ラメラテア感受性評価法について*

平 井 征 夫** 坪 井 潤一郎**

Assessment of the Susceptibility to Lamellar Tearing
in Welded Structural Steels*

by Yukio Hirai** and Junichiro Tsuboi**

The attempts was conducted to develop the testing procedure which provided a quantitative assessment of lamellar tearing susceptibility on the basis of its occurrence mechanism. Several lamellar tearing tests, in which the constant strain test proposed by authors was included, were carried out on different types of Al-killed steels, and the physical meanings of their criteria were discussed.

Using the constant strain test, the critical strain levels which need to the decohesion cracking and hydrogen-induced one from non-metallic inclusions are determined respectively, and the causes of lamellar tearing will be able to be clarified for individual plate. The value of reduction of area in a through-thickness tensile test will be considered to have comparatively good correlation with the cracking from MnS inclusions, whereas the value will not correlate with the lamellar tearing when it is induced from oxide inclusions at the sub-surface of plate.

The difference between the susceptibility to root crack in a roll direction and that in a through-thickness direction was apt to increase with the rise of the lamellar tearing susceptibility.

Microanalyses by EPMA showed that the inclusions playing a significant role for the cracking were found to be sulfide for Al-killed steels with more than 0.01 %S, alumina for those with less than the level.

1. 緒 言

海洋構造物などでは溶接時に発生するラメラテアが使用中に疲労または脆性破壊によって拡大する可能性が大きいのでこの方面の研究が盛んに進められている¹⁾²⁾。著者らは A E 法を用いてラメラテアの発生要因について検討し、つぎの 3 種類の発生・伝播機構があることを明らかにした³⁾。すなわち、溶接直後の収縮歪による介在物と地との間の decohesion を起源とし、水素によってこれらが連なるもの (Type I)、収縮歪による decohesion でテフス部を生じ、さらに剪断力によってウォール部を生成して連なるもの (Type II)、およびルートまたはトウなどから発生した水素割れが鋼板表面に沿って介在物を通り成長する遅れ割れ形式のもの (Type III) が存在する。

一方、ラメラテアの評価法には板厚方向の引張試験⁴⁻⁸⁾、シャルピー試験、ブロード試験および slice bend test⁹⁾ など材料試験的なものと Z 窓枠拘束割れ試験¹⁰⁾、Lehigh lamellar tearing test⁸⁾、Cranfield test^{5,6)} など実際に溶接して評価するものがある。一般

に、前者の試験は簡単であるが上述の 3 機構のうち評価できるのは Type II のみで水素の寄与を含まない欠点があり、後者は一応 3 機構を評価できるが試験法として手間がかかり、再現性の点で前者に劣ると考えられる。

ここでは、各種の Al-キルド鋼を用いてこれらの試験法の比較を行ないそれぞれにおける限界値の意味を考察した。

2. 供 試 材 料

供試鋼は Table 1 に示す 21 種類のキルド鋼で、SM 50 を主体に SM 41 から HT 80 まで含んでいる。

鋼板 5L は LRF 製¹¹⁾で板厚方向特性のよいものである。5L, 5M, 5A, SM 41 は希土類元素 (RE) または Ti 添加で硫化物を粒状化したもので、5A は P_{CM} 値も低い特長を持っている。A6, A7 は同一スラブ材で、前者は多数の超音波欠陥部 ($25\% < F_1/B_1 < 50\%$) を含んでいる。

3. ラメラテア試験方法とその結果

すでに提案されているラメラテア感受性評価法のうち板厚方向引張試験、Z 窓枠拘束割れ試験、立板入り小形割れ試験¹²⁾と新しく考案した定歪式ラメラテア試験を行った。

*原稿受付 昭和 51 年 3 月 18 日 (昭和 50 年度春季全国大会にて発表)

**正 員 川崎製鉄(株)技術研究所 Member, Research
Laboratoris, Kawasaki Steel Corporation

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of steels.

