

溶接後熱処理過程の機械的性質に及ぼす 鋼溶接熱影響部組織の影響

中村 満*・田頭 孝介*²・堀江 皓*・梶原 英司*³・川島 宏貴*⁴

Influence of Microstructures in Heat-Affected Zone of Steels
on the Mechanical Properties during Post-Weld Heat Treatment

Mitsuru NAKAMURA, Kousuke TAGASHIRA, Hiroshi HORIE, Eiji KAJIWARA and Hirotaka KAWASHIMA

Synopsis : Influence of post-weld heat treatment (PWHT) on the mechanical properties of high strength steel for welded structure (TMCP steel), especially the relation between the microstructures of Heat-affected zone (HAZ), the stress relaxation behavior and high temperature deformability was investigated. The synthetic-weld heat treatment were carried out by Weld-heat cycle simulator and a maximum temperature of 1623K. PWHT conditions were done at heating rate 55.6K/ks. The mechanical properties during PWHT process were evaluated by means of high temperature tensile test, constant-strain rate test on heating and constant-load test on heating. Influence of PWHT on the stress relaxation behavior and the reducing ductility was discussed by each microstructures of HAZ (Bainitic or Lath-martensitic structure). The results are summarized as follows.

- 1) As a result of high temperature tensile test, the value of elongation and the reduction of area of Bainitic structure specimens were lower than that of Lath-martensitic and Bainitic-ferritic structure specimens.
- 2) The stress relaxation behavior of Bainitic structure specimens during PWHT process were delayed clearly over 500K than that of another structure specimens. Bainitic structure specimens appeared to the resistance of softening tendency of matrix during PWHT.
- 3) High temperature deformability of Bainitic structure specimens were a remarkable reducing tendency of ductility at 850~900K. The difference of these tendency of the microstructures of HAZ could be explained by the shape and site of precipitated carbides during PWHT process.

Key words : TMCP steel; post-weld heat treatment; microstructures of HAZ; reducing ductility; stress relaxation behavior; deformability; precipitation of carbides; grain boundary.

1. 緒言

造船、建築等で用いられる溶接構造用鋼は近年、溶接性の改善および高強度化のため低炭素当量 (Ceq) 化の要求が高く、TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) を活用した鋼が用いられることが多くなっている。このTMCP鋼は制御圧延と制御冷却を併用することにより、合金元素の添加を伴わないで炭素鋼を高強度化した材料である。TMCPの特徴は (1) スラブの低温加熱 (2) オーステナイト未再結晶温度域での強圧下 (3) 必要に応じてオーステナイトとフェライトの2相域圧延 (4) または圧延後の加速冷却をおこなうことであり、これにより加熱オーステナイト粒の細粒化、再結晶オーステナイトの細粒化およびフェライトの細粒化を図ることにより、より高強度の材料が得られるものである¹⁾。一方、このような微細粒高強度鋼

も各種の溶接により結晶粒の粗大化およびマイクロ組織の不均質化が起こり、溶接熱影響部 (HAZ) での機械的性質に大幅な低下が起こっている。さらに残留応力除去および溶接部のマイクロ組織の改善等の目的でおこなう溶接後熱処理 (PWHT) 過程では、HAZの不均質領域は炭化物の析出挙動に伴い高温物性値の低下、特に応力緩和特性の低下が懸念され、今後溶接施工において大きな障害となりうる可能性がある。

TMCP鋼の従来の研究では制御圧延材、加速冷却材におけるマイクロアロイの変態組織、機械的性質への影響²⁾、PWHT条件緩和の可能性に関する報告³⁾およびTMCP鋼HAZの脆化の度合いについて結晶粒度、組織の点からの報告⁴⁾等がある。しかし、例えばHAZ組織がマルテンサイト組織またはベイナイト組織等、各々組織毎のPWHT過程でのHAZの延性評価についての報告はほとんどなく、いまだ明

