

ASTM A387 Gr. D 極厚鋼板の溶接について

Properties of Weldment in Heavy-Section Pressure Vessel Steel Plate

広 紀 治*

Toshiharu Hiro

西 山 昇**

Noboru Nishiyama

坪 井 潤一郎***

Junichiro Tsuboi

Synopsis:

Characteristics of joints welded by a submerged arc and an electroslag process are examined using 200 mm thick plate specified by ASTM Specifications A387, Grade D which was fabricated by Ladle-Refining-Furnace, a forging press of 6 000 t in capacity and a plate mill in Mizushima Works.

Submerged arc welding is carried out by a combination of high basic agglomerated flux and 2¼% Cr-1% Mo wire designed specially for a hydrocracker. The weldment is found to have no weld defects, homogeneous chemical composition and enough tensile strength and notch toughness to meet the requirements of ASTM Specifications.

The above combination of welding materials is also found to satisfy the requirements of ASTM Specifications A542, class 4 when the weldment is subjected to postweld stress-relief treatments under the tempering parameter ranging from 19.1×10^3 to 20.2×10^3 .

Electroslag welding is carried out by a combination of fused type flux and the above 2¼% Cr-1% Mo wire. When the weldment is quenched, tempered and stress-relieved, it showed to have excellent tensile strength and notch toughness.

1. 緒 言

最近の各種産業の拡大にともなって、圧力容器や原子炉用極厚鋼板に対する需要がますます多くなる傾向にあり、これら極厚鋼板の溶接においても、高能率で高品位が要請されることが多くなった。

本報では、石油精製関係の反応容器に広く使用

されている ASTM A387D 鋼 (2¼Cr-1 Mo 鋼) の極厚鋼板 (板厚 200mm) に対応させた溶接材料を開発し、それらを用いた溶接継手の性能について報告する。

また、サブマージアーク溶接材料については ASTM A542 Cl. 4 への転用を考慮して、熱処理条件の検討もあわせて行なったので、それについても述べる。

* 技術研究所溶接研究室

*** 技術研究所溶接研究室室長・工博

** 技術研究所溶接研究室主任研究員

Table 3 に示す。

2. 供 試 材

2-1 供試鋼板

当社水島製鉄所の ASEA-SKF プロセス(LRF) によって精錬脱ガス処理した鋼塊を鍛造、厚板圧延工程で所定の板厚にし、熱処理(焼ならし、焼もどし)を行ない、さらにその後テストクーポンを切り出し、施工時の熱間加工に相当する $930^{\circ}\text{C} \times 8\text{ h}$ 焼ならし、 $930^{\circ}\text{C} \times 6\text{ h}$ 加熱後水焼入れ、 $665^{\circ}\text{C} \times 8\text{ h}$ の焼もどしを施した鋼板を用いた。

その化学組成を Table 1 に示す。いずれの成分も ASTM 規格値を満足している。溶接後の最終熱処理($680^{\circ}\text{C} \times 37\text{ h}$ 応力除去焼鈍)を想定した場合の母材の引張および衝撃試験結果を Table 2,

2-2 溶接材料

(1) サブマージアーク溶接材料

A387D 鋼はとくに Cr, Mo 含有量が高いため溶接おれを発生しやすいので、溶接金属中の拡散性水素量を少なくする必要がある。これに対しては、十分な CO_2 ガスを発生させるようにした高塩基性焼成型フラックスの使用がきわめて有効であることがすでに明らかにされている¹⁾。ここでもこの思想にもとづき A387D 鋼用に調整した高塩基性焼成型フラックス(塩基度 $B_L=2.6$)を製作し、これと $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ の組成をもった 4.8 mm 径の心線を組合わせて使用した。Table 4 がこの共金心線の化学組成である。

電流 600A, 電圧 32V, 溶接速度 30cm/min,

Table 1 Chemical composition of plate (Thickness $t=200\text{ mm}$) (wt %)

Components	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni	Al sol.
ASTM specification	≤ 0.15	$\begin{matrix} 0.15 \\ \text{ } \\ 0.30 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0.30 \\ \text{ } \\ 0.60 \end{matrix}$	≤ 0.035	≤ 0.035	$\begin{matrix} 2.00 \\ \text{ } \\ 2.50 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0.90 \\ \text{ } \\ 1.10 \end{matrix}$			
Ladle analysis	0.13	0.24	0.60	0.013	0.010	2.40	0.92	0.05	0.03	0.001
Check analysis	Top surface	0.13	0.28	0.58	0.012	0.010	2.46	0.97	0.05	0.005
	1/4 t	0.13	0.28	0.57	0.012	0.009	2.49	0.96	0.05	0.003
	1/2 t	0.14	0.28	0.59	0.013	0.010	2.47	0.98	0.05	0.004
	3/4 t	0.14	0.29	0.60	0.014	0.011	2.48	0.98	0.05	0.004
	Bottom surface	0.15	0.29	0.59	0.013	0.011	2.47	0.97	0.05	0.004

Table 2 Mechanical properties of plate (ASTM A20)

Properties		Yield strength (0.2% off set) (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
ASTM Specification		≥31.6	52.7~70.3	≥18	≥45
Sampling position	1/4 t	42.8	57.2	30	78
		42.8	57.2	29	78
	1/2 t	42.5	57.3	28	76
		42.6	57.2	28	76

Stress relieving condition: $680^{\circ}\text{C} \times 37\text{ h}$, heating and cooling rate 48°C/h

Table 3 Charpy impact properties of plate (JIS Z2202-4)

Sampling position	Direction of specimen	vE_{20} (kg·m)		vT_{18} (°C)
		Individual value	Mean value	
1/4 t	L	25.7	23.5	-29
		20.7		
		24.1		
	C	25.2	25.0	-34
		23.7		
		26.2		

Stress relieving condition: 680°C × 37h, heating and cooling rate 48°C/h

Table 4 Chemical composition of welding wire (wt %)

Diameter (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
4.8 & 3.2	0.13	0.24	0.60	0.013	0.010	2.40	0.92

Table 5 Chemical composition of submerged arc all deposited metal (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.08	0.32	0.69	0.015	0.010	2.50	0.99

Table 6 Mechanical properties of submerged arc all deposited metal

Tensile properties				Absorbed energy (kg·m)		
Yield strength (0.2% off set) (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	vE_{20}	vE_0	vE_{-20}
47.2	60.1	27	73	20.40	18.64	9.30
46.8	59.8	28	73	21.21	21.08	2.60
(47.0)	(60.0)	(28)	(73)	20.99	15.24	9.58
				(20.9)	(18.3)	(7.2)

Stress relieving condition: 615°C × 10h + 691°C × 36h, heating and cooling rate 50°C/h (Tempering parameter 20.8×10^3)

層間温度200°~250°Cの条件で溶接した全溶着金属の化学組成と機械的性能を、それぞれ **Table 5**, **Table 6**に示す。化学組成のうち Si, Cr, Moはフラックスからも少量添加されるようにしたので、心線中のそれらの含有量よりも増加している。衝撃試験における 0°C の吸収エネルギー vE_0 は