Plate	Chemical compositions, wt %								Mechanical properties				
	C	Si	Mn	P	S	Al	O	Other elements	P _{CM}	Ceq	T.S. kg/mm ²	Y.P. kg/mm ²	El. %
43 C	0.19	0.42	1.44	0.014	0.014	0.030	0.0020		0.276	0.45	57	37	32
'S L*	0.19	0.42	1.42	0.009	0.004	0.023	0.0022		0.275	0.44	56	35	36
S I	0.18	0.39	1.45	0.018	0.007	0.027		Ce:0.005	0.266	0.44	56	36	34
K5D	0.18	0.33	1.37	0.016	0.013	0.033	0.0017		0.260	0.42	57	40	32
S G	0.17	0.36	1.52	0.032	0.009	0.023	0.0025		0.258	0.44	57	36	27
'S H	0.16	0.26	1.26	0.018	0.008	0.031	0.0019		0.232	0.38	49	33	30
40 C	0.14	0.42	1.44	0.021	0.020	0.030	0.0018		0.226	0.40	52	35	30
S C*	0.15	0.32	1.30	0.006	0.011	0.023	0.0013		0.226	0.38	51	36	28
S E*	0.14	0.40	1.32	0.006	0.011	0.023	0.0025		0.219	0.38	52	35	25
S F	0.14	0.40	1.32	0.019	0.020	0.027	0.0020		0.219	0.38	51	34	31
S K	0.14	0.26	1.27	0.019	0.008	0.036	0.0016		0.213	0.36	49	32	29
S B*	0.13	0.35	1.21	0.005	0.009	0.022	0.0026		0.203	0.35	48	33	28
S D*	0.14	0.35	1.22	0.005	0.009	0.022	0.0028		0.213	0.36	50	35	29
S M	0.12	0.27	1.49	0.016	0.003	0.033		Ce 0.018 B 0.0025	0.204	0.38	51	36	27
S J	0.13	0.33	1.20	0.020	0.008	0.027	0.0030		0.201	0.34	51	37	26
35 C	0.11	0.40	1.28	0.012	0.011	0.032	0.0024		0.187	0.34	48	32	30
S A	0.08	0.35	1.40	0.016	0.004	0.027	0.0023	Ti 0.023 Cu 0.21 Ni 0.22	0.158	0.32	48	37	32
SM41	0.14	0.21	1.13	0.016	0.006	0.031	0.0032	Ce:0.005	0.204	0.34	46	30	41
A6	0.12	0.34	1.35	0.018	0.008	0.036	0.0025	Ni:0.51	0.218	0.42	63	53	30
A7	0.12	0.34	1.36	0.018	0.007	0.036	0.0020	Mo:0.13	0.218	0.42	63	53	30
HT80	0.12	0.34	0.95	0.008	0.006	0.076	0.0015	Ni:0.98 Cr:0.53 Mo:0.49	0.292	0.55	85	80	25

* LRF Process

Ceq = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14

P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10+5B

3. 1 板厚方向引張試験

試験板を中央にはさんで被覆アーク溶接した継手から試験片 (直径 12.5 mm) を採取し, 溶接のままの状態 で引張試験を行なった. Table 2 がその結果であり, 5F, 40C, K5D, 5E, 5C, 5D, 43C のように絞り値 (R.A.)_Z が20%以下のものから 5L のように約70%のものまで幅広い特性値を示した. これらの破断位置は板厚中央部が多く, ラメラテアの発生位置に相当する表面直下の場合は少なかった.

3. 2 Z 窓枠拘束割れ試験

Fig. 1 がその試験片形状を示すものであり, 拘束度は試験片にスリットを設けて変化させた. ルート割れ防止のために初層溶接のみは 150°C に予熱したが, 1 部の鋼板には, この予熱温度でも微小なルート割れが認められた. HT 50, 60, 80 鋼にはそれぞれの強度に適合しかつ水素量が約 3, 2, 1.5 ml/100 g (改正 JIS 法, 20°C, 60%雰囲気) の溶接棒を用いて, 170 A-24 V-15 cm/min, パス間時間30分の条件で多層溶接した.

Fig. 1 The through thickness restraint cracking test.

Table 2 Results of the through thickness tensile test and the constant strain lamellar tearing test.