平成5年8月4日受付 平成6年2月4日受理 (Received on Aug. 4, 1993; Accepted on Feb. 4, 1994)

* 岩手大学工学部 (Faculty of Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda Morioka 020)

* 2 室蘭工業大学 (Muroran Institute of Technology)

* 3 岩手大学大学院生 (現: (株)ベン) (Graduate Student, Iwate University, now Venn Co, Ltd)

* 4 岩手大学大学院生 (Graduate Student, Iwate University)

らかでない。

本研究はこの点を明らかにすることを目的とし、溶接構造用高強度鋼としてTMCP鋼を用い、溶接後PWHTを施し、主として高温での延性低下についてHAZ組織との関係から実験し、TMCP鋼HAZの高温物性および応力緩和挙動について検討した。

2. 実験方法

本実験で用いたTMCP鋼の化学組成と機械的性質をTable 1に示す。供試鋼は合金添加元素を含まない水冷型のTMCP鋼で炭素当量(Ceq)が0.39と溶接構造用圧延鋼材程度であるが、引張強さは618MPaと高張力鋼程度の強度となっていた。

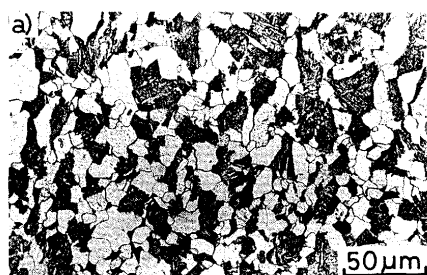
Fig. 1は供試鋼のマイクロ組織を示す。特徴である平均結晶粒径は13~16 μm と微細粒組織であり、マイクロ組織はフェライト+パーライト組織で一部ベイナイト組織も存在しており、細かい棒状および球状のセメンタイト(Fe₃C)がラメラの間に観察された。

Fig. 2は本実験で各種のHAZ組織を得るために拘束溶接

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of TMCP steel used. (mass%)

C	Si	Mn	P	S	C _{eq}	P _{CM}	Plate Thickness (mm)
.16	.28	1.33	.014	.002	.39	.24	45
Y.P (MPa)	T.S (MPa)	EL (%)	R.A (%)	Y.R (%)	Absorbed Energy (2V-273K) (J)	Grain Size (μm)	
461	618	27	77	75	167	13~16	

R.A ; Reduction of Area Y.R ; Yield Ratio



As received

Fig. 1. Microstructures of TMCP steel (As Received).

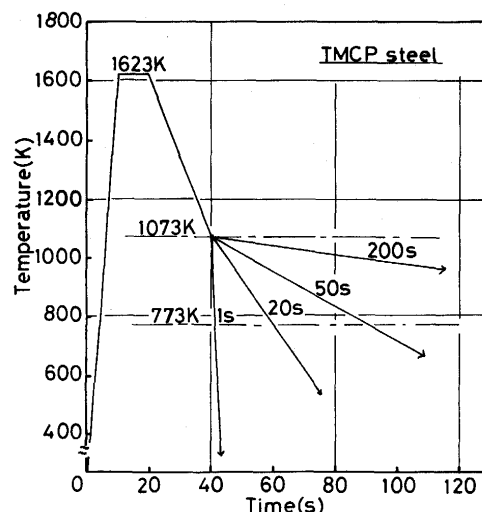


Fig. 2. Schematic diagram of synthetic-weld heat treatment.

