μm. Stanowisko wyposażone jest w instalację odciągową odprowadzającą wydzielające się opary związków lotnych (poz.4 i 5).
- 4. Spiralne nawinięcie taśmy wewnętrznej i zewnętrznej. Nawijanie taśm prowadzone jest z 2 owijarek, dla każdej taśmy oddzielna, które pozwalają na prowadzenie taśm pod odpowiednim kątem w celu uzyskania wymaganej grubości izolacji, jak i powodują, że taśma nawija się z określonym naprężeniem (poz.6).
- Połączenie warstw taśmy wraz z ich przyczepieniem do powierzchni rury następuje w elektrycznym piecu tunelowym, przez który rura przesuwa się ruchem obrotowym w określonym czasie. Proces stapiania warstw przebiega w temp. 105°C (poz.7).
- Hartowanie powłoki za pomocą wody. Rura po wyjściu z pieca ze stopioną powłoką przechodzi przez strefę chłodzenia wodnego, które powoduje utwardzenie powłoki i ścisłe przyczepienie do powierzchni rury (poz.8).
- Operacje końcowe to rozcinanie powłoki pomiędzy kolejnymi rurami, usuwanie powłoki z końców rur, przeprowadzenie badań odbiorowych, takich jak pomiary grubości, przyczepności i szczelności powłoki oraz badanie odporności na uderzenie i wgniatanie.

### 9.3. Polietylenowa izolacja rur metodą wytłaczania

Najnowszą technologią izolacji rur jest nakładanie powłok polietylenowych metodą wytłaczania. O jej zaletach decyduje głównie wysoka wytrzymałość mechaniczna, odporność na uderzenie wgniatanie oraz bardzo wysoka przyczepność powłoki do rury i î oporność elektryczna. Ważną zaletą izolacji jest to, że polietylen w trakcie nakładania go na powierzchnię rury jest konsystencji miękkiej masy, która doskonale wypełnia strefę przyspoinową, co tym samym eliminuje na rurach spawanych zalążki ognisk koro-Ponadto izolacja wytłaczana posiada znacznie wyższe zyjnych. wartości mierzonych parametrów, takich jak szczelność powłoki, przyczepność do rury, czy odporność na wgniatanie i uderzenie w porównaniu do powłoki wykonanej systemem nakładania taśm na zimno czy gorąco.

W świecie znane są trzy metody nanoszenia pokryć polietylenowych.

- spiekanie pokryć polietylenowych,

- wytłaczanie polietylenu w formie rękawa,

 wytłaczanie ekstruzyjne polietylenu w formie taśmy owijającej rurę.

## 9.3.1. Izolacja rur metodą spiekania proszku polietylenowego

W procesie pokrywania metodą spiekania, materiałem wyjściowym jest drobno zmielony polietylen. Na wyczyszczoną i nagrzaną do temperatury około 320°C rurę natryskuje się proszek polietylenu, który przy zetknięciu się z gorącą powierzchnią ulega stopieniu i spieczeniu. Po wyjściu z urządzenia nakładającego rura jest chłodzona wodą.

# 9.3.2. Izolacja rur metodą wytłaczania polietylenu w formie rękawa

W procesie nakładania pokryć metodą wyciskania rękawa foliowego wyciskany rękaw (rura) z uplastycznionego polietylenu jest naciągany na rurę pokrytą uprzednio spoiwem. Wywołanie podciśnienia pomiędzy rurą a rękawem zapewnia bardzo dobre przyleganie rękawa do powierzchni rury.

Schemat instalacji do nakładania pokryć metodą wytłaczania polietylenu w formie rękawa przedstawiono na rys. 63.