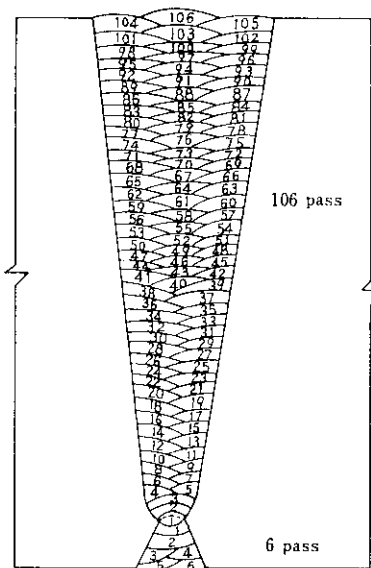
18.3kg·m で、非常にすぐれたじん性を有している。

(2) エレクトロスラグ溶接材料

エレクトロスラグ溶接材料には熔融型フラックス KF-100 と 3.2mm 径の **Table 4** に示した共金心線を組合わせて使用した。

Table 7 Welding conditions of submerged arc welding process

Pass No.	Diameter (mm)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (J/cm)	Preheating and interpass temperature (°C)
1	4.8	500	26	20	39 000	200~260
2		550	33	35	31 000	
3~7		600	33	30	39 600	
8~103		700	34	30	47 600	
104~106		600	33	30	39 600	
Back tip side	1	600	33	30	39 600	
	2~6	650	33	32	40 200	

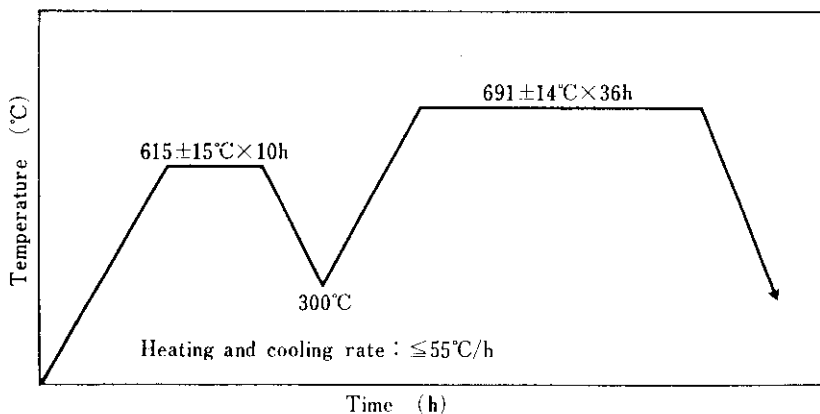
**Fig.1** Submerged arc welding pass sequence

3. サブマージアーク溶接継手

3.1 溶接条件と熱処理条件

Table 7 および **Fig. 1** に示す溶接条件と果層方法でサブマージアーク溶接を行なった。初層溶接では高温われを防止するため電流、電圧、速度を低めに制限した。

溶接後の応力除去焼鈍は、水島製鉄所極厚鋼板処理工場の熱処理炉を用いて **Fig. 2** に示すプログラムで行なった。

**Fig. 2** Diagram of stress relieving on submerged arc weldment

3・2 試験結果

3・2・1 マクロ組織

サブマージアーク溶接部のマクロ組織は **Photo. 1** のようであり、スラグまき込み、ブローホール、われなどの溶接欠陥が皆無で良好な溶接部が得られた。

3・2・2 常温継手引張試験

板厚を5等分して JIS Z3121 1号継手試験片を採取し、室温で試験を行なった。その結果が **Table 8** であり、板厚方向のどの位置でも ASTM 規格値を満足し、鋼板、溶接材料ともに十分な引張特性を有している。

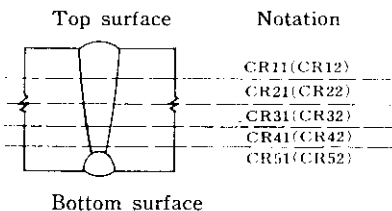


Photo. 1 Macrostructure of submerged arc weldment

Table 8 Results of tensile test for submerged arc butt weld joint

Notation	Tensile strength (kg/mm ²)		Location of rupture
	Individual value	Mean value	
ASTM specification	52.7~70.3		
C R 11	60.8	60.5	Base metal
C R 12	60.1		Base metal
C R 21	61.4	62.0	Base metal
C R 22	62.6		Base metal
C R 31	62.3	62.8	Base metal
C R 32	63.3		Base metal
C R 41	64.8	63.9	HAZ
C R 42	63.0		Weld metal
C R 51	63.2	63.4	HAZ
C R 52	63.6		HAZ

Stress relieving condition: 615°C × 10h + 691°C × 36h, heating and cooling rate ≤ 55°C/h



3・2・3 高温引張試験

板厚方向の1/4t, 3/4t (t:板厚)の溶接金属部から Fig. 3 に示す形状の引張試験片を採取し、オートグラフを用いて常温, 400, 430, 450, 480°C で短時間高温引張試験を行なった。その結果が Fig. 4 であり、試験温度 450°C での

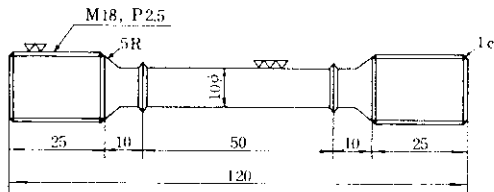


Fig. 3 Dimensions of high temperature tensile test specimen

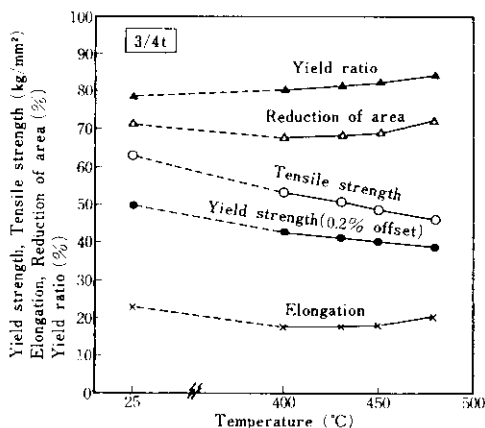
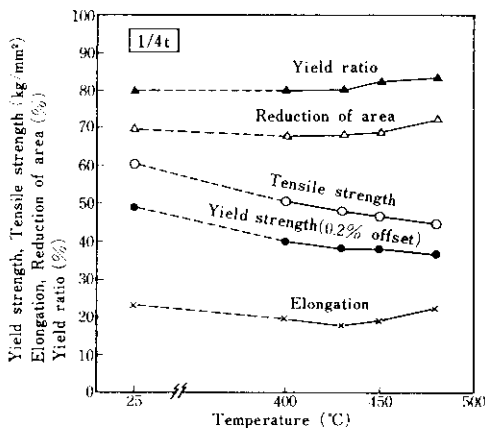