熱サイクル再現装置を用いて与えた再現溶接熱サイクル条件を示す。1623Kに15sで急速に昇温し、2sおよび20s保持後、1073Kまで20sで冷却し、1073~773K間の冷却時間を1~200sまで変化させることにより、結晶粒径およびHAZ組織の異なる試料を作成した。これら試料を用いて初めにSH-CCT図を作成しHAZ組織の検討をおこなった。

次に、HAZの評価試験として高温引張試験、昇温定歪速度試験および昇温定荷重試験等をおこなった。高温引張試験は代表的HAZ組織の3試料のものについてPWHT過程の773~973Kまで50K間隔で試験をおこない、特に伸びと絞りについて検討した。昇温定歪速度試験は応力緩和挙動を調べる目的でおこなったもので、初めに無負荷で熱膨張による変位量を測定し、次に各温度における測定した変位量を入力し、一定歪速度下で材料に与える初期応力を任意に変化させ、PWHT過程での応力緩和挙動を検討した⁵⁾。昇温定荷重試験はPWHT過程での材料の変形能および高温強度を調べる目的でおこなったもので、応力一定の条件下で変位量の変化を調べた。この試験方法は応力緩和がないため、HAZ固有の値が得られる方法である⁶⁾。なお、PWHT条件は55.6K/ks (200K/h)の昇温速度でおこなった。

3. 実験結果および考察

Fig. 3にTMCP鋼のSH-CCT図を示す。最高加熱温度は1623K、○はその温度で2s保持、●は20s保持した試料である。1073~773K間の冷却時間で整理すると約4~5sでマルテンサイト組織は消滅しベイナイト組織となっており、約50s以上の冷却時間でフェライトおよびパーライト変態が始まっている。2, 20sの保持時間の影響はほとんど認められなかった。

Table 2に再現溶接熱サイクル処理後の1073~773K間の冷却時間、硬度(HV)および結晶粒径を示す。硬度値変化

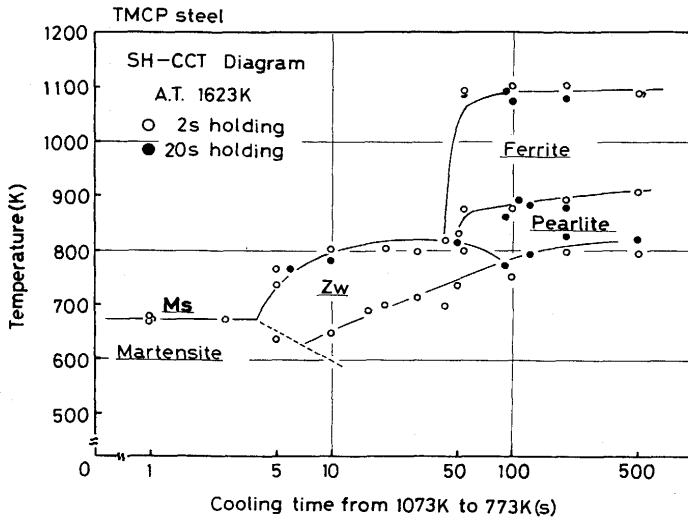


Fig. 3. SH-CCT diagram of TMCP steel.

Table 2. Relation between Vickers hardness, grain size and cooling time from 1073K to 773K on TMCP steel.

1623K-2s holding		
Cooling time from 1073K to 773K (s)	Hardness (R.T) HV:2.94N	Grain size (μm)
1	409~413	120~130
5	280~320	120~130
10	270~280	125~135
20	225~240	125~135
50	200~220	125~140
100	210~220	136~150
200	192~202	143~156
500	195~207	150~160

は、1sの試料ではラスマルテンサイト組織となるため約410となるが、冷却時間が長くなるほど低下し、500sで約200と受入材 (HV:192) とほぼ同じ硬度値となった。一方、結晶粒径については、1623K-2s保持の条件で120~160μmと受入材に比べて約10倍の直径の増加が認められた。この粗大化の傾向は従来の圧延鋼材と比べてもほぼ同様であった。

Fig. 4は再現溶接熱サイクル処理での冷却過程1073~773Kの冷却時間の相違によるTMCP鋼のHAZマイクロ組織を示す。1sの試料はラスマルテンサイト組織、10, 20sの試料は上部、下部を含むベイナイト組織、50sの試料は初析フェライト+ベイニティックフェライト組織、100, 200sの試料は、初析フェライト+パーライト組織となっていた。いずれも受入材に比べて著しい結晶粒の粗大化が認められる。