Rys. 63. Schemat instalacji do nakładania pokryć metodą wytłaczania rękawa polietylenowego Fig. 63. Installation plan for coating with polyethylene drawing method

Kolejne etapy procesu technologicznego są następujące:
1. Czyszczenie powierzchni rury śrutem stalowym do stopnia czystości Sa 2 1/2 wg ISO 8501-0 (DIN 55928 cz.4).
- 2. Łączenie rur w celu otrzymania ciągłej linii (rury).
- 3. Przesuwanie rury podajnikiem gąsienicowym.
- 4. Nagrzewanie indukcyjne do temperatury pokrywania (ok.200°C) z ciągłą kontrolą temperatury.
- 5. Elektrostatyczne natryskowe pokrywanie żywicą epoksydową o grubości 60-80 mm.
- Elektrostatyczne natryskiwanie powierzchni spoiwem adhezyjnym o grubości 170-250 μm.
- 7. Dodatkowe zewnętrzne grzanie pokrycia adhezyjnego.
- Pokrywanie polietylenem metodą wyciskania rękawa. Na pokrycie może być używany polietylen niskiej, średniej lub wysokiej gęstości. Granulat polietylenu dostarczany jest z silosa i dozowany podajnikami pneumatycznymi.
- 9. Chłodzenie wodą pokrycia polietylenowego.

10. Sprawdzenie jakości powłoki na przebicie elektryczne.

11. Znakowanie rur.

## 12. Rozcinanie ciągłej linii i usuwanie pokrycia polietylenowego

z końcówek rur.

Ze względów technicznych i ekonomicznych metodą wyciskania rękawa izoluje się rury o średnicach od 25 do 400 mm. Rury o średnicach większych niż 400 mm izoluje się metodą ekstruzyjnego wyciskania taśm.

Rury izolowane polietylenem mogą pracować w zakresie temperatury – 40 do + 80°C. W tablicy 24 podano zależności grubości od średnicy wg normy DIN 30670.

Tablica 24

- Seodolico pupy	Minimalna grubość pokrycia [mm]				
Sredifica Pury	Normaine	Wzmocnione			
do 100	1,8	2,5			
100 - 250	2,0	2,7			
250 - 500	2,2	2,8			
500 - 800	2,5	3,2			
powyżej 800	3,0	3,7			

9.3.3. Izolacja metodą wyciskania taśmy polietylenowej owijającej rurę

Powłoka otrzymana tą metodą jak przy poprzedniej metodzie składa się z trzech warstw (rys.64):

 warstwy wewnętrznej o grubości 60 µm, którą stanowi sproszkowany epokryd nanoszony na rurę elektrostatycznie,

- warstwy pośredniej o grubości 170-250 µm będącej kopolimerem etylenu, kwasu akrylowego i jego estrów nanoszonej jako wytłaczana folia owijana na obracającą się rurę,
- warstwy zewnętrznej o odpowiedniej grubości, którą stanowi polietylen nakładany jako wytłaczana folia na obracającą się rurę.



Rys. 64. Przekrój poprzeczny rury pokrytej trójwarstwową izolacją Fig. 64. Cross-section of pipe with three layer coating

Technologia wytwarzania powłoki polietylenowej trójwarstwowej na rurach przedstawiona jest schematycznie na rys.65. Rury spawane dostarczane sa do linii izolowania transportem kolejowym lub samotokiem bezpośrednio z hali produkcyjnej. W pierwszej fazie rury poddawane są operacji wstępnego suszenia w przelotowym piecu gazowym. W piecu tym są podgrzewane do temperatury około 30°C od temperatury otoczenia. Celem tej operacji jest dowyższej kładne wysuszenie rur, aby spowodować łatwiejsze odchodzenie zendry i uniknąć zbrylenia się śrutu przy śrutowaniu oraz uzyskanie tej samej temperatury rur na wejściu linii nakładania izolacji. Jest to szczególnie ważne dla rur dostarczanych transportem z zewnątrz hali. Aby uniemożliwić dostanie się śrutu do wnętrza rury podczas czyszczenia, na końce rur zakłada się zatyczki. Czyszczenie powierzchni odbywa się w śrutownicy. Stan powierzchni rury po śrutowaniu odpowiada stopniowi czystości Sa 2 1/2 wg DIN 55928 część 4, tj. praktycznie srebrzystej powierzchni rury. Ośrutowana rura przechodzi prze piec indukcyjny, gdzie nagrzewana jest do temperatury około 200°C. Nagrzewanie następuje za pomocą cewki indukcyjnej, znajdującej się w określonej odległości od komory natryskowej żywicy epoksydowej. Cewki indukcyjne dopasowane są do poszczególnych zakresów średnic rur.