Fig. 4 Results of high temperature tensile test for submerged arc weld metal

引張強さの目標値 40kg/mm² を 6~8kg/mm² 上まわり、かなりの余裕が認められた。

3・2・4 シャルピー衝撃試験

Table 9 に示すような板厚方向の5位置からシャルピー試験片を採取し、溶接金属、ボンド部および熱影響部中央の衝撃特性を調べた。ノッチ位置で比較すると、溶接金属の吸収エネルギーが低い、板厚方向ではどの位置でも 20°C における吸収エネルギー vE_{20} が 8~15kg・m であり、ASME Section VIII Division 1 の規格値 2.8kg・m よりもかなり高い値を示した。ボンド部の vE_{20} も板厚方向の位置に関係なく 19kg・m 以上であった。その破面遷移温度 vT_{rs} は、ボトム側表面では溶融線の傾きが大きく、試験片中の熱影響部の混入割合が多くなるため -33°C となったが、ほかの位置では約 -20°C であった。これに対して母材の vT_{rs} は板厚効果により表面部は -50°C, 1/4t, 1/2t 位置では -28°C であり、ボンド部のそれは約 10°C 高温側に遷移して若干脆化していることがわかる。熱影響部中央は組織が微細化され vT_{rs} は表面部を除き母材のそれより約 10°C 低温側に遷移し、溶接の熱サイクルによってじん性が改善されている。

3・2・5 曲げおよびかたさ試験

曲げ試験として自由曲げと側曲げを行なった。前者では板厚方向の5位置から板厚30mm, 板幅45mmの試験片を採取した。試験結果はTable 10 に示すように、欠陥の発生がなく 180 度まで曲がり、そのときの溶接金属の伸び率は32~46%となってすぐれた曲げ延性を示した。後者では全板厚200mm の試験片で試験を行なったが、Photo. 2 にその外観を示すように変形時の欠陥発生は皆無であった。

溶接継手部の断面かたさを表面 2mm, 1/4t, 1/2t, 3/4t および裏面 2mm の位置で測定した。ボンドの硬化部は応力除去焼鈍により消失し、そのかたさは $H_v170\sim220$ の範囲にあり、相対的に溶接金属のかたさのほうが高い値を示した。この傾向は板厚方向のどの位置でも同様であった。

Table 9 Results of Charpy test for submerged arc weldment (JIS Z 2202-4)

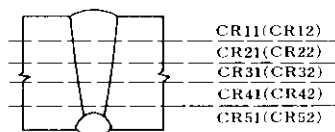
Sampling position	Location of notch	+20°C		0°C		-20°C		-40°C		vT_{rs} (°C)
		Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	
Top surface 2 mm	W.M. center	6.30	30	3.88	65	4.84	80	1.29	95	+ 9
		9.64	35	6.24	65	7.30	70	0.91	95	
		9.18	35	4.84	70	4.88	70	0.95	95	
	Bond	(8.4)	(33)	(5.0)	(67)	(5.7)	(73)	(1.1)	(95)	-21
		20.03	0	19.58	0	3.50	80	2.31	95	
		21.35	0	4.26	60	7.78	65	2.69	95	
	HAZ center	19.89	0	18.00	10	18.64	0	1.66	95	-37
		(20.4)	(0)	(13.9)	(23)	(10.0)	(48)	(2.2)	(95)	
		19.98	0	19.80	0	19.01	0	12.64	70	
1/4 t	W.M. center	19.08	0	19.66	0	18.70	0	10.32	55	+ 7
		20.99	0	20.31	0	19.34	0	10.82	45	
		(20.0)	(0)	(19.9)	(0)	(19.0)	(0)	(11.3)	(57)	
	Bond	18.95	0	20.21	0	4.50	70	2.57	80	-13
		17.81	10	19.27	0	4.54	70	4.50	80	
		19.34	0	18.00	0	5.82	75	1.49	90	
	HAZ center	(18.7)	(3)	(19.2)	(0)	(5.0)	(72)	(2.9)	(83)	-39
		19.58	0	18.26	0	18.64	5	6.34	55	
		18.76	0	19.54	0	19.39	0	7.46	55	
1/2 t	W.M. center	19.54	0	13.39	0	18.95	0	6.98	50	+ 8
		(19.3)	(0)	(17.1)	(0)	(19.0)	(2)	(6.9)	(53)	
		11.30	30	7.14	65	3.84	90	0.79	95	-23
	Bond	12.04	35	6.66	65	2.11	90	1.08	90	
		11.46	30	5.34	60	1.12	90	1.61	95	
	HAZ center	(11.6)	(32)	(6.4)	(63)	(2.4)	(90)	(1.2)	(93)	-42
		18.39	5	19.71	0	18.57	0	3.22	85	
		20.08	0	18.07	0	6.76	70	4.54	85	
3/4 t	W.M. center	19.89	0	19.54	0	6.14	65	5.08	85	+ 5
		(19.5)	(2)	(19.1)	(0)	(10.5)	(45)	(4.3)	(85)	
		18.64	0	17.69	0	19.98	10	15.02	40	-28
	Bond	18.64	0	17.52	0	14.56	30	13.44	45	
		20.21	0	18.00	0	7.46	55	6.14	60	
	HAZ center	(19.2)	(0)	(17.6)	(0)	(14.0)	(32)	(11.5)	(48)	-40
		14.20	20	6.04	75	4.02	90	0.75	95	
	Bond	17.50	5	7.61	60	1.57	90	1.18	95	+ 3
		11.18	10	8.12	55	3.41	90	1.37	95	
Bottom surface 2 mm	W.M. center	(14.3)	(12)	(7.3)	(62)	(3.0)	(90)	(1.1)	(95)	
	Bond	21.03	0	13.44	20	8.74	55	3.50	90	-28
		19.80	0	19.62	0	6.34	35	1.53	90	
	HAZ center	20.21	0	21.72	0	19.76	0	3.74	85	-40
		(20.3)	(0)	(18.3)	(7)	(11.6)	(30)	(2.9)	(88)	
		19.48	0	19.39	0	19.89	0	7.04	50	+ 3
	Bond	18.89	0	19.54	0	14.20	0	9.18	60	
		18.20	0	18.32	0	19.58	0	11.52	45	
Bottom surface 2 mm	W.M. center	(18.9)	(0)	(19.1)	(0)	(17.9)	(0)	(9.2)	(52)	-33
	Bond	12.98	10	6.08	60	2.74	90	0.99	95	
		16.74	0	4.46	60	1.90	90	0.79	95	< -40
	HAZ center	15.08	10	5.34	60	3.64	90	0.99	95	
		(14.9)	(7)	(5.3)	(60)	(2.8)	(90)	(0.9)	(95)	
	Bond	20.03	0	20.53	0	8.06	60	1.74	90	-33
		19.89	0	19.21	0	18.00	5	14.38	20	
		18.07	5	15.96	5	14.32	20	4.46	80	
Bottom surface 2 mm	W.M. center	(19.3)	(2)	(18.6)	(2)	(13.5)	(28)	(6.9)	(63)	< -40
	Bond	19.08	0	18.64	0	15.90	10	5.66	75	
		18.32	0	18.57	0	17.69	0	14.62	30	
	HAZ center	20.08	0	17.88	0	19.71	0	17.63	0	
		(19.2)	(0)	(18.4)	(0)	(17.8)	(3)	(12.6)	(35)	