Fig. 5はPWHT過程773~973KでのTMCP鋼の高温引張試験結果を示す。a) 引張強さ、b) 0.2%耐力、c) 伸びおよびd) 絞りの結果である。図中1s, 20sおよび50sはそれぞれ冷却過程1073~773K間の冷却時間を示し、その得られた組織は1s (ラスマルテンサイト組織)、20s (ベイナイト組織)、50s (初析フェライト+ベイニティックフェライト組織) である。a) の引張強さでは1sのラスマルテンサイト組織

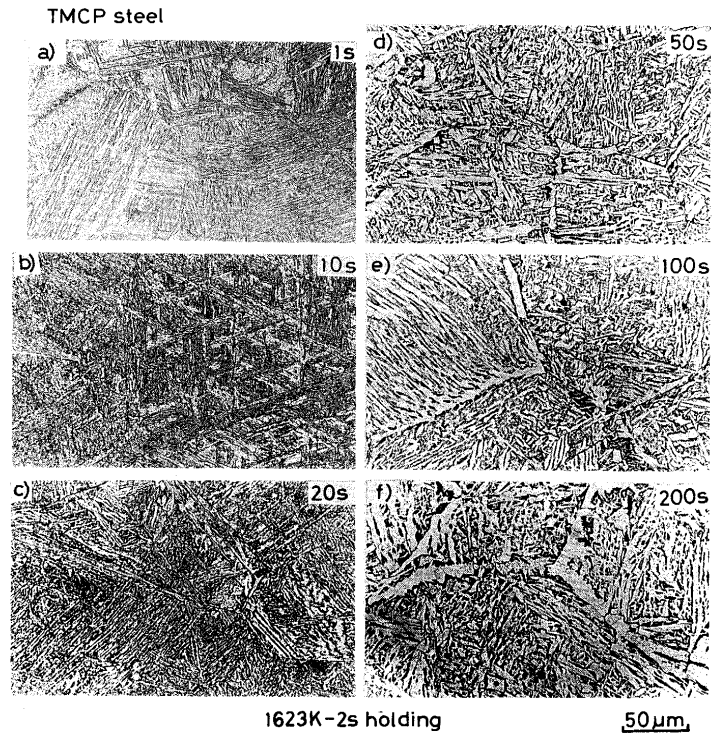


Fig. 4. Optical micrographs after synthetic-weld heat treatment on TMCP steel.

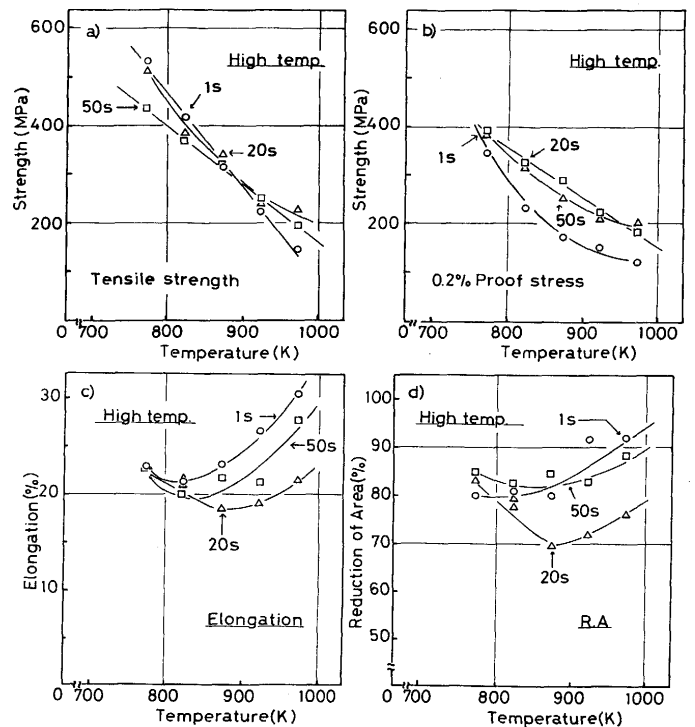


Fig. 5. Relation between the mechanical properties of high temperature and PWHT temperature.