Plate	Through thickness tensile test				Constant strain lamellar tearing test	
	T.S. Kg/mm ²	Y.P. Kg/mm ²	El. %	R.A. %	(ϵ_c) _D	(ϵ_c) _H
43c	56.3	38.5	13.0	13.8	4.5	<0.75
5L	54.8	38.6	28.2	70.6	>6	>6
5I	54.7	47.8	11.1	25.8	<0.75	<0.75
K5D	49.5	35.6	5.5	7.7	3	<0.75
5G	58.8	49.7	17.2	40.4	>6	3
5H	50.9	35.2	16.6	34.8	6	4.5
40C	51.2	36.8	7.4	5.5	3	<0.75
5C	48.4	38.6	7.8	12.0	4.5	>6
5E	49.0	41.4	7.0	9.2	3	1.5
5F	41.0	33.5	4.2	2.9	<0.75	<0.75
5K	50.8	33.7	16.7	41.7	6	>6
5B	48.8	33.8	19.2	42.6	>6	>6
5D	49.8	42.4	8.8	12.8	4.5	>6
5M	46.5	35.7	13.1	35.9	<0.75	6
5J	50.4	33.8	15.6	41.7	>6	6
35C	51.3	36.6	14.3	21.0	>6	>6
5A	48.1	40.8	22.6	60.0	<0.75	6
SM41	43.0	28.8	26.0	42.5	>6	>6
A6	63.5	52.7	20.2	48.2	<0.75	<0.75
A7	62.0	51.6	12.2	33.4	<0.75	<0.75
HT80	85.0	78.4	20.0	62.0	>6	>6

Table 3 Results of the through thickness restraint cracking test.

	Through thickness restraint cracking test			
	Sectional crack %			
	each		mean	Remarks
43C	1	21.0	22.5	root crack
	2	4.5		lamellar tear
	3	59.2		toe crack
	4	11.9		
	5	16.3		
	6	3.3	3.3	100°C interpass
	7	0	0	150°C interpass
5I	1	2.9	2.1	lamellar tear
	2	1.3		
K5D	1	0	4.2	root crack
	2	0		lamellar tear
	3	12.5		
40C	1	9.5	7.3	root crack
	2	9.6		lamellar tear
	3	2.9		toe crack
	4	10.0	5.7	restraining plate 35mm
	5	3.7		
	6	3.4		
5E	1	5.4	2.7	root crack
	2	0		
	3	2.9		
5F	1	35.7	48.6	root crack
	2	55.0		lamellar tear
	3	55.4		
	4	0	0	low restraint (slit length 130 mm)
	5	0		
	6	0		
	7	1.3	1.3	150°C interpass
8	0	0	200°C interpass	
A6	1	1.3	2.0	restraining plate 50mm
	2	2.9		lamellar tear
	3	2.0		
A7	1	0	4.0	restraining plate 50mm
	2	7.1		lamellar tear
	3	5.0		
5L				
5G				
5C	1	0	0	
5D	2	0		
35C	3	0		
HT80				

Table 3 が試験結果であり、鋼板 5F, 43C, 40C, K5D, A7, A6, 5E, 5I にラメラテアが発生した。これらの始点は Photo. 1 に示すように(a)ルート割れ、(b)トウクラックおよび(c)鋼板中の介在物の3者があり、(a)の場合が最も多かった。

ラメラテア感受性が最大の 5F でも 130 mm のスリットで拘束を弱めるとラメラテアは発生せず、また 150 °C のパス間温度で溶接した場合にはルート割れだけになり、200 °C の予熱・パス間温度では割れは発生しなかった。すなわち、残留応力の低減や、水素逃散の促進による転位などへの水素偏析量の減少はラメラテアの防止に有効な手段となる。とくにルートあるいはトウクラックから伝播するラメラテアの防止にはその効果が顕著で

ある。

3.3 定歪式ラメラテア試験

キルド鋼におけるラメラテアの伝播は水素割れの挙動を示すものが多いから、水素の影響を考慮した定歪式ラメラテア試験法を考案した。

3.3.1 試験方法

Fig. 2 (a) のように深さ 5 mm の溝付フランジ板 (板厚 20 mm) に供試鋼をウェブとしてすみ肉溶接したあと、ウェブを (b) のごとく平滑に削除して 300×70×18 mm の試験片を採取した。つぎに (c) のように固定した試験片の溶接金属上に条件 250 A-14 V-15 cm/min で TIG 溶接し、5 sec 後自由端に徐々に载荷して試験片表面に治具の曲率半径 R から近似的に次式で定まる歪を与えた。 $\epsilon = 18/2R \times 100(\%)$ 。