Table 10 Results of free bend test for submerged arc weldment

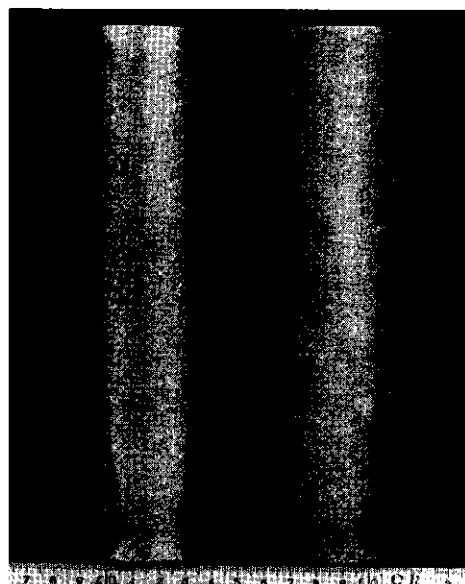
Notation	Gauge length (mm)	Elongation (%)	Judgement
C R 11	56.00	35.7	Good
C R 12	45.70	37.1	Good
C R 21	42.75	32.6	Good
C R 22	37.60	44.2	Good
C R 31	36.25	39.4	Good
C R 32	29.15	39.0	Good
C R 41	25.70	42.0	Good
C R 42	22.75	46.3	Good
C R 51	20.40	42.2	Good
C R 52	17.70	35.6	Good

Top surface

Notation



Bottom surface

**Photo. 2** Appearance of side bend test specimens of submerged arc butt weld joint

これを確認するために板厚方向の5位置における化学組成を分析した。その結果が **Table 11** であり、各位置間における成分変動は非常に小さく、ここで用いた焼成型フラックスの使用はなんら問題を生じないことがわかる。

3・2・6 溶接金属中の化学組成の変動

一般に合金成分が多い鋼板をサブマージアーク溶接する際には、合金成分を含んだ焼成型フラックスは成分偏析を生じやすいのでその使用を懸念する傾向がある。本供試溶接材料は合金元素の大部分が心線から供給され、フラックス中に添加されたものは、Si, Mn, Cr, Mo などのスラグ化による減量をおぎなう程度で上述の懸念はないが、

3・2・7 顕微鏡組織

溶接金属、ボンド近傍、熱影響部中央および母材の1/4 t の顕微鏡組織が **Photo. 3** であり、熱影響部中央は非常に微細化された組織を示し、シャルピー衝撃試験の吸収エネルギーが高い理由のひとつになっていると考えられる。板厚方向の組織の差は見られない。

Table 11 Chemical composition of submerged arc weld metal (wt %)

Sampling position	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Al _{sol.}	Al _{insol.}	N
Top surface	0.075	0.50	0.86	0.016	0.006	2.52	1.16	0.22	0.009	0.002	0.011
1/4 t	0.079	0.52	0.86	0.016	0.005	2.53	1.15	0.22	0.008	0.001	0.010
1/2 t	0.083	0.48	0.83	0.015	0.006	2.52	1.11	0.21	0.009	0.002	0.010
3/4 t	0.084	0.48	0.83	0.015	0.006	2.51	1.11	0.20	0.008	0.002	0.010
Bottom surface	0.089	0.44	0.77	0.015	0.006	2.48	1.09	0.17	0.008	0.002	0.010

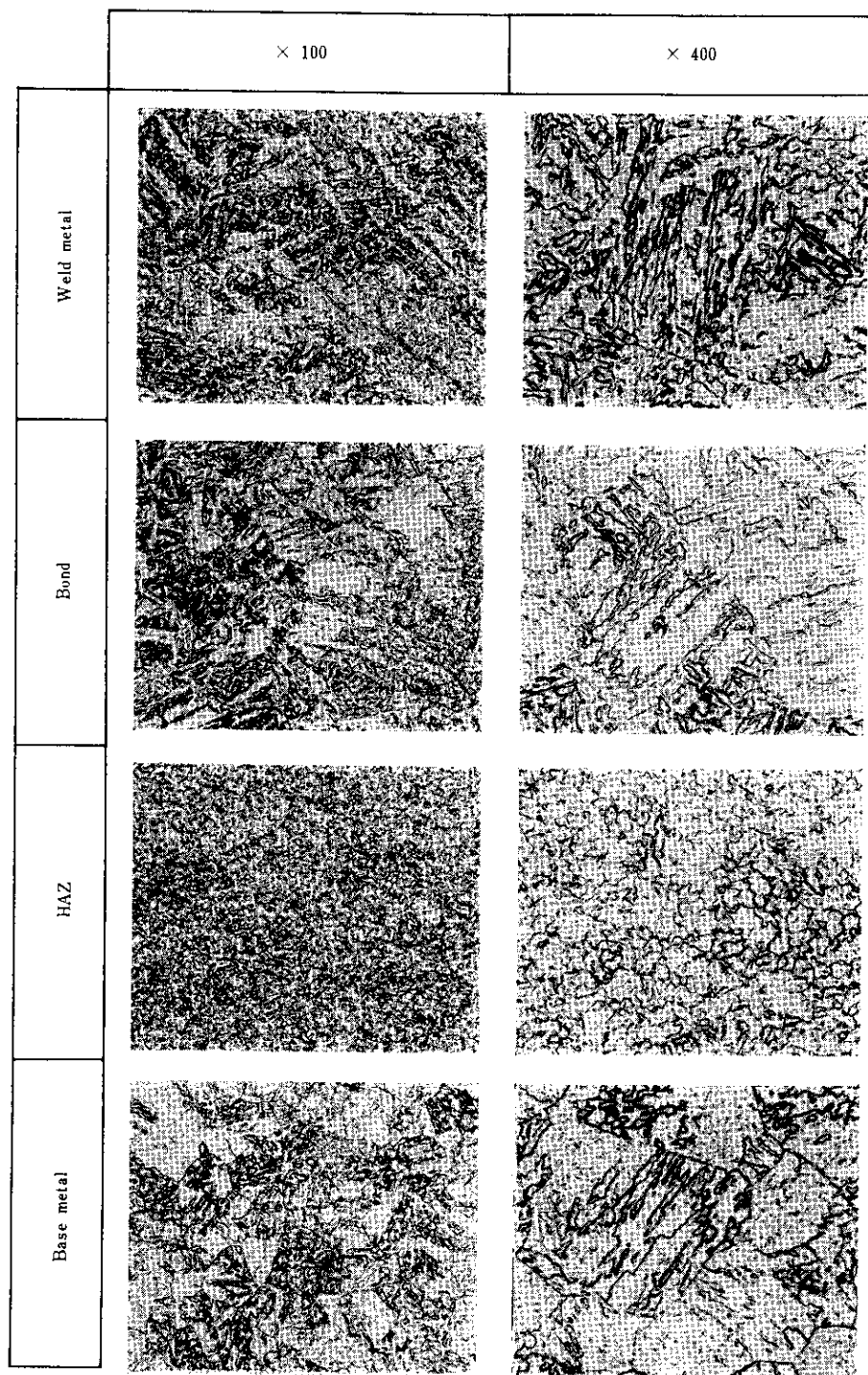


Photo. 3 Microstructures of submerged arc weld metal, bond, HAZ and base metal at 1/4 t