- a) Tensile strength
- b) 0.2% proof stress
- c) Elongation
- d) Reduction of area

の試料はPWHT条件が773Kでは他の2組織より高い値を示すが、973Kの高温では逆に最小値になっており、高温強度の低下率が一番高い。20sのベイナイト組織の試料は1sに比

べるとこの傾向はやや低い。また、b) の0.2%耐力を測定すると、1sの強度低下はより明瞭となって表れ、ラスマルテンサイト組織のPWHTでの炭化物析出挙動によるフェライト化がこの傾向に関係していると思われる。ベイナイト組織の低下は引張強さと同様に少ない傾向にある。

一方、c) の伸びとd) の絞りについては、伸びはいずれの組織でもPWHT温度の上昇に伴い増加するが、いずれのHAZ組織も800~900Kの温度範囲で極小値を示している。また、組織の相違では20sのベイナイト組織のものの伸び値の回復が少ない。一方、絞り値でも伸びと同様の傾向が認められたが、20sのものの絞り値の減少は著しく、873Kで約70%まで低下した。

以上の結果より、ベイナイト組織の試料はPWHT過程でのHAZ組織のフェライト化、つまり延性の回復が他の組織に比べて遅れることが予想された⁷⁾。また、高温引張試験による破面をSEMにより観察したところ、いずれも延性を示すディンプルが観察できたが、20sのものには一部粒界破壊破面も観察された。このようなベイナイト組織に現れるPWHT過程での延性の低下傾向を調べるために、昇温定歪速度試験による応力緩和挙動について検討した。

Fig. 6は、昇温定歪速度試験による初期拘束応力410MPaでの各HAZ組織の応力緩和挙動を示す。1s、20sおよび50sのいずれの組織の試料も約950Kで完全に応力緩和しているが、残留応力値200MPaでのHAZ組織の相違によるPWHT温度を見ると、ラスマルテンサイト組織(1s)は約670Kであるのに対し、ベイナイト組織(20s)は約830Kと大幅に高温側へシフトしており、ベイナイト組織は応力緩和しにくいことが判明した。また、このベイナイト組織の試料は約500K以上で応力緩和の停滞または遅延傾向が他のHAZ組織の試料より明瞭に表れ、マトリックスの軟化抵抗を示している。この温度範囲は焼戻し過程での炭化物の形成、凝集

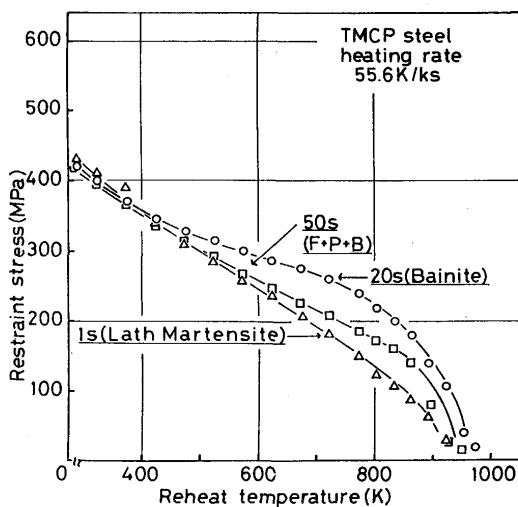


Fig. 6. Stress relaxation behavior of three types of microstructure on TMCP steel obtained by Constant-strain rate test on heating.

