

討18 溶接熱影響部の靱性に及ぼす島状マルテンサイトの影響

神戸製鋼所 鋼板開発部 工博 笠松 裕・細谷 隆司
高嶋 修嗣

1. 緒言

高張力鋼に大入熱溶接を施すと、一般にその熱影響部の靱性が劣化することは周知の事実である。これは、主に、 γ 粒の粗大化、組織の上部ベーナイト化、あるいは島状マルテンサイトの生成などによるものと考えられる。しかし、最も支配的な脆化因子については必ずしも明らかではない。本研究では、入熱量の増加に伴う脆化挙動を γ 粒径および組織と関連させて検討するとともに、靱性に及ぼす島状マルテンサイトの影響、さらには、極低C鋼の島状マルテンサイト生成挙動について調査した。

2. 実験方法

供試鋼は市販の引張強さ50~100kg/mm²級の高張力鋼である。その化学成分をTable 1に示す。これらの供試鋼より16×55mmの試験片を採取した後、種々の熱サイクルを付与した。熱サイクル条件としては、入熱量の影響を調べたために、最高加熱温度を1350℃とその保持時間を5sec.と一定にし、800℃から500℃までの冷却時間(T_c)を7~2800sec.の範囲で変化させた。

その後、これらの熱サイクル試験片を用いて、ハーフサイズの2mmVシャルピ試験、 γ 粒径測定、光学顕微鏡組織および島状マルテンサイトの観察を行った。なお、一部の熱サイクル試験片については、電顕組織を観察するとともに、組織中における残留オーステナイトの有無をX線回折によって調査した。

3. 実験結果および考察

3-1 靱性に及ぼす入熱量の影響

入熱量の増加による溶接熱影響部の脆化挙動を明らかにするために、 T_c と $vTrs$ の関係を調査した。その結果をFig. 1に示す。 T_c の増加に伴う $vTrs$ の変化は鋼種によって異なる。すなわち、HT-50の $vTrs$ は、ほとんど変化しない。HT-60の $vTrs$ は急激に上昇した後、 $T_c=25$ sec.以上でほぼ一定の値となる。さらに、HT-80の $vTrs$ は、いったん低下して最小値を示した後急激に上昇し、 $T_c=180$ sec.以上でほぼ一定値となる。また、HT-100(A)および(B)の $vTrs$ は、短時間側では、HT-80の場合と同様の变化を示しているが、長時間側の $T_c=2800$ sec.においても上昇する傾向を示している。HT-80~HT-100(B)で見られる $vTrs$ の最小値は、合金元素が多いほど低温、かつ長時間側に位置している。

$vTrs$ が上昇する T_c の範囲は、合金元素量の多い鋼種ほど長時間側に移行しており、また、その範囲における $vTrs$ の上昇量も、合金元素量の多い鋼種ほど大きくなる傾向がみられる。さらには、HT-50の $vTrs$ がほとんど変化せず、HT-60~HT-100(B)の $vTrs$ とは挙動を異にする現象は、興味深い。これは、HT-50の靱性を支配する因子がHT-60~HT-100(B)のそれとは異なっていることを示唆している。

Table 1 Chemical composition of steels. (wt.%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	B
HT-50	0.14	0.30	1.38	0.016	0.008	-	-	-	-	-	0.033	-
HT-60	0.11	0.24	1.22	0.008	0.007	0.20	0.45	0.14	0.13	0.04	0.035	-
HT-80	0.12	0.23	0.84	0.014	0.005	0.25	0.96	0.59	0.39	0.04	0.060	0.0012
HT-100(A)	0.10	0.28	1.01	0.010	0.003	0.25	3.32	0.58	0.43	0.06	0.037	-
HT-100(B)	0.09	0.26	0.60	0.008	0.003	0.25	4.91	0.49	0.42	0.06	0.040	-

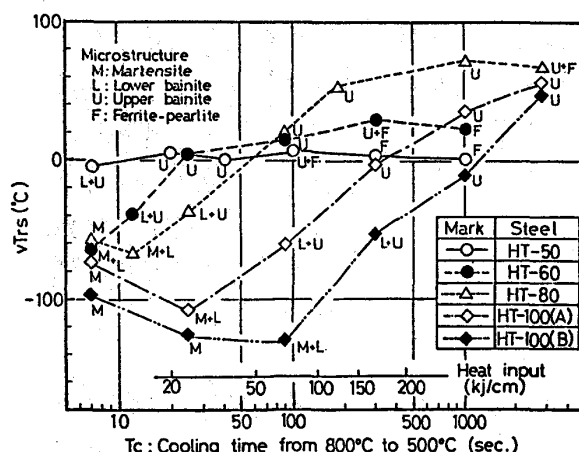


Fig. 1. Effect of cooling time on transition temperature with variation of microstructure.