4. エレクトロスラグ溶接継手

4.1 溶接および熱処理条件

Table 12, Fig. 5 に示す溶接条件と開先形状で、3 電極エレクトロスラグ溶接および非破壊探傷試験を行なった結果、ビード外観は良好で内部欠陥も認められなかった。

Table 12 Welding conditions of electros slag welding process

Diameter (mm)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/h)	Preheating temperature (°C)
3.2	550~650 × 3 wire	45~55	70	100~150

溶接後 Fig. 6 に示す条件で強制水冷の焼入れ (800°C から 400°C までの 1/4 t における平均冷却速度は 44.4°C/min である)、静止水冷の焼もどし (540°C での冷却速度は 62°C/min である)、さらに応力除去焼鈍を行なった。焼もどしおよび応力除去焼鈍過程における温度と保持時間から求めた焼もどしパラメーター (T. P.) は 20.85×10^3 となった。

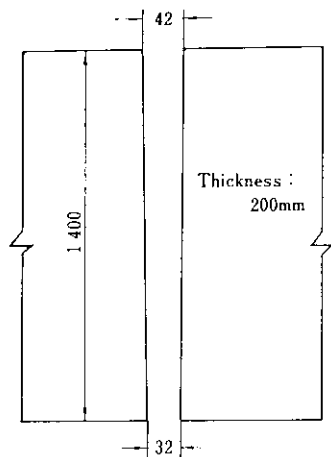


Fig. 5 Groove design of electros lag welding process

4.2 試験結果

4.2.1 マクロ組織

エレクトロスラグ溶接部のマクロ組織が Photo. 4 であり、上述の焼入れ一焼もどし一応力除去焼鈍処理を施したため、溶接金属部と熱影響部の境界に組織の不連続がなく、溶接欠陥も認められなかった。

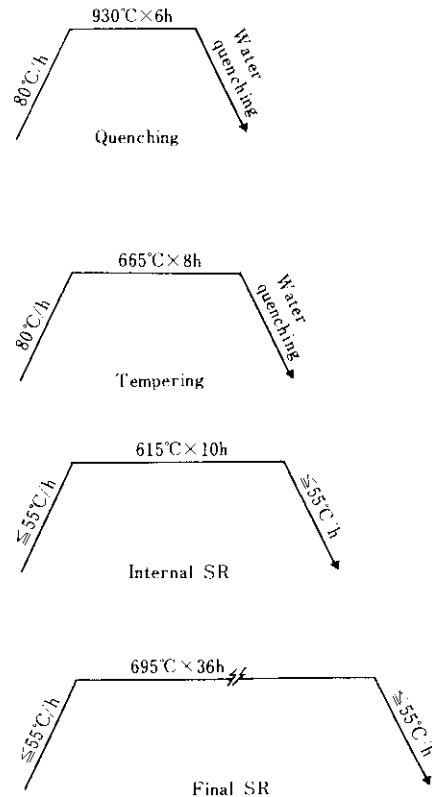


Fig. 6 Diagram of heat treatment conditions on electros lag weldment

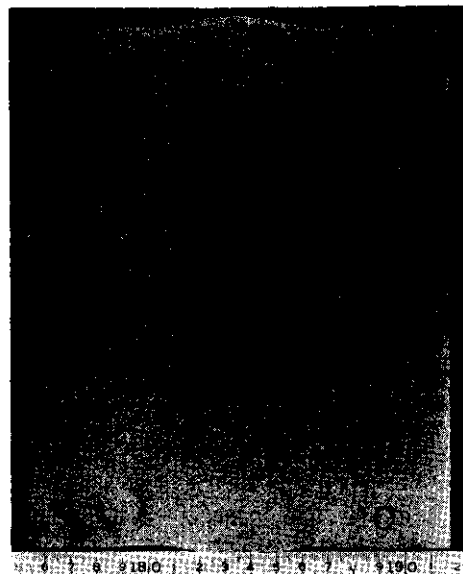


Photo. 4 Macrostructure of electros lag weldment

響部の境界に組織の不連続がなく、溶接欠陥も認められなかった。

4・2・2 常温引張試験

板厚方向の5位置から溶接金属および継手の引張試験片を採取した。溶接金属の場合は JIS A1 号試験片であり、Table 13 に結果を示すように板厚方向における差はなく、ASTM 規格値を満足した。0.2%耐力は規格値を 7kg/mm^2 上まわっているが、引張強さは $2\sim 3\text{kg/mm}^2$ 上まわる程度で下限に近い値を示した。

短ゲージの JIS 1 号試験片による継手引張試験結果を Table 14 に示す。破断位置はすべて溶接金属部で、降伏強さおよび引張強さは溶接金属のそれら (Table 3 参照) と同等であり、溶接金属の幅が広いことや母材との強度差がないことなどから、塑性拘束による強度の上昇は認められな

った。

4・2・3 高温引張試験

板厚の $1/4t$, $3/4t$ において溶接線およびそれに直角方向に Fig. 3 に示す形状の高温引張試験片を採取して、オートグラフで短時間高温引張試験を行なった。Table 15 がその結果であり、すべて規格値を満足し、採取方向および位置による特性値の差は見られなかった。 430°C での試験結果を母材のそれと比較すると、0.2% 耐力は 88%, 引張強さは 84% に低下している。

4・2・4 シャルピー衝撃試験

板厚方向の5位置からシャルピー試験片を採取し、溶接金属、ボンド部および熱影響部のじん性

Table 13 Results of tensile test for electroslag weld metal (JIS Z3111-A1)

		Yield strength (0.2% off set) (kg/mm^2)	Tensile strength (kg/mm^2)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
ASTM Spec.		≥ 31.6	52.7~70.3	≥ 18	≥ 45
Sampling position	Top surface	38.7	55.4	31	75
	$1/4 t$	39.8	54.6	29	73
	$1/2 t$	39.2	54.6	31	73
	$3/4 t$	39.5	54.9	31	74
	Bottom surface	39.0	55.8	31	73

Table 14 Results of tensile test for electroslag weld joint (JIS Z3121-1)

		Yield strength (kg/mm^2)	Tensile strength (kg/mm^2)	Location of rupture
ASTM Spec.		≥ 31.6	52.7~70.3	
Sampling position	Top surface	39.5	55.3	Weld metal
		38.0	54.1	Weld metal
	$1/4 t$	41.2	55.5	Weld metal
		40.4	55.4	Weld metal
	$1/2 t$	40.1	55.4	Weld metal
		39.5	55.1	Weld metal
	$3/4 t$	42.2	55.6	Weld metal
		41.9	56.0	Weld metal
	Bottom surface	41.6	56.0	Weld metal
		41.5	55.0	Weld metal