それに伴うマトリックスのフェライト化が急速に起こっている領域であり、ベイナイト組織はそれらの反応が起こりにくいと考えられる。また、ベイニティックフェライト組織(50s)の試料も若干軟化抵抗を示している。一方、ラスマルテンサイト組織の試料は直線的に応力緩和していた。

Fig. 7は、昇温定荷重試験での絞り値と破断温度の関係を示す。HAZ組織の相違ではベイナイト組織(20s)の試料が破断温度850~900Kで絞りが30~35%と他のHAZ組織の試料より著しい延性の低下傾向を示した。また、負荷応力196MPaの時、即ち破断温度850~900Kで全てのHAZ組織が延性の低下を示す特異な現象が見られる。このことは従来からの焼戻し脆性挙動⁸⁾がTMCP鋼の場合、この温度範囲にあるものと考えられた。

Fig. 8は昇温定荷重試験での絞り値と材料の変位量の関係をもとめたものである。20sのベイナイト組織の試料の一部を除いては絞り70~90%、変位量4.0~5.0mmの範囲にあり、TMCP鋼溶接熱影響部は高強度、高延性であり、良好な接合部であった。20sの試料は絞り50%以下、変位量3.0mm以下と他の組織に比べかなり低い値となっていた。このような延性の低下を示した試料の破面をSEMにより観察した結果、20sのベイナイト組織のものは脆化を示す粒界破面となっていた。そこでこの原因を調べるために破面近傍のマイクロ組織と再現溶接熱サイクル処理時(冷却過程)のマイクロ組織とを比較して炭化物の析出形態の相違について観察した。

Fig. 9は再現溶接熱サイクル時でのマイクロ組織を示す。1sの試料は過飽和に炭素を固溶しているラスマルテンサイト組織である。一方、20sのベイナイト組織の試料は粒内および粒界近傍に棒状、球状の炭化物(Fe_3C)を既に多く析出

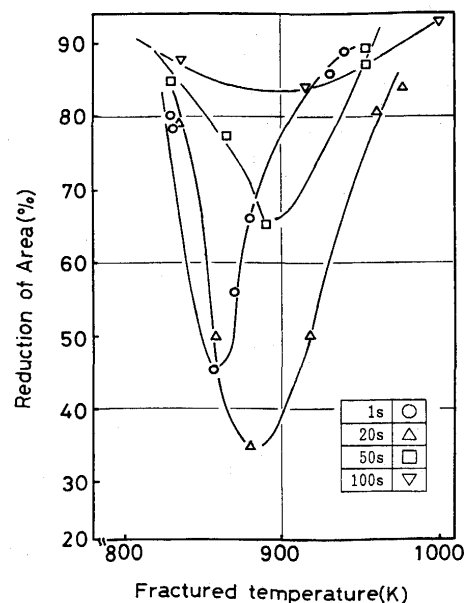


Fig. 7. Relation between the reduction of area and the fractured temperature obtained by Constant-load test on heating.

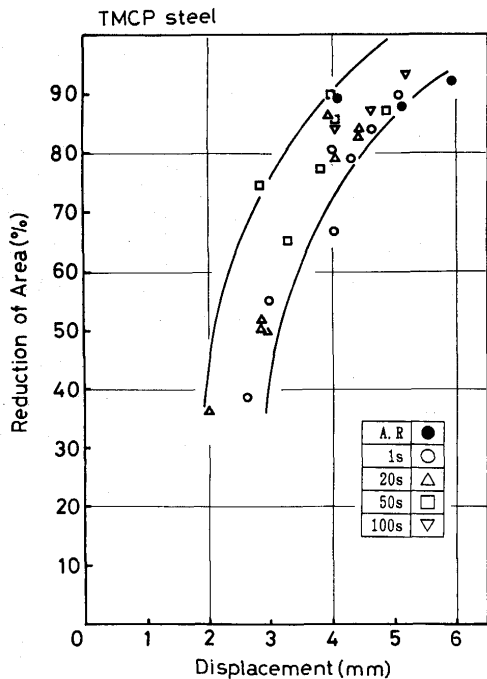


Fig. 8. Relation between the reduction of area and the displacement obtained by Constant-load test on heating.