Rys. 65. Schemat procesu technologicznego nakładania trójwarstwowej izolacji metodą wytłaczania taśmy polietylenowej

Fig. 65. Processing plan of three layer coating with drawing of polyethylene tape

Nagrzewana do temperatury około 200°C rura przechodzi przez tzw. "komorę epoksydu", w której na całą powierzchnię rury natryskiwany jest elektrostatycznie epoksyd. Natrysk odbywa się za pomocą pistoletów zabudowanych w komorze, tak aby zapewniały równomierną, kryjącą całą powierzchnię warstwę żywicy epoksydowej o grubości 60 µm. Komora epoksydu zaopatrzona jest w system odciągowy dla epoksydu z możliwością jego zawracania do obiegu. Po wyjściu rury z komory epoksydu całą powierzchnię rury owija się jednocześnie folią ze środka adhezyjnego (kopolimer) i folią z polietylenu. Obie te substancje są podawane oddzielnie za pomocą dysz ekstruderów.

Polietylen i kopolimer wprowadzane są do ekstruderów w formie granulatu. gdzie sa podgrzewane do temperatury ok. 200°C i stapiane, aż do uzyskania konsystencji pozwalającej na wytłoczenie dyszami odpowiednich taśm, które są nakładane na powierzchnię rury i dociskane do niej specjalnym wałkiem. Grubość nakładanej warstwy pośredniej jest dla każdego zakresu średnic rur i wynosi około 170-250 µm. Głównym jej zadaniem jest taka sama umożliwienie wytworzenia się ścisłego wiązania chemicznego popolietylenem i stworzenie monolitycznej miedzy epoksydem a warstwy tworzywa sztucznego przylegającego do rury. Natomiast grubość warstwy polietylenowej jest różna dla poszczególnych średnic rur zgodnie z normą DIN 30670 (tablica 24). Rura z nałożoną już powłoką przechodzi przez strefę intensywnego trzystopniowego chłodzenia wodnego. W pierwszej fazie rura chłodzona jest tylko przez łaminarny spływ wody, w II fazie intensywnie chłodzona tylko z zewnątrz, a w III fazie chłodzenie następuje wewnątrz rury, po czym następuje usunięcie wody przez podniesienie rury z jednego końca. Operacją końcową jest czyszczenie końców rur z resztek epoksydu i ukosowanie obciętej na końcach rury izolacji. W ciągu całego procesu izolowania rur jest prowadzona stała kontrola jakości wykonywanej izolacji. Stałej kontroli podlegają: chropowatość powierzchni rury po śrutowaniu, grubość warstwy epoksydu, kopolimera i polietylenu, jak również całkowigrubość nałożonej powłoki. Ponadto kontrolowana jest szczelta ność powłoki, jej odporność na wgniatanie i uderzenie, jak również przyczepność powłoki do podłoża. W Polsce izolację polietylenową trójwarstwową na rurach wykonuje tylko Huta "Ferrum". Na decyzję o jej uruchomieniu miały wpływ przede wszystkim własności tej izolacji, względy ekologiczne oraz wymagania stawiane przez odbiorców rur, którzy coraz częściej domagali się ochrony antykorozyjnej z polietylenu. Izolacja polietylenowa jest stosowana w świecie już od około 25 lat, ponieważ za pomocą tego materiału można spełnić zróżnicowane wymagania, takie jak:

