

予熱低減型 HT780 鋼溶接部の再熱割れ感受性評価

中村 満*・堀江 皓*・富田 和良*²

Evaluation of Reheat Cracking Susceptibility of 780 MPa High Strength Steel
Welds with Low Cold Cracking Sensitivity

Mitsuru NAKAMURA, Hiroshi HORIE and Kazuyoshi TOMIDA

Synopsis : 780 MPa high strength steel with low cold cracking sensitivity was characterized by lowering carbon equivalent (C_{eq}) and weld cracking sensitivity (P_{CM}), and made a strong thermo-mechanical control process (TMCP) treatment. Therefore, these new 780 MPa steels have a good weldability. This paper has investigated the evaluation of reheat cracking susceptibility during post-weld heat treatment (PWHT), especially the relation between the stress relaxation behavior and high temperature deformability. Simulated-weld heat treatment was carried out a maximum temperature of 1623K. PWHT was done at a heating rate of 111K/ks. The results are summarized as follows : 1) From the results of stress relaxation test, reheat cracking occurred all HAZ microstructures. Especially, the reheat cracking susceptibility of Bainitic types structure were higher compared with Lath-Martensite structure. Threshold retained stress of reheat cracking was differed about 200 MPa values on both structures during PWHT. 2) From the results of the high temperature deformability obtained by constant-load test on heating, all HAZ microstructures shows the minimum embrittle value (about 5%) from 800K to 900K during PWHT. The reason of these embrittlement causes the carbide precipitation behavior during PWHT process, and exerted the effect on deformability in the matrix. 3) When the reheat cracking susceptibility and the brittleness of material were evaluated, the grasp of the deformability of HAZ microstructure in PWHT was necessary. It was important that the brittleness evaluation chart of the material was shown from the relation to a necessary the amount of displacement with the deformability of the microstructure during PWHT.

Key words : 780 MPa high strength steels; post-weld heat treatment; reheat cracking susceptibility; stress relaxation behavior; HAZ microstructures; embrittlement of HAZ.

1. 緒言

780 N/mm²級高張力鋼（以下 HT780 鋼）は溶接構造物の高層化、巨大化に伴い、下層階の居住性と有効床面積積率の改善を目指して開発された高強度鋼材である^{1,2)}。従来の HT780 鋼において溶接施工上の問題であった①炭素および合金元素添加による炭素当量(C_{eq})の増加②同様に溶接割れ感受性組成(P_{CM})の増加による低温割れの発生²⁾等の問題について、溶接性を可能な限り改善した鋼材が、本研究で用いた予熱低減型 HT780 鋼である。

この鋼材の特徴の1つとして低 C_{eq} 化があり、鋼材の圧延工程（スラブの加熱—圧延—冷却）において圧延温度と圧下量を適正に制御する新しい鋼材製造法(TMCP…Thermo-Mechanical Control Process)を用いることによって可能となったものである³⁾。

一方、これまでの TMCP 処理は HT490~520 鋼に適用され、合金添加量を減らし機械的性質及び溶接性の良好な材料が作られている⁴⁾が、依然、高強度材の HT780 鋼では低温割れ防止のため 100°C 以上の予熱作業が必要である^{1,2)}等、種々施工上の問題点が発生している。

今回用いた予熱低減型 HT780 鋼は従来の高張力鋼に含

まれる B をフリーとし、C 量を 0.09 mass% 以下と低減することにより低温割れの要因の1つである HAZ 硬さを低下させ、予熱軽減を可能にしている。また、合金添加量低減による強度不足を補うため前述の TMCP 処理が施されている。これによって結晶粒が適度に微細化し、低合金元素添加でも高強度、高韌性で溶接性が向上した材料となる^{1,2)}。

一方、著者らは高張力鋼・TMCP 処理鋼等溶接部の PWHT (Post-Weld Heat Treatment) における各 HAZ 組織ごとの脆化特性を詳細に検討しており、材質によっては溶接部（特に HAZ ボンド部）の機械的性質が大幅に低下することを報告している⁵⁻⁸⁾。このような見地から、各 HAZ ミクロ組織と PWHT 特性の相関を把握をすることは今後 PWHT が必要な原子力・压力容器等の構造材料へ、この予熱低減型 HT780 鋼を使用するために必要なデータになるとと思われる⁹⁾。