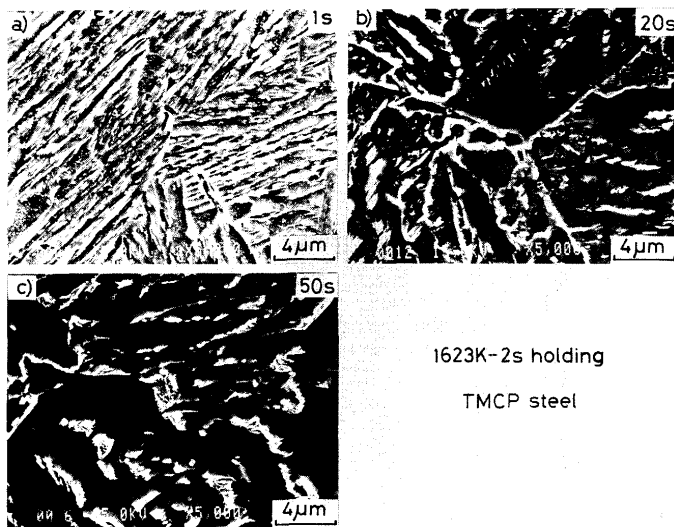


Fig. 9. Scanning electron micrographs of carbides obtained by the synthetic-weld heat treatment.

している。50sの試料では粒内界に20sの試料よりさらに大きな棒状炭化物を析出しているが、フェライトマトリックスの幅も広がっていた。

Fig.10に絞り値で極小値を示した昇温定荷重試験での負荷応力196MPaの各組織の粒界近傍のマイクロ組織を示す。1sの試料はFig. 9 (a)で示した過飽和炭素がPWHT過程で新たに非常に細かい炭化物として粒内界に均一に析出する傾向が認められる。一方、20sのベイナイト組織の試料は冷却過程で既に炭化物を粒内界に多く析出しており、PWHT過

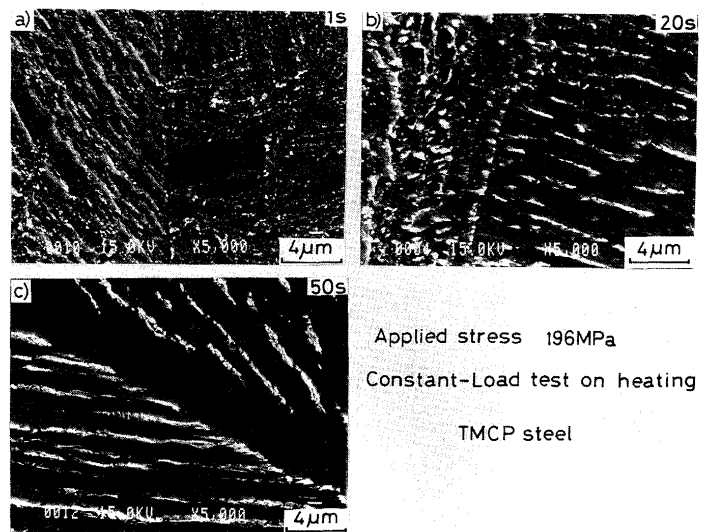


Fig. 10. Scanning electron micrographs of intergranular structures near by fractured surface obtained by Constant-load test on heating.

程では新たに析出する炭化物が少なく、粒界近傍の棒状炭化物の凝集、粗大化が見られた。50sの試料では冷却過程でほとんどの炭化物が析出しており、さらに初析フェライトの形成により粒界には炭化物は観察されなかった。

以上の観察から、ベイナイト組織の延性の低下傾向に影響を与えるのは炭化物析出挙動に伴うマトリックスの変形能の相違によるものと考えられた。即ち、PWHT過程での炭化物の析出現象はHAZ組織により異なり、ベイナイト組織の試料はPWHT過程で新たに析出する炭化物は少なく、粒界近傍の棒状炭化物が凝集、粗大化しマトリックスの塑性変形能が比較的低く応力緩和が充分でなく、昇温定荷重試験結果で示すように高温で応力を受けた場合、相対的に強度が低い粒界で破壊する傾向になったと考えられる。