3-2. γ 粒径と靱性の関係

大入熱溶接熱影響部の靱性が劣化する原因の1つとして、従来より γ 粒の粗大化が多く報告されている¹⁾。Fig.2は、 T_c の増加に伴う γ 粒度の変化を示したものである。この図から明らかなように、 γ 粒度は T_c の増加につれて、いすれの鋼種も単調に減少している。このような γ 粒径の変化は、Fig.1に示した v_{Trs} の変化とは対応していない。これは、 γ 粒径以外に、靱性を支配する因子が存在することを示している。

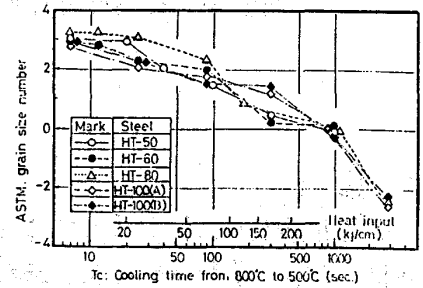


Fig.2 Variation of ASTM grain size number with cooling time.

3-3. 組織と靱性の関係

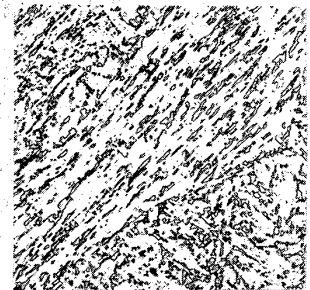
熱サイクル後の試験片に観察される光学顕微鏡組織は、マルテンサイト(M)、下部ベーナイト(L)、上部ベーナイト(U)およびフェライト・パーライト(F)の単一組織およびこれらの混合組織となっている。Fig.1は、各 T_c における組織をサックスとして示し、 v_{Trs} の変化と対応させている。この図から、一般に v_{Trs} は組織がMからM+Lになるにしたがって低下し、ここで最小値を示す。その後、M+LからUへと変化すると v_{Trs} が急激に上昇し、Uの単一組織で最大値を示す。さらにUからFへ変化すると、 v_{Trs} はやや低下する傾向がみられる。ここで、 v_{Trs} が最小となるM+Lおよび v_{Trs} が急激に上昇するM+LからUにかけての組織領域が、合金元素量が多いほど長時間側へ移行していることは注目される。これは合金元素量が多いほど、焼入れ性が大きくなるためであり、 T_c の増加に伴う v_{Trs} の変化が、組織の変化とよく対応していることを示している。

しかしながら、M+LからUにかけての v_{Trs} の上昇量は、鋼種によって著しく異なっており、単に、Uの生成だけでは説明できない。すなわち、HT-50の v_{Trs} は、ほとんど上昇していないが、HT-60~HT-100(B)の v_{Trs} は、合金量が多いほど上昇している。この原因を究明するために、組織をさらに詳細に観察した。

Photo.1は、HT-50とHT-80のUを対比して示したものである。 v_{Trs} が上昇しないHT-50では、針状に伸びたフェライトの界面にセメントライトが生成しており、典型的なUを示している。一方、HT-80では、塊状の組織が生成しており、このような塊状組織は v_{Trs} が上昇するHT-60およびHT-100(A)、(B)においても認められた。



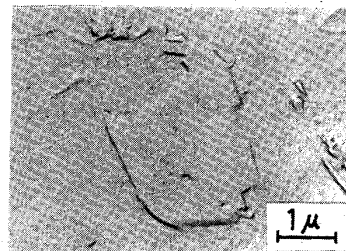
[HT-50($T_c=20\text{sec.}$)]



[HT-80($T_c=1000\text{sec.}$)]

Photo.1 Upper bainite structure of HT-50 and HT-80

Photo.2には、HT-80の塊状組織を電顕観察した結果を示す。レプリカ写真には塊状組織中にラス状の線がみられる。また、薄膜写真の中央部には双晶が明確に観察され、その周囲は転位密度が高くなっている。このような特徴を有する組織をL.J. Habraken²⁾は Austenitic martensitic region と、また、三村³⁾は島状マルテンサイトと称している。



[Replica]



[Thin-foil]