- wytrzymałość i odporność przy transporcie, składowaniu, układaniu i pracy zarówno przy niskich, jak i wysokich temperaturach,
- wysoka wytrzymałość na uderzenie, wgniatanie i ścieranie zapobiega w znacznym stopniu uszkodzeniom powłoki w czasie transportu czy składowania lub układania w ziemi,
- dobra odporność na starzenie, poprzez stabilizację przeciwko uszkodzeniom termiczno-utleniającym w podwyższonych temperaturach pracy,
- dobra odporność na działanie atmosferyczne przy składowaniu pośrednim rur,
- wysoka odporność na wpływy zewnętrzne po ułożeniu rurociągu na działanie agresywnych ziem, wody słodkiej i zasolonej, mikroorganizmów i obrastanie roślinnością,
- dobre własności dielektryczne i niewielka przepuszczalność dla pary wodnej i gazów,
- ekonomiczne metody powlekania,
- brak obciążeń dla środowiska naturalnego w trakcie nakładania powłoki jak i eksploatacji rur z powłoką polietylenową,
- dodatkowy wzrost wytrzymałości rury w wyniku utworzenia "kompozytu" stal-tworzywo sztuczne,
- technologia izolacji polietylenowej nie powoduje przedostawania się do atmosfery szkodliwych czy trujących substancji, a powstające odpady są wykorzystywane w innych procesach technologicznych.

Uruchomienie linii technologicznej izolowania rur polietylenem trójwarstwowym pozwala uzyskać wysokie parametry jakościowe powłok i tym samym skutecznie konkurować z wyrobami zachodnimi pojawiającymi się na naszym rynku. Pozwala to również na wejście polskich rur na rynki zagraniczne.

Porównanie własności izolacji wg norm DIN oraz wyniki badań firmy BASF zestawiono w tablicy 25.

Uruchomiona w Hucie "Ferrum" technologia izolacji przewiduje stosowanie następujących materiałów:

- 1. Podkładu epoksydowego typów BASEPOX PE 50-7179 lub BASEPOX PE 50-6109 produkcji firmy BASF RFN.
- Kopolimeru typów NCPE 0420 produkcji NESTE CHEMICALS Finlandic lub LUCALEN A 310 M produkcji firmy BASF.
- Polietylenu typów NCPE 3522-CJ produkcji NESTE CHEMICALS lub LUPOLEN 2452 D 413 firmy BASF.

Do izolacji połączeń rur w warunkach montażowych stosuje się rękawy termokurczliwe:

- POLYEN 6000 produkcji Polyken Technologies USA,
- TERMOFIT GAPS-10-UNI produkcji Raychen RFN lub też laminowane taśmy plietylenowe do izolowania na zimno.

Sposób izolowania połączeń montażowych jest następujący: Po ułożeniu spoiny obwodowej powierzchnie nie izolowane i okolispoiny czyści się szczotkami lub tarczami do uzyskania metace licznego połysku. Izolację fabryczną matowi się papierem ściernym na długości około 20 cm. Tak przygotowaną powierzchnie podgrzewa się do temperatury około 60°C i nakłada rękaw termokurczliwy stopniowo go podgrzewając od środka w kierunku zewnętrznym. Rękaw dociska się rolką, aby usunąć pęcherze powietrza dokładnie przykleić do rury. Przy izolowaniu taśmami polietyi lenowymi na zimno powierzchnię rury gruntuje się podkładem, a po osiągnięciu stanu pyłosuchości owija się taśmą wewnętrzną i zewnętrzną stosując zalecaną wielkość zakładek. Nowo nawinieta izolacja powinna zachodzić po około 20 cm na krawędzie izolacji fabrycznej.

Tablica 25

Porównanie własności izolacji wg norm DIN 30670 i DIN 30672 (klasa C)