一方、ラスマルテンサイト組織の試料はPWHT過程では粒内に析出する炭化物が多くなるため、マトリックスの塑性変形能も炭化物析出と共に応力緩和を起こすこととなり脆化傾向は低くなったと考えられる。ベイニティックフェライト組織の試料は応力緩和挙動でベイナイト組織の試料と同様な挙動を示すが、冷却時間が長い分、初析フェライトと粒内に析出する炭化物が安定して得られ、ベイナイト組織の試料よりもPWHT過程で析出する炭化物の量はさらに少ない。しかし、粒界フェライトが存在するため、粒界での脆化傾向は3組織の中では一番低くなったと考えられた。

4. 結言

溶接構造用高強度鋼として、水冷型TMCP鋼を用い、HAZ組織の相違による機械的性質に及ぼすPWHTの影響について実験した。特にPWHT過程でのHAZ組織の応力緩和挙動

およびHAZ延性低下について検討した結果、以下の結論を得た。

1) 各種HAZ組織での高温引張試験結果ではベイナイト組織の試料の伸びおよび絞りは他組織（ラスマルテンサイトおよび初析フェライト+ベイニティックフェライト組織）に比べて低下する傾向が認められた。

2) 昇温定歪速度試験による応力緩和挙動の結果、ベイナイト組織のものは約500K以上で応力緩和の停滞または遅延傾向が他のHAZ組織のものより明瞭に表れ、マトリックスの軟化抵抗を示した。

3) 高温強度およびHAZ組織固有の高温変形能を調べる目的でおこなった昇温定荷重試験の結果、応力緩和試験結果と同様にベイナイト組織が850~900Kで他のHAZ組織よりも著しい延性の低下傾向を示した。また、いずれのHAZ組織でも850~900Kで延性の低下を示す現象があり、本研究で用いた水冷型TMCP鋼のPWHTでは充分注意が必要であることが判明した。

4) このベイナイト組織の延性の低下の原因はSEM観察の結果、冷却過程で粒界近傍に炭化物を析出しており、PWHTでは炭化物の移動または新たに析出する炭化物は少

なく、既に析出した炭化物の凝集粗大化が起こりやすく、その結果相対的に脆弱化しやすい粒界での応力集中により破壊し、延性の低下が引き起こされたと考えられる。

5) 一方、ラスマルテンサイト組織のものはPWHT過程で析出する炭化物がほとんどで、この析出挙動とマトリックスの塑性変形能は密接に関連しており、炭化物析出は結果として良好な応力緩和および高温の変形能をもたらした。またベイニティックフェライト組織は初析フェライトを粒界に形成することにより、さらに延性は向上していた。

文 献

- 1) 小溝祐一：溶接学会誌, 59 (1990), p.498
- 2) 岡口秀治, 橋本 保, 大谷泰夫：鉄鋼の変態挙動, (1989), p.56 [日本鉄鋼協会]
- 3) 日本压力容器研究会材料部会鋼材専門委員会：500N/mm²級TMCP鋼のPWHT特性, (1990), p.1 [日本鉄鋼協会 日本压力容器研究会]
- 4) 日本压力容器研究会材料部会鋼材専門委員会：低温压力容器用TMCP鋼の諸特性, (1986), p.18 [日本鉄鋼協会]
- 5) 中村 満, 圓城敏男, 菊地靖志：溶接学会論文集, 9 (1991), p.398
- 6) M. NAKAMURA, T. ENJO and Y. KIKUCHI: Trans. Japan Welding Society, 18 (1987), p.141
- 7) 牧 正志：鋳物, 65 (1993), p.420
- 8) 改訂5版金属便覧 (日本金属学会編), (1990), p.548 [丸善]