Table 15 Results of high temperature tensile test for electroslag weldment

Sampling direction	Sampling position	Test temperature (°C)	Yield strength (0.2% off set) (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Parallel to welding direction	1/4 t	400	35.2	47.4	20.3	69.6
		430	34.8	46.1	21.1	70.2
	3/4 t	400	35.2	47.4	20.1	69.4
		430	34.7	46.1	20.4	70.0
Transverse to welding direction	1/4 t	400	35.0	47.1	19.4	69.0
		430	33.4	45.5	20.1	70.1
	3/4 t	400	35.0	47.1	19.3	69.4
		430	34.3	45.8	20.4	69.6

を調査した結果を **Table 16** に示す。-20°C における吸収エネルギー vE_{-20} で比較すると、最低値は熱影響部の1/4 t 位置であられ、12.8kg・m であった。溶接部はすぐれたじん性を有しているが、200mmの極厚材であるために焼入れ時に板厚効果があらわれ、中心部の吸収エネルギーが相対的に低くなっている。この傾向は熱影響部に顕著にあらわれた。

4.2.5 曲げ試験およびかたさ分布

板厚方向の5位置から板厚30mm、板幅45mmの自由曲げ試験片を採取し、試験した結果を **Table 17** に示す。すべて密着まで曲がり、伸び率も49.3%以上あり、非常にすぐれた曲げ特性を示した。

また、全厚200mmの側曲げ試験を行ない、180度変形まで欠陥が発生しないことを確認した。そ

Table 17 Results of free bend test for electroslag weldment

Sampling position	Elongation (%)	Judgement
Top surface	54.8	Good
1/4 t	49.3	Good
1/2 t	52.7	Good
3/4 t	53.1	Good
Bottom surface	59.6	Good

の外観を **Photo. 5** に示す。

断面かたさをビッカースかたさ計（荷重 10kg）で表面 3 mm, 1/4 t, 1/2 t, 3/4 t および裏面 3 mmの位置で測定したが、熱処理後（焼入れ—焼もどし—応力除去焼鈍）であるため、ボンド部でのかたさ上昇や、測定位置による変化がなく、すべて Hv で160 前後であった。

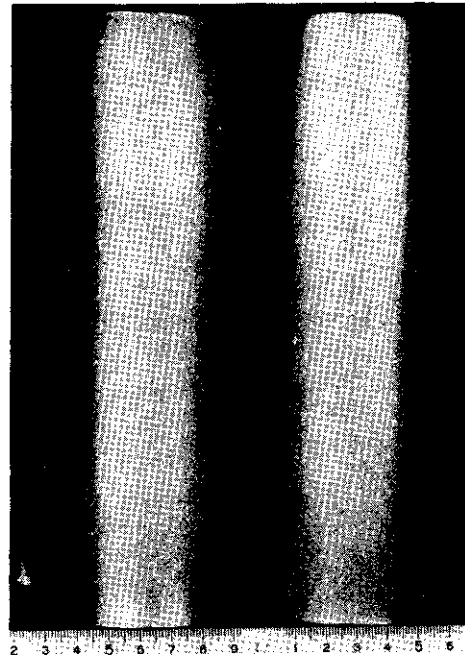
**Photo. 5** Appearance of side bend test specimens of electroslag weld joint

Table 16 Results of Charpy test for electrosag weldment (JIS Z2202 4)

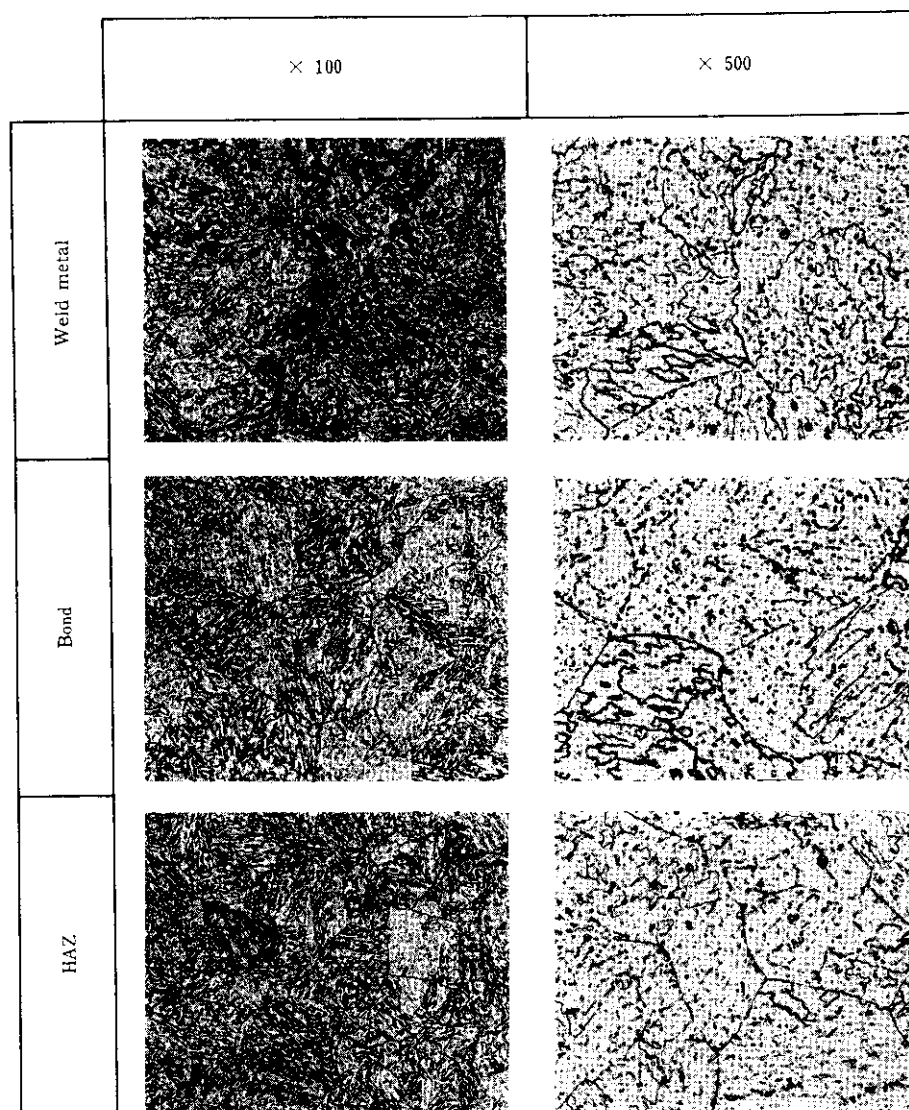
Sampling position	Location of notch	+20°C		0°C		-20°C	
		Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)
Top surface 2 mm	W.M. center	16.42	0	17.18	0	16.36	0
		17.38	0	16.99	0	17.18	0
		17.81	0	17.94	0	16.49	0
	Bond	(17.2)	(0)	(17.4)	(0)	(16.7)	(0)
		22.29	0	22.48	0	21.44	0
		21.96	0	23.25	0	20.58	10
	HAZ (bond 2 mm)	22.11	0	22.06	0	23.34	0
		(22.1)	(0)	(22.6)	(0)	(21.8)	(3)
		21.44	0	20.76	0	20.99	0
		22.62	0	22.48	0	19.98	0
		21.81	0	20.53	0	23.50	0
		(22.0)	(0)	(21.3)	(0)	(21.5)	(0)
1/4 t	W.M. center	19.76	0	19.62	0	19.98	0
		19.66	0	18.45	0	17.44	20
		19.01	0	18.45	10	18.95	15
	Bond	(19.5)	(0)	(18.8)	(3)	(18.8)	(12)
		23.50	0	17.25	20	18.00	25
		23.34	0	23.58	0	24.21	0
	HAZ (bond 2 mm)	21.31	0	18.83	13	21.26	10
		(22.7)	(0)	(19.9)	(11)	(21.2)	(12)
		18.64	0	19.01	10	16.93	20
		19.71	0	20.08	0	12.80	25
		20.62	0	20.53	0	8.74	48
		(19.7)	(0)	(19.9)	(3)	(12.8)	(31)
1/2 t	W.M. center	17.44	0	17.18	10	11.64	43
		18.32	0	16.49	20	15.78	23
		18.32	0	18.89	0	16.06	20
	Bond	(18.0)	(0)	(17.5)	(10)	(14.5)	(29)
		20.71	8	22.25	0	22.06	15
		22.72	3	16.61	26	12.16	43
	HAZ (bond 2 mm)	18.64	13	22.58	0	19.34	20
		(20.7)	(8)	(20.5)	(9)	(17.9)	(26)
		19.80	0	19.89	0	15.90	30
		20.21	0	11.70	33	10.04	40
		20.67	0	16.23	20	15.90	30
		(20.2)	(0)	(15.9)	(18)	(13.9)	(33)
3/4 t	W.M. center	19.48	0	19.08	0	18.57	0
		18.95	0	16.74	10	16.87	15
		18.89	0	19.48	0	15.30	25
	Bond	(19.1)	(0)	(18.4)	(3)	(16.9)	(13)
		17.69	0	19.85	0	18.20	28
		20.03	0	19.54	10	7.08	63
	HAZ (bond 2 mm)	15.60	0	24.18	0	20.49	0
		(17.8)	(0)	(21.2)	(3)	(15.3)	(30)
		20.08	0	18.07	0	17.38	25
		21.12	0	16.49	13	14.62	28
		19.27	0	17.12	18	8.96	40
		(20.2)	(0)	(17.2)	(10)	(13.7)	(31)
Bottom surface 2 mm	W.M. center	17.18	0	17.12	0	17.74	0
		16.49	0	16.68	0	14.90	0
		17.44	0	17.31	0	16.87	0
	Bond	(17.0)	(0)	(17.0)	(0)	(16.5)	(0)
		23.67	0	21.81	0	18.83	18
		23.05	0	22.15	0	21.17	0
	HAZ (bond 2 mm)	24.26	0	22.35	0	21.40	10
		(23.7)	(0)	(22.1)	(0)	(20.5)	(9)
		23.44	0	25.78	0	18.64	18
		24.87	0	22.96	0	21.91	0
		21.35	0	21.67	0	22.43	0
		(23.2)	(0)	(23.5)	(0)	(21.0)	(6)