Własności J powłoki s	Jedno- stka	Wymagania DIN 30670		Wymagania DIN 30672		Wyniki badań firmy BASF		Wyniki badań powiok Huty
		Powłoka normalna N	Powłoka specjalna	Klasa C 30	Klasa C 50	PE - LD "N"	PE - MD "S"	"N"
Temperatura pracy	۰C	50	70	30	50	60	BO	9
Grubość min. Dn (100 (g) 250 (Dn (250 (g) 250 (Dn (500 500 (Dn (500 Dn (500	בתובת התובת מתורת התובת מתובת	"n" "V" 1,8 2,7 2,2 2,9 2,2 3,2 3,0 3,7	*D* *V* 1,8 2,5 2,2 2,7 2,2 3,2 3,0 3,7	nie nor wg prod	muje się ucenta	jak DIN 30670	jak DIN 30670	3,50
Szczelność przy napięciu	kV	25	25	5kV+5kV/mm	5kV+5kV/mm	25	25	25
Przyczepność (Po) powioka-rura 23°C 50°C	N/cm N/cm	azybkoáć 10 m > 35 > 25	ndrywania n/min 35 25	azybkoáć 100 mi > 15	odrywania m/min 3	> 70 > 50	> 70	192 185
Odporność na uderzenie	Nm/mm	> 5	> 5	15/g	15/g	> 7	> 9	
Odporność na wgniatanie								
(10 N/mm <sup>2</sup> ) 23°C 50°C 70°C	מזמו ממח מזמת	\$ 0; <del>2</del> \$ 0;3	- 1 О, Э	g-0,6 -	g-0,6	0,1	0.1 0.1 0.2	0,05 0,16 0,29
Wydłużenie przy zerwaniu	Χ.	> 200	> 200	2 250 a)	1 250 a)	> 400	> 400	950
Oporność wł. powioki	Ωm <sup>2</sup>	108	i 0 <sup>8</sup>	108	10 <sup>8</sup>	109	109	
Starzenie termiczne 100 dni 200 dni	ž	b) AHI/MI <sub>o</sub> <35	<b>дні/ні</b> (35	100 dni 50°C 4P/P <sub>o</sub> (25 c)	100 dni 70°C AP/P <sub>o</sub> (25	wytrzymuje próbę	wytrzymuje próbę	w trakcie badań
Starzenie fotooksydacyjne	X	<b>амі/м</b> і <sub>0</sub> <35	<b>ΔМІ/НІ<sub>0</sub>&lt;35</b>	badanie nie	e występuje	- " -	- * -	

A - dla materiału powłokowego, b - zmiana wskaźnika płynięcia dla polietylenu, c - zmiana przyczepności do rury

- 114

## LITERATURA

- [1] Engelman H., Engel A., Peters P., Düren, Müsch H.: First use of large - diameter pipes of the steel GRS550 TM in a high - pressure gas pipeline. 3R International, 25 (1986) nr 4.
- [2] Recommendation for the forming and welding of steel pipe for the construction of long - distance pipelines. Doc. IIW IX-1507-88.
- [3] Matousu M. i in.: Large-Diameter Pipes of Steel GRS550 TM (X80) in the 4th Transit Gas Pipeline in Czechoslovakia, 3R International 26 (1987) 8, s.534 ff.
- [4] Boese D., Werner B., Wirtz: Das Verhalten der Staähle beim Schweissen. DVS, Düsseldorf 1984.
- [5] Kasatkin B., Musijaczenka W.: Niskolegirowannyje stali wysokoj procznosti dla swarnych konstrukcji. Tiechnika, Kijew 1970.
- [6] Kottrel K.: Trebowanija pradljawlejajemyje k wysokoprocznoj stali. W zb. Problemy mietałłowedienija i fiziki mietałłow. Mietałłurgizdat. 1955.
- [7] Hrivnak J.: Guide to the metallurgy of welding and weldability of low-alloy heat resistant structural steels. Doc. IIW IXG-319-86.
- [8] Dziubiński J. i in.: Sprawozdanie z projektu celowego Nr 7729992C/1020, Katowice, nie publikowane.
- [9] Adamiec P.: Metalurgiczne aspekty własności plastycznych spoin wykonanych łukiem krytym w złączach ze stali C-Mn. Zeszyty Naukowe Mechanika, Z 80, Gliwice 1984.
- [10] Makarow E.: Koliczestwiennaja ocenka soprotiwlenija swarnych sojedinjenij obrazowaniu chłodnych treszczin. I Simposjum, Wysokie Tatry 1981.
- [11] Richter H.: Fügetechnik, Schweisstechnik. DVS-Verlag 1990, s.68.
- [12] Delbeck W. i in.: Auswirkung das Stresstest auf spannungsrisskorrosionsgichädigte Leitungsbauteile. Gas Erdgas 134 (1993) Nr 5.