Photo.2 Electron micrographs of martensite island in HT-80 after synthetic welding thermal cycle. ($T_c=1000\text{sec.}$)

L.J. Habraken²⁾は、この塊状組織中に

は残留オーステナイトが存在すると報告しているが、本実験においても、この塊状組織が生成している場合には、X線回折によって残留オーステナイトが確認された。

以上のことから、MとLの混合組織からリ組織に変化すると、 v_{Trs} が急激に上昇するのは、塊状組織が生成するためと考えられる。なお、本報では、この塊状組織を島状マルテンサイトと称する。

3-4. 靱性に及ぼす島状マルテンサイトの影響

島状マルテンサイトが靱性に及ぼす影響を明らかにするため、島状マルテンサイトが生成する T_c の範囲およびその生成数、大きさ、生成量を測定し、島状マルテンサイトの生成挙動を調査するとともに、これらと v_{Trs} の関係について検討した。

Fig.3には、島状マルテンサイトの生成挙動を示す。島状マルテンサイトが生成する T_c の範囲は、合金元素量の多い鋼種ほど、長時間側に移行している。この範囲における v_{Trs} の変化についてみると、Fig.1との対比から明らかなように、島状マルテンサイトが生成すると、いよりの鋼種の v_{Trs} も急激に上昇していることがわかる。

島状マルテンサイトの生成数は、HT-50の場合、きわめて少なく、 T_c が増してもほぼ一定になっている。一方、HT-60~HT-100(B)の場合の生成数は、 T_c が増すに伴って急激に増加した後、一定値を示す。また、合金元素量が多い鋼種ほどその増加量は大きい。

島状マルテンサイトの大きさ(円に換算した直径)はいよりの鋼種も T_c の増加に伴って増大しているがその変化は少ない。

島状マルテンサイトの生成量(面積率)は、HT-50の場合、生成数の変化と同様の傾向を示しているが、HT-60~HT-100(B)の場合、 T_c の増加につれて単調に増加している。つぎに、島状マルテンサイトの生成数、大きさ、および生成量と v_{Trs} との関係を調べた。その結果、いよりも相関性があることが明らかになったが、とくに、生成量と v_{Trs} の間には、Fig.4に示すように、きわめて高い相関性が認められた。

前節において、組織がMとLの混合組織からリ組織に変化する場合、 v_{Trs} の上昇量が、鋼種によって異なることを示したが、これは島状マルテンサイトの生成量によって説明される。すなわち、HT-50の v_{Trs} がほとんど変化しないのは、生成する島状マルテンサイト量が少ないためであり、一方、HT-60~HT-100(B)の v_{Trs}

が合金元素量の多い鋼種ほど上昇するのは、生成する島状マルテンサイト量が多いことによるものと考えられる。

以上のことから、島状マルテンサイトの生成量は、HT-60~HT-100(B)において、最も大きな脆化因子として作用している。HT-50では、その作用はきわめて少ないと

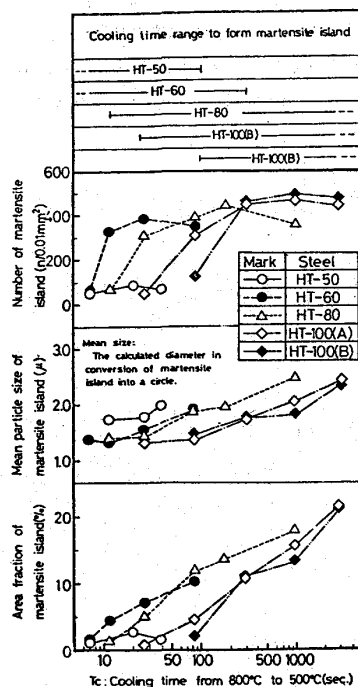


Fig.3 Variation of cooling time to form martensite island and morphology of martensite with cooling time.

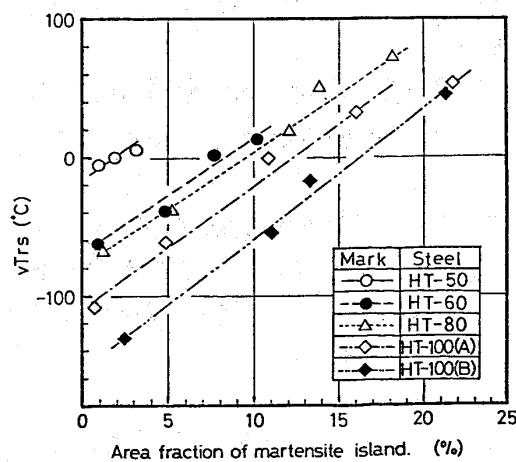


Fig.4 Relationship between area fraction of martensite island and transition temperature.