試験では decohesion crack および hydrogen induced crack に対する限界歪をそれぞれ測定した。すなわち、前者では歪を 0.75% から順次増加させて介在物が 1 mm 以上に開口する歪量を 6 回の繰返しで求め、後者では 95% Ar+5% H₂ の混合ガスで TIG 溶接し、歪付加のまま 24 時間放置して介在物から水素割れが発生する限界歪を求めた。歪付加直後の割れと水素割れは目視観察によって区別して評価した。なお、TIG 溶接金属 ($[H] = 2.8 \text{ ml/100 g Fused Metal}$) からの水素放出を極力おさえるために試験片を溶接前に 0 °C に冷却した。

Fig. 2 The constant strain lamellar tearing test.

3.3.2 試験結果

上述のようにして求めた decohesion crack に対する限界歪 (ϵ_c)_D および hydrogen induced crack に対する限界歪 (ϵ_c)_H を Table 2 に示す。Photo. 2 が decohesion crack の代表例であり、板厚方向引張試験での破断位置に比較して鋼板表面近傍で開口するものが多かった。

鋼板 5L, 5M, 5A, A6, A7 には酸化物がクラスタ状に存在し、わずかな歪で開口はしたが、歪を 6 % まで増加させても長く拡大することは少なかった。これに対し、43C, K5D, 40C, 5F などの硫化物系介在物からの

Photo. 1 Lamellar tearing in the multipass through thickness restraint cracking test specimen.

Photo. 2 An example of decohesion crack in the constant strain lamellar tearing test specimen.

(a) 20 min after welding

(b) 120 min after welding

Photo. 3 Propagation of cracks in the constant strain lamellar tearing test specimen. (K5D, Applied strain : 0.75%)

Fig. 3 Results of the constant strain lamellar tearing test.

割れは $(\epsilon_c)_D$ 以上の歪で試験片全幅に拡大した。このように介在物の種類によって decohesion crack の伝播程度は異なる。

水素および歪付加で生じた hydrogen induced crack の代表例が Photo. 3 であり, HAZ の介在物を連ねて伝播する。写真の点状欠陥は硝酸水溶液腐食によるエッチピットで介在物の存在位置に対応する。試験片表面を実体顕微鏡で観察し, 割れ発生までの潜伏期間を求めた結果が Fig. 3 である。付加歪が小さいほど潜伏期間は長くなり, 割れを発生しない限界歪 $(\epsilon_c)_H$ がそれぞれの鋼板について求めた。Table 2 に示したように 5L, A6, A7 のごとく (R.A.)_Z が20%以上のものにも割れが発生した。

Photo. 4 のように, HAZ から離れた位置に存在する大きな介在物は歪によって開口しその先端部は鈍角状になるが, 水素割れはすべて HAZ 内の小さな介在物から生じた。なお, 5A のように P_{CM} 値がとくに低いもの

Photo. 4 Hydrogen induced cracks initiated at Al_2O_3 inclusions.
(A6, Applied strain : 4.5%)

Fig. 4 The small type through thickness restraint cracking test.

Table 4 Comparison of the susceptibility to hydrogen induced cracking between L and Z direction. (at 30°C, 80%)

Plate	Preheating temperature to prevent cracking (°C)			$\Delta T = (T_c)_L - (T_c)_Z$
	L-direction (T_c) _L	Z-direction (0% crack) (T_c) _Z	Z-direction (<20% crack) (T_c) _Z	
43 C	150	225	200	50
5 L	175	225	175	0
5 I	175	200	200	25
K5D	175	200	200	25
5 G	150	225	200	50
5 H	125	175	150	25
40 C	125	200	200	75
5 E	75	175	125	50
5 F	100	250	225	125
5 B	100	150	100	0
5 M	100	175	150	50
35 C	75	100	75	0
5 A	25	50	25	0
A6	125	150	125	0
A7	125	150	125	0
HT80	125	150	125	0

では HAZ 内に大きな介在物があっても水素による割れの拡大は生じなかった。

ラメラテア感受性の高い K5D の圧延方向試験片 (素材を 18 mm に減厚) を板厚方向と同条件で試験したと

Fig. 5 Results of the restraint cracking test.
(Steel; 5F)