- [13] Michałowski W., Trzop S.: Budowa rurociągów dalekiego zasięgu. WNT, Warszawa 1982.
- [14] Lorenz K., Düren C.: Evaluation of large-diameter pipe steel weldability by means of the carbon-equivalent. Zvaranie 33 (1984) Nr 9.
- [15] Düren G., Niederhoff K.: Hardness in the heat affected zone of pipelines girthwelds. Conf. Weldind a.Performance of Pipe Lines. London 1986.
- [16] Michałowski W.: Automatyczne spawanie rurociągów w Japonii. Biul.Branż. ZBWI, Hydrobudowa Nr 1, 1974.
- [17] Terai K., Arikawa A.: Recent Developments in One-Side Automatic Welding. Sudostrojenie 1974 (ros).
- [18] Scholz E. i in.: UP-Mehrdrahtschweissen von Grossrohren für den Transport von Sanergas DVS-Ber. B 123, Düsseldorf.
- [19] ESAB Welding Handbook ESAB AB. Goteborg.
- [20] UP-Handbuch-Messer Griesheim GmbH Frankfurt a. Main.
- [21] The Procedure Handbook of Arc Welding, Linc. Electric Comp.
- [22] Stark M.: Management Engineering GmbH. Informacja prywatna.
- [23] Handbuch der Oerlikon Schweisszusätze und Hilfstoffe. Oerlikok Schweisstechnik GmbH, 1991.
- [24] Thyssen Schweisszusätze Phoenix-Union. Thyssen Schweisstechnik GmbH, Hamm.
- [25] WTWO Topniki aglomerowane. Warunki opracowane przez FER-SAB, Katowice 1993.
- [26] Materiały reklamowe Huty Ferrum, Katowice 1993.
- [27] Gärtner A., Graf M., Hillenbrand H.: Anforderungen an Gross-rohre bis zum Ende dieses Jahrhunderts aus der Sicht des Herstallers.
- [28] Tasak E.: Czynniki wpływające na pękanie stali konstrukcyjnych. Przegląd Spaw. Nr 7, 1992, s.11.
- [29] Weiner R., Mercer W. i in.: Steel Dipe for the British Gas Industry (Research Communication GC 194). The Gas Council 1972 IM Sygn. 14.483/DL.
- [30] Harrison T., Weiner R., Faernehough G.: The Influence of the Bauschinger Effect in High Yeld Steel Pipes. Journal of Iron and Steel Institute 1972, t.210 (5).
- [31] American Petroleum Institute, Recommended Practice for Conducting Drop-Weight Tear Tests on Line Pipe, API 5L3/RP 5L3, 1978.
- [32] Freiner K., Feldman U.: The role of reversible temper embrittlement in TM-rolling of HSLA-steels, Steel Res. nr 8 1986, s.409.
- [33] Kunishige K., Fukuda M.: Separations Occuring in Controlled Rolled Hot-strips, Trans.Iron A.Steel Inst.Jap. 1979 nr 6, s.423.
- [34] Baldi G., Guzzichelli O.: Critical stress for delamination