いえる。なお、Fig.4において、島状マルテンサイトの量が同一の場合についてみると vT_{rs} は、合金元素量の多い鋼種ほど低温側に位置している。このような鋼種間における vT_{rs} の差は、Niなどの合金元素量に依存するマトリックスの靱性や組織の微細化の程度などによるものと考えられる。

3-5. 極低C鋼の島状マルテンサイト生成挙動

島状マルテンサイトは γ - α 変態時における γ 中へのCの介配によって γ が安定化するため、生成するといわれている⁴⁾。したがって、島状マルテンサイトの生成量はC含有量によって著しく影響されると考えられる。本節では、C含有量をフェライト固溶限以下に低減した極低C鋼の島状マルテンサイト生成量および靱性を調査した。

極低C鋼の化学成分およびその機械的性質をTable 2に示す。この供試鋼(A鋼)は、100 KVA高周波炉溶解した後、焼入や焼もどしによって製造した板厚25 mm、 σ_{60} 60 kg/mm²級の鋼板であり、その衝撃特性値 vT_{rs} は-92℃ときわめて優れている。

T_c の増加に伴う光学顕微鏡組織、島状マルテンサイト量および vT_{rs} の変化を調査した結果をFig.5に示す。なお、図中には、A鋼と同一の強度と有する前述のHT-60の結果を併記した。 $T_c = 7 \sim 300$ sec. の範囲におけるA鋼の組織はLとUの混合組織、U単一組織およびUとFの混合組織であり、これらの組織中には島状マルテンサイトが生成している。ただし、その生成量はきわめて少なく、 T_c を増加させても2~4%とほぼ一定である。このような島状マルテンサイト量の変化は、その生成量が急激に増加するHT-60の場合とは全く異なり、むしろ、HT-50のそれに近い。さらに、 T_c を増大させても、 vT_{rs} はほとんど上昇せず、かつ約-30℃ときわめて低温側に位置していることは注目される。

大入熱溶接する場合、C含有量の低減は溶接熱影響部における島状マルテンサイトの生成量を減少させ、靱性劣化を軽減するために有効であると考えられる。

4. 結論

溶接入熱量の増大に伴う著しい溶接熱影響部の靱性劣化には、 γ 粒の粗大化よりも、上部ベーナイト組織中に生成する島状マルテンサイトが最も大きな影響を及ぼしている。また、極低C鋼は島状マルテンサイトの生成量がきわめて少なく、かつ入熱量依存性を示さないため、大入熱溶接した溶接熱影響部の脆化軽減に有効であることが判明した。

参考文献

- 1) たとえば 第36, 37回西山記念技術講座テキスト「厚鋼板の溶接銜合部及び熱影響部の靱性」(1975) P.151
- 2) L.J. Habraken et al: Symposium "Transformation and Hardenability in Steels" Feb, (1967) P.69
- 3) 三村, 晋木: IJW, Doc. IX-629-69. (1969)
- 4) V. Biss, K.L. Cryderman: Metallurgical Transaction, Vol. 2 (1971) P. 2267

Table 2 Chemical composition and mechanical property of ultra low carbon steel.

Steel	Thickness (mm)	Chemical composition (wt.%)											T.S (kg/mm ²)	vT_{rs} (°C)
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al		
A	25	0.02	0.26	1.76	0.010	0.005	0.25	0.51	0.36	0.22	0.05	0.031	62.8	-92

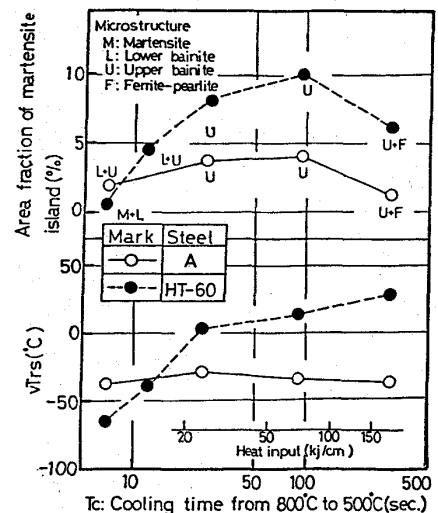


Fig.5 Variation of area fraction of martensite island, vT_{rs} , microstructure with T_c .