ころ、6%歪でも割れは発生せず、板厚方向の割れ感受性は圧延方向のそれよりかなり劣ることが明らかである。

3. 4 立板入り小形割れ試験

前述のごとく、ラメラテアを発生しやすい鋼材は Z 方向の水素割れ感受性が L 方向のそれにくらべて高いことが予想されたので、立板入り小形割れ試験 (Fig. 4) と斜め Y 形拘束割れ試験を行なって板厚および圧延方向のルート割れ阻止予熱温度 $(T_c)_Z$, $(T_c)_L$ をそれぞれ求めた。

Table 4, Fig. 5 が試験結果であり、ラメラテアを発生しやすい鋼板は $(T_c)_Z$ が高く、 $(T_c)_Z$ と $(T_c)_L$ の差も大きい。立板入り小形割れ試験での割れ率が 20% 以下のものはルート割れだけであることを勘案して、割れ率を 20% 以下にするための予熱温度 $(T_c)_Z$ をとると、 $\Delta T = (T_c)_Z - (T_c)_L$ は 5A, 35C, 5B, HT80 などでは 0 であるが、5F では 125°C にもなる。

4. 各種試験法の相関

前節の結果から各種試験法の相関性およびそれぞれの限界値を実施工状態に最も近いといわれる Z 窓枠拘束割れ試験結果を基準として考察した。

Fig. 6 のように Z 窓枠拘束割れ試験での断面割れ率と $(R.A.)_Z$ は比較的良い相関があるが、A6, A7, 5I では高い絞り値にかかわらずラメラテアが発生している。Photo. 5 が A6 のラメラテアであり、アルミナクラスタが発生点となっている。また、RE 添加で硫化物を粒状化した 5I では表面直下の RE-Oxysulfide が割れの起点である。このように C 系介在物がクラスタ状で存在すると $(R.A.)_Z$ が高くともラメラテアが発生することがある。これは定歪式ラメラテア試験で明らかにしたように、酸化物系介在物はわずかな歪で開口しても拡大し難いから硫化物系のもほど $(R.A.)_Z$ に影響を与えないためと考えられる。これに対して、5C, 5D では

Fig. 6 Relationship between sectional crack ratio in the through thickness restraint cracking test and R.A. in the through thickness tensile test or threshold strain for decohesion or for hydrogen induced crack.

Photo. 5 Lamellar tearing in steel A6

板厚中央部に硫化物が偏析するため絞り値は低いが鋼板表面部は比較的清浄でラメラテアは発生していない。

以上のことから、硫化物系介在物がラメラテアの主因になるものでは板厚方向引張試験によってラメラテア感受性のある程度評価できるが、酸化物系介在物が主因のときは $(R.A.)_Z$ から直接ラメラテア感受性を評価するのは困難であるといえる。

decohesion crack に対する $(\epsilon_c)_D$ とラメラテア感受性の相関は明らかではないが、 $(\epsilon_c)_D < 5\%$ の鋼板でラメラテアは発生する。モアレ法によれば拘束が強い継手の板厚方向には約 4% の歪が発生する¹²⁾とされているので、塑性歪だけで介在物が開口することも考えられるが、つぎの水素の影響を加味した試験によればその歪量はさらに低下する。

介在物から水素割れが発生するための $(\epsilon_c)_H$ とラメラテア感受性の相関は非常に良く、ラメラテア発生の限界歪は 2% である。

このように水素の影響を考慮した定歪式ラメラテア試験は酸化物系、硫化物系いずれの介在物によるラメラテア感受性も評価でき、かつその割れの主因が decohesion か水素かの判別も可能である。なお、decohesion

のみによるラメラテアも軟鋼などでは多いと考えられるので、 $(\epsilon_c)_D$ または $(\epsilon_c)_H$ の低いほうの値をその鋼板の限界歪とするほうがよいと思われる。

つぎに、 $(T_c)_Z$ および ΔT とラメラテア感受性の関係を Fig. 7 に示す。両者の相関性はあまり良くないが、 $(T_c)_Z$ が 175°C 以上の鋼板にラメラテアは発生しやすい。また、圧延方向と板厚方向の水素割れ感受性の相違を示す ΔT はラメラテア感受性の高い鋼板ほど大きい。A6, A7 のごとく酸化物系介在物が表面直下の局部に偏析する場合には、板厚方向引張試験と同様に立板入り小形割れ試験によってラメラテア感受性を評価するのは困難である。つまり、 $(T_c)_Z$ または ΔT は介在物からの割れよりもルート割れから伝播するラメラテアの感受性を示す指標である。

Fig. 7 Relationship between crack ratio in the through thickness restraint cracking test and $(T_c)_Z$, ΔT in small type through thickness restraint cracking test.