- [35] American Petroleum Institute Zalecany sposób postępowania przy przeprowadzaniu prób rozrywania na rurociągach API 5L3/RP, 1978.
- [36] Nozaki N., Bessyo K. wsp. Drop Weight Tear Test on the High Toughness Linepipe Steel, Sumitomo Search, R6 (1981), s.75-90.
- [37] Ogasawara M. i wsp. Testuto Hagune 61 (1975), s.252 (zaczerpnięto z poz. Nozaki N., Bessyo K. in Drop Weight Tear Test on the High Toughness Linepipe Steel, Sumitomo Search, R6, 1981, s.75-90.
- [38] Junker G., Vogt G.: Einfluss der Kerbbeschaftlenheit im Fallgewichtaversuch nach Battele auf die übergangstemperatur beihochzähen Feinkornbaustählen. Stahl u.Eisen T.99 (1979) nr 7, s.352.
- [39] Norma API. 5L3/RP dodatek nr 4147 Rev. 2/8/94.
- [40] Klimpel A., Luksa K., Makosz P.: Spawanie rurociągów przesyłowych drutem proszkowym samoosłonowych. Seminarium pt. "Korzyści i kryteria zastosowania mieszanek spawalniczych oraz drutów proszkowych". Instytut Spawalnictwa, Interwelding, Katowice 1994.
- [41] Adamiec P., Josz K., Kucia J.: Prace spawalnicze przy budowie rurociągu przepływowego gazu w Austrii. Przegląd Spawalnictwa nr 11/94.
- [42] Dziubiński J., Lalik S., Peca L.: Wymagania techniczne dla rur stosowanych na przewody magistralne do transportu paliw gazowych i płynnych w normach krajowych i zagranicznych. Przegląd Spawalnictwa nr 11/94.
- [43] Adamiec P., Dziubiński J.: Stale na tranzytowe rurociągi gazowe. (Spawalność i wytyczne spawania rurociągów). Przegląd Spawalnictwa nr 11/94.
- [44] Tasak E., Ziewiec A., Maracha G.: Wpływ formowania i spawania na własności mechaniczne rur. Przegląd Spawalnictwa nr 11/94.
- [45] Bogacki A., Peca L.: Program produkcyjny rur Huty FERRUM. Przegląd Spawalnictwa nr 11/94.
- [46] Leśniak A.: Badania nieniszczące rurociągów. Przegląd Spawalnictwa nr 11/94.
- [47] Dziubiński J., Adamiec P., Lalik S., Tasak E.: Welding and mechanical properties of X52-X65 steel tubes. Proc. of Seventh International Conference on the Joining of Materials. May 31 June 2, 1995, Helsingor, Denmark.
- [48] Dziubiński J., Adamiec P., Tasak E., Lalik S.: Spawanie i własności rur ze stali X52, X56 i X65. Przegląd Spawalnictwa nr 7/95.

- [49] Dziubiński J., Tasak E., Lalik S., Bogacki A., Peca L.: Wpływ warunków spawania na strukturę i własności rur wzdłużnie spawanych ze stali niskostopowych. Inżynieria Materiałowa nr 1, styczeń-luty 1994.
- [50] Dziubiński J., Tasak E., Lalik S., Bogacki A., Peca J.: The properties of 16G2Nb, G390-type longitudinally welded stell tubing. Welding International Nr 12, Vol.7, 1993, s.942-947.
- [51] Chaudhari i in.: German gas pipeline first to use new generation line pipe. Oil and Gas Journal, Jan. 2, 1995, s.40-46.

# WYTWARZANIE RUR I RUROCIĄGÓW DO TRANSPORTU PALIW CIEKŁYCH I GAZOWYCH

### Streszczenie

Omówiono stale przeznaczone do wytwarzania rurociągów do transportu paliw ciekłych i gazowych. Szczegółowo przedstawiono spawalność tych stali, a więc: skłonność do pękania gorącego, skłonność do pękania zimnego, skłonność do pękania kruchego oraz inne pęknięcia decydujące o spawalności.

Zaprezentowano spawanie łukiem krytym rur o dużych średnicach, a więc: spawanie wzdłużne łukiem krytym rur o dużych średnicach, spawanie spiralne łukiem krytym rur, ustawienie głowic spawalniczych, wpływ topnika na kształt spoiny, druty i topniki do spawania łukiem krytym rur dużych średnic, wady spotykane w spawanych rurach dużych średnic. Zestawiono rury spawane produkowane w Hucie Ferrum.

Omówiono spawanie rurociągów tranzytowych, a w szczególności spawanie obwodowe rurociągów celulozowymi elektrodami otulonymi, spawanie rurociągów elektrodami zasadowymi, spawanie rurociągów metodą GMAW. Zaprezentowano również kierunki rozwoju stali przeznaczonych na rury dużych średnic.

Przedstawiono na podstawie własnych badań własności mechaniczne rur spawanych wzdłużnie i spiralnie ze stali X52, X56, X65, a w szczególności: wpływ cykli cieplnych na własności symulowanych SWC, własności mechaniczne złączy rur spawanych, temperatury przejścia w stan kruchy.