4・2・6 溶接金属の化学組成

溶接金属の化学組成を **Table 18** に示すが、板厚方向の各位置間における成分変動は認められ

Table 18 Chemical composition of electroslag weld metal (wt %)

Sampling position	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	V	Ti	As	Sn	Sb
Top surface	0.15	0.26	0.61	0.014	0.010	0.04	2.42	0.94	0.15	0.001	0.007	<0.005	0.004	0.002	0.005
1/4 t	0.15	0.26	0.61	0.014	0.010	0.04	2.40	0.95	0.14	0.001	0.006	<0.005	0.004	0.002	0.004
1/2 t	0.16	0.26	0.61	0.015	0.011	0.03	2.42	0.95	0.14	0.001	0.006	<0.005	0.004	0.003	0.005
3/4 t	0.16	0.26	0.59	0.015	0.010	0.03	2.42	0.94	0.14	0.001	0.007	<0.005	0.004	0.002	0.004
Bottom surface	0.15	0.26	0.59	0.015	0.010	0.04	2.42	0.95	0.14	<0.001	0.007	<0.005	0.004	0.002	0.004



ず、均質な溶接部が得られた。

4・2・7

顕微鏡組織

板厚中央部の溶接金属部、ボンド部および熱影響部の顕微鏡組織が **Photo. 6** である。組織はいずれも焼もどしベイナイトであり、オーステナイト粒度と比較するとボンド部がもっとも大きくなっている。板厚方向の組織の差はほとんど見られない。

Photo. 6 Microstructures of electroslag weld metal, bond, HAZ at 1/2 t

5. 応力除去焼鈍による溶接金属性能の変化

上述の試験と同じサブマージアーク溶接材料を A542 Cl. 4 へ転用することの適否を検討した。600A, 32V, 30cm/min の溶接条件で全溶着金属を作製し、Table 19 に示す焼もどしパラメーターで応力除去焼鈍を行ない、引張および衝撃特性の変化を調べた。その結果、ASTM A542 Cl. 4 の規格値を満足する熱処理条件の範囲を決定することができた。

JIS A 1 号引張試験片で求めた引張諸特性が Fig. 7 であり、A542 Cl. 4 の規格値を満足する焼もどしパラメーターの範囲は $19.1 \times 10^3 \sim 20.2 \times 10^3$ である。

2 mm V ノッチシャルピー試験片を採取して試験した 0°C の吸収エネルギー $\sqrt{E_0}$ を Fig. 8 に示す。ASME Section III における要求値である

Table 19 Heat treatment conditions on submerged arc weld metal

Holding temperature and time ($^\circ\text{C}$), (h)	Tempering parameter $T(20 + \log t)$ $T; ^\circ\text{K}, t; \text{h}$
600×4	18.0×10^3
660×25	19.9×10^3
680×39	20.6×10^3
680×110	21.0×10^3
720×38	21.4×10^3

Heating and cooling rate: 50°C/h

3 ケの平均値が $4.2\text{kg}\cdot\text{m}$ 以上、1 ケの値が $3.5\text{kg}\cdot\text{m}$ 以上を満足するための焼もどしパラメーターは 18.9×10^3 以上となる。