Table 2 と Table 4 から、 $(R.A.)_Z$ が小さいほど ΔT が高い傾向が認められる。A E測定で明らかにしたように³⁾、 $(R.A.)_Z$ のとくに低い鋼板における立板入り小形割れ試験では溶接直後に decohesion crack が HAZ 内の介在物から生じ、これが水素の作用でルート部と連なるため板厚方向の割れ阻止予熱温度を高めると考えられる。したがって、 $(R.A.)_Z$ は歪による介在物からの割れだけでなく板厚方向の水素割れ感受性も間接的に関連している。

5. 鋼中介在物とラメラテアの関係

Z 窓枠拘束割れ試験で発生したラメラテア部の介在物を XMA で同定すると、割れの主因は Table 5 のように硫化物と酸化物に大別できる。0.01% S 以上の鋼板では MnS、それ以下の場合にはクラスタ状の Al_2O_3 または RE-O-S がラメラテアの主因になる。

硫化物系介在物 (キルド鋼では Mn-O-S 系が多い) は鋼塊凝固時の溶質の固・液分配に基づく凝固前面にお

Table 5 Inclusion types in the steel in which lamellar tearing occurred.

Plate	S content %	Inclusion		Inclusion type
		Cleanliness A, %	Number ρ_T , 1/mm ²	
43 C	0.014	0.146	73.0	MnS, Al ₂ O ₃
S I	0.007	0.101	69.2	Ce-O-S
XSD	0.013	0.159	135.1	MnS, Al ₂ O ₃
40 C	0.020	0.156	189.0	MnS, Al ₂ O ₃
S E	0.011	0.125	106.8	MnS
S F	0.020	0.109	43.6	MnS
A6	0.008	0.059	51.1	Al ₂ O ₃
A7	0.007	0.182	136.2	Al ₂ O ₃

ける濃化によってほぼ平衡論的に生成され、鋼塊中心および柱状晶あるいは等軸晶の樹枝間に偏析する。これらの硫化物は RE, Ca など形状調整された場合を除けば圧延によって細長く伸ばされる。硫化物のラメラテアへの影響は鋼材の S 含有量と硫化物の形状できまる。通常 Al-キルド鋼では真空脱ガスが施され、かつ溶銑脱硫も容易になったので S 含有量は 0.015% 以下のものが多く、0.02% 以上のものはほとんどない。

一方、酸化物系介在物は炉内スラグ、脱酸生成物、耐火物、湯面保護剤の混入および空気酸化によるものが多い。これらの介在物の大半は鋳型内で浮上分離し、一部が凝固時に捕捉されて鋼中介在物となる。これらは鋳肌部に多く内部に向かって減少するので、その全量が少なくてもラメラテアに悪影響をおよぼすことがある。生成機構から予想されるように酸化物系介在物は鋼塊位置による変動があるので、鋼中酸素量はラメラテア感受性の目安になりにくい。前節で述べた酸化物系介在物によるラメラテア感受性の評価が困難であるのはこれが原因となっている。

以下では介在物の種類とは無関係に、鋼中介在物の総面積に相当する清浄度 A および単位面積当りの介在物総数 ρ_T を鋼板表面側の 70 視野 (倍率: 700) で自動走査測定して検討した。

Fig. 8 がラメラテア感受性と S 含有量, A および ρ_T との関係であり、あまり良い相関があるとはいえないが、硫化物系介在物が割れ主因となる場合には S 含有量および清浄度 A が高いほど割れやすい傾向が認められる。一方、酸化物系介在物によるものではその傾向は認められない。

硫化物から発生した小さなラメラテアが疲れや脆性破壊に進展しやすいことが知られているが^{1,14)}、この種の介在物の危険度が高いことは、本研究の Z 窓枠拘束割れ試験で生じた割れが硫化物によるもののほうが大きかつ

Fig. 8 Effect of S content, cleanliness A and inclusion number ρ_T on the lamellar tearing susceptibility of steel.