Omówiono także badania nieniszczące rurociągów. Podano informacje dotyczące polietylenowej izolacji rur spawamych kolejno omawiając izolację rur taśmami polietylenowymi na zimno, izolację taśmami polietylenowymi na gorąco – metoda Synergy, polietylenową izolację rur metodą wytłaczania, izolację rur metodą spiekania proszku polietylenowego, izolację rur metodą wytłaczania polietyleniu w formie rękawa, izolację metodą wyciskania taśmy polietylenowej owijającej rurę.

## MANUFACTURE OF TUBES AND PIPELINES FOR LIQUID FUEL

#### Summary

Steel grades for liquid fuel pipelines have been discussed. Weldability of these steels has been presented in detail, and in particular: hot and cold cracking proneness, tendency to brittle fracture and other cracks affecting weldability.

Submerged arc welding of large diameter tubes have been presented including: longitudinal submerged arc welding, spiral submerged arc welding of tubes, welding heads' position, the effect of flux upon the weld shape, wires and fluxes to submerged arc welding of large diameter tubes and defects occurring in welded large diameter tubes. The welded tubes manufactured in Huta Ferrum have been set up.

Welding of transit gas pipelines has been discussed, and especially: circumferential welding of gas pipelines with cellulose coated electrodes, alkaline electrode pipeline welding, pipeline welding by GMAW technique. Some tendencies in the development of steels for large diameter pipelines have been presented.

Based upon own studies, mechanical properties of longitudinally and spirally welded tubes of X52, X56 and X65 have been presented, and in particular: effect of thermal cycles upon the properties of simulated HAZ, mechanical properties of tube welded joints, ductile/brittle transition temperatures.

Moreover, non-destructive tests of pipelines have been discussed. Information have been given on polyethylene isolation of welded tubes with indications concerning cold isolation of tubes with polyethylene bands, hot isolation with polyethylene bands (Synergy method), extrusion polyethylene isolation of tubes, tube isolation by polyethylene powder sintering, tube isolation with extruded polyethylene sleeve and isolation with extruded polyethylene band, coiled around a tube.

# ПРОИЗВОДСТВО ТРУБ И ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЖИДКИХ ТОПЛИВ

#### Резюме

Описываются стали предназначеные для изготовления трубопроводов для транспортирования жидких топлив. Подробно описана свариваемоцть этих сталей, то есть склонность к горячему растрескиванию и описаны также другие трещины решающие о свариваемости.

Описана сварка под флюсом труб большого диаметра, а именно: сварка под флюсом продольных швов на трубах большого диаметра, спиральная сварка труб под флюсом, установка сварочных головок, влияние флюса на форму сварочного шва, электродная проволока и флюсы для сварки под флюсом труб большого диаметра, пороки встречаемые в сварных швах на трубах большого диаметра. Сопоставлены трубы свариваемые на металлургическом заводе "Гута Феррум".

Описывается сварка транзитных газовых трубопроводов целюлозными покрытыми электродами, сварка трубопроводов основным покрытыми электродом, сварка трубопроводов методом GMAW. Указываются также направлехия развития стали предназначенных для труб большого диаметра.

На основании собственных исследований показаны механические свойства свариваемых продольным и спиральным швами труб из сталей X52, X56, X65, а в особенности: влияние термических циклов на свойства симулированных ЗТВ, механические свойства соединений свариваемых труб, температуры перехода в хрупкое состояние.

Описываются также неразрушающие испытания трубопроводов. Приводятся информации по полиэтиленовой изоляции сварных труб; описывается изолирование труб полиэтиленовыми лентами в холодном полиэтиленовыми лентами горячем состоянии. изолирование в метод сынерги, полиэтиленовое изолирование труб состоянии труб методом выдавки, изолирование методом спекания порошка, изолирование труб методом выдавки полиэтиленового изолирование выдавки полиэтиленового рукава, методом полиэтиленовой ленты обматывающей трубу.