したがって引張および衝撃特性を同時に満足する焼もどしパラメーターの範囲は $19.1 \times 10^3 \sim$

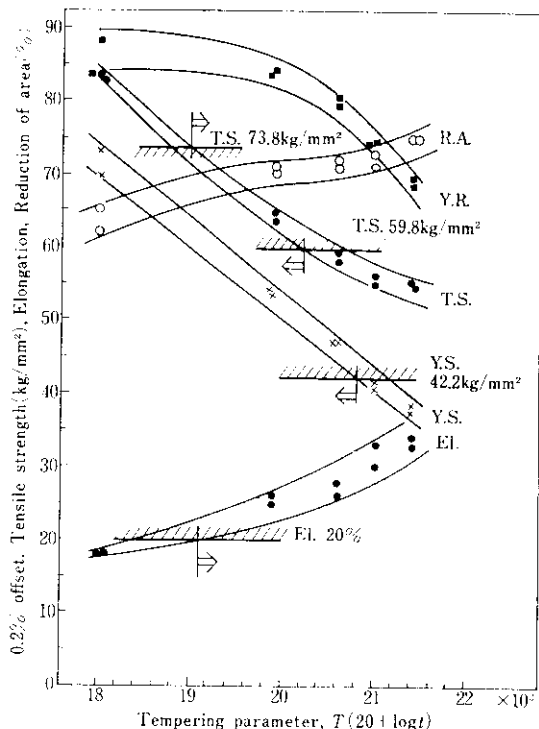


Fig. 7 Effect of tempering parameter on tensile properties

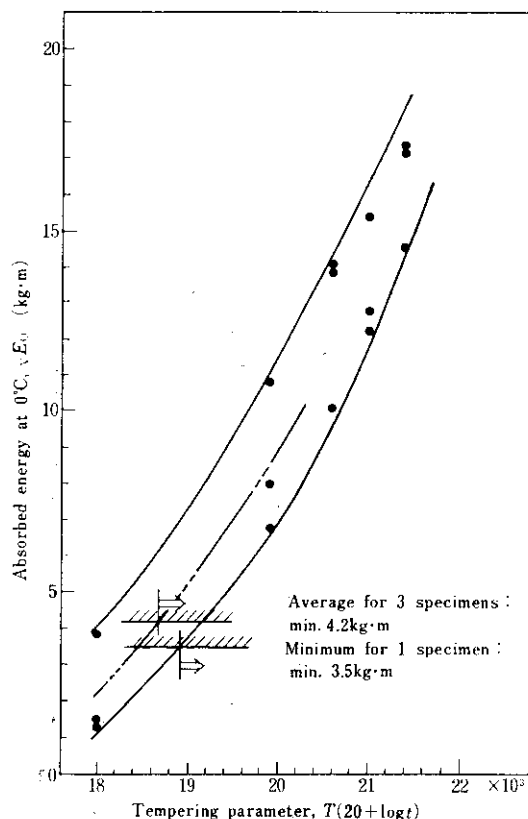


Fig. 8 Effect of tempering parameter on absorbed energy at 0°C

20.2×10^3 であり、この範囲内の応力除去焼鈍条件であれば供試溶接材料は A542 Cl. 4 への転用

も可能である。この焼もどしパラメーターの範囲を温度、時間で示すと Fig. 9 の斜線内となる。

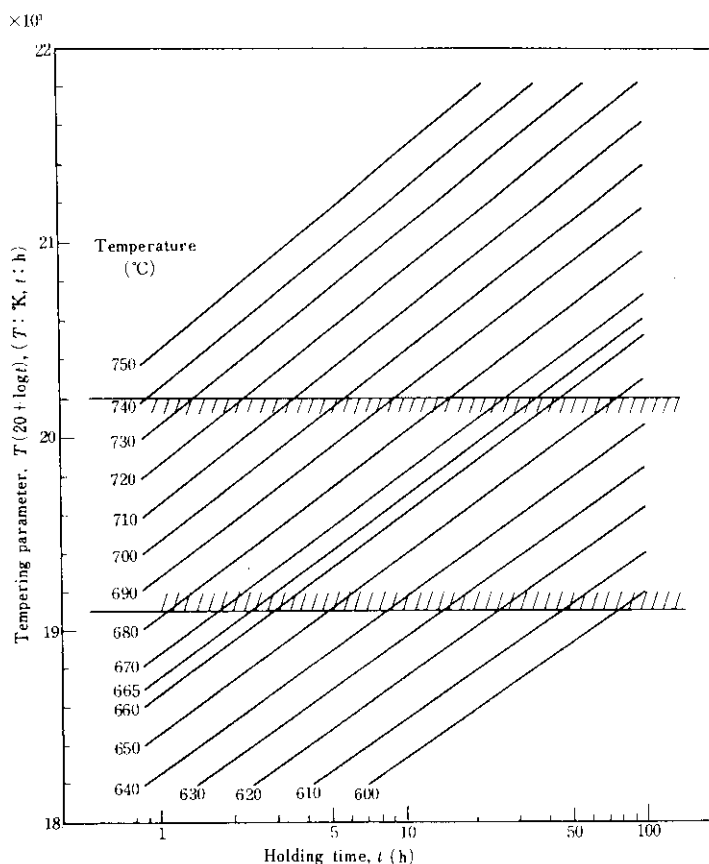


Fig. 9 Relation between holding time and tempering parameter

6. 総 括

大型鋼塊から ASTM A387D 鋼の200mm極厚鋼板を試作し、あらたに開発した溶接材料を使用して、この鋼板のサブマージアークおよびエレクトロスラグ溶接継手の性能試験を実施した。さらにサブマージアーク溶接材料については ASTM A542 Cl. 4 への転用を考慮して、熱処理条件の機械的性質におよぼす影響を調査した。

これら試験から以下のことが明らかになった。

- (1) サブマージアークの溶接材料として高塩基性焼成型フラックスと $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ の共金心線を

使用することによって欠陥のない溶接部を得ることができる。

この場合、

- a) 常温および高温引張特性は規格値を十分満足し、かなり余裕がある。
- b) 溶接金属の 20°C における吸収エネルギーは $8 \sim 15\text{kg}\cdot\text{m}$ であり、ボンドおよび熱影響部はそれ以上の値となり、非常にすぐれたじん性を供えている。
- c) 曲げ特性は自由曲げ、側曲げともすべて良好である。
- d) 断面かたさは $H_v170 \sim 220$ であり、板厚方向の差はほとんどない。

- e) 溶接金属の化学組成の変動は非常に小さく、焼成型フラックスを使用しても成分変動の懸念はまったくない。
- f) A542 Cl. 4 へ同・溶接材料を転用するためには、焼もどしパラメーターを $19.1 \times 10^3 \sim 20.2 \times 10^3$ の範囲内で応力除去焼鈍を実施すればよい。
- (2) エレクトロスラグ溶接は熔融型フラックス KF-100 と $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ の共金心線を使用すれば化学組成も均質な欠陥のない溶接部が得られる。
- この場合、
- a) 溶接金属に本実験の熱処理条件を与えると
- 常温および高温引張特性は規格値を満足するがやや低めになる。
- b) -20°C における吸収エネルギーはその最低値が板厚中央の熱影響部で $12.7\text{kg}\cdot\text{m}$ となり、非常にすぐれたじん性を示す。
- c) 曲げ特性は自由曲げ、側曲げともにまったく問題がなく良好である。
- d) 断面かたさは Hv 160 前後で、板厚方向の差もない。
- 本実験のエレクトロスラグ溶接および非破壊探傷試験は石川島播磨重工業㈱、技術研究所溶接センター河野武亮課長はじめ同所各位に実施していただいた。ここに記して深甚な謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 坪井、寺嶋：アーク溶接過程における水素の挙動（第4報）、溶接学会誌、42（1973）6、38