たことから十分予測できる。一方、酸化物系介在物についての報告は少ないが、妹島ら²⁾は Al-キルド極厚鋼板の Al₂O₃-SiO₂-MnO 介在物から発生したラメラテアが疲れおよび脆性破壊へと進展する条件を求めている。

このように、いずれの介在物も有害であることは明らかで、ラメラテア発生の危険がある構造物には硫化物系、酸化物系両方の介在物対策が必要である。

6. 結 言

21種類の Al-キルド鋼を用いて各種ラメラテア試験を行ない、それらの相関性および限界値について検討しつぎの結論が得られた。

(1) 定歪式ラメラテア試験は割れ機構に基づいて考案されたもので、Z 窓枠拘束割れ試験における割れ率と良い相関性を示す。この試験法では鋼材のラメラテア感受性を decohesion 主因とする場合と水素を主因とする場合について、それぞれ評価することができる。

(2) (R.A.)_Z はラメラテア感受性に対するかなり良い判定基準となりうるが、クラスタ状の酸化物を含む鋼板ではあまり有効でなく、また鋼板表面の特性を反映していない欠点がある。

(3) ラメラテアを発生しやすい鋼板では圧延方向と板厚方向の水素割れ感受性の差が大きい。

(4) 0.01% S 以上の鋼板ではラメラテアの主因は硫化物系介在物であるが、それ以下のものでは酸化物系介在物である。

参 考 文 献

- 1) 小林ほか: "ラメラテア感受性の異なる SM 50 における板厚方向の脆性破壊および疲労伝播特性", 昭和50年度鉄鋼協会第90回講演大会概要集, Vol. 61 (1975), No. 12, S. 685.
- 2) 妹島ほか: "極厚鋼板の表面剝離の研究(第1, 2, 3, 4報)", 昭和49年度溶接学会秋期大会概要集, Vol. 15 (1974), p. 474~481.
- 3) 平井, 坪井: "A E法の溶接割れ検出への応用(第2報)" 本誌, Vol. 45 (1976), No. 8
- 4) J. C. M. Farrar, R. E. Dolby and R. G. Baker: "Lamellar Tearing in Welded Structural Steels", W. J. Vol. 48

- (1969), No. 6, 274s-282s.
- 5) D.M. Nicholls: "Lamellar Tearing in Hot Rolled Steel": B.W.J. Vol. 8 (1968), No. 3, 103-112.
 - 6) D.N. Elliott: "A Fractographical Examination of Lamellar Tearing in Multirun Fillet Welds", Metal Const. and B.W.J., Vol. 1 (1969), No. 2, 50-57.
 - 7) J. Heuschkel: "An Isotropy and Weldability", W.J. Vol. 50 (1971), No. 3, 110s-126s.
 - 8) R.P. Oates and R.D. Stout: "A Quantitative Weldability Test for Susceptibility to Lamellar Tearing" W.J. Vol. 52 (1973), No. 11, 481s-491s.
 - 9) M.L. Drury and J.E.M. Jubb: "Lamellar Tearing and the Slice Bend Test", Metal Const. and B.W.J. Vol. 5 (1973), No. 2, 88-95.
 - 10) 金沢, 山戸, 井上, 橋本: "ラメラテアの発生要因について", 本誌, Vol. 45 (1976), No. 2, 128-135.
 - 11) 西岡, 江本: "ASEA-SKF プロセスについて", 鉄と鋼, Vol. 60 (1972), No. 12, 1661-1681.
 - 12) JSSC 極厚高張力鋼溶接研究班: "大形溶接構造物の溶接割れに関する研究", JSSC, Vol. 11 (1975), No. 113, 33-47.
 - 13) 西尾, 梶本: "モアレ法による各種すみ肉継手の板厚方向ひずみの計測について", 溶接協会 CSW 委員会資料, CSW-146-75.
 - 14) J.C.M. Farrar: "Inclusions and Susceptibility to Lamellar Tearing of Welded Structural Steels", W.J. Vol. 54 (1975), No. 8, 321s-331s.
-