そこでこの特性を明らかにするため、本研究では予熱低減型 HT780 鋼に再現溶接熱サイクルを与え、各 HAZ 組織を得た後 PWHT を施し、異なった HAZ 組織毎の高温物性及び応力緩和挙動等を調べ、高温での脆化現象の解明及び再熱割れ発生の有無、さらに割れ発生因子として結晶粒界及び粒内の析出炭化物及び介在物の挙動に注目して HT780

平成10年3月4日受付 平成10年6月19日受理 (Received on Mar. 4, 1998; Accepted on June 19, 1998)

* 岩手大学工学部 (Faculty of Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda Morioka 020-8551)

*² 岩手大学大学院生 (Graduate Student, Iwate University)

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of HT780 steel used.

(mass%)												
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ceq	P _{CM}
.09	.21	1.07	.003	.002	.23	1.23	.45	.37	.05	.01	.49	.23
0.2%P.S. (MPa)		T.S. (MPa)		Elong. (%)	Impact Value (J/cm ²)		Hardness HV:2.94N		Grain Size (μ m)			
833		860		25	301		280~300		17~25			

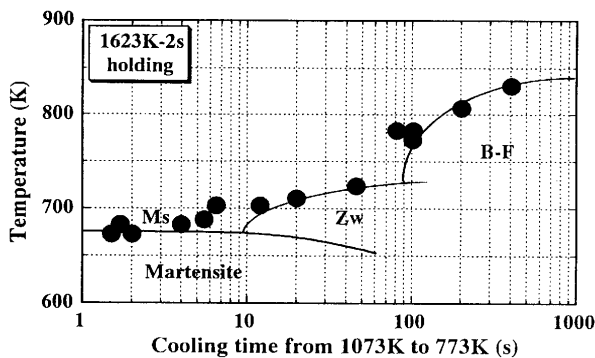


Fig. 1. SH-CCT diagram of HT780 steel.

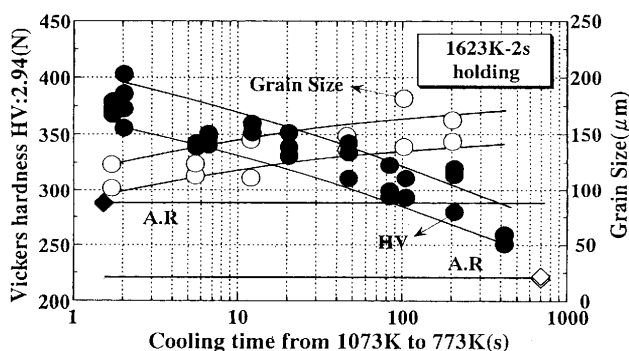


Fig. 2. Relation between Vickers hardness, grain size and cooling time from 1073 to 773K.

鋼溶接部（特にHAZ部）のPWHT特性及び再熱割れ感受性を検討した。

2. 実験方法

本実験で用いた予熱低減型HT780鋼の化学組成と機械的性質をTable 1に示す。本供試材はC:0.09 mass%, B:フリーとすることにより炭素当量Ceqを0.49, 溶接割れ感受性組成 P_{CM} を0.23に抑え, 通常のHT780鋼よりCeqで0.01~0.02%, P_{CM} で0.03%程度低下させている²⁾。引張強さは860 MPa, 硬さはHV280~300, 平均オーステナイト結晶粒径は17~25 μ m程度であった。

実験では初めに供試材に再現溶接熱サイクル処理を行った。すなわち, 1623Kまで15sで急速に昇温し, 2s保持後1073Kまで20sで冷却し, さらに1073K~773K間の冷却時間を任意に変化させることによりHAZ組織の異なる試料を作成した。これによりSH-CCT図を作成し, HAZマイクロ組織の検討を行った。次にHAZ部の強度特性評価試験と

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を行った。PWHT処理は111K/ks (400°C/h)の昇温速度で行った。昇温定歪速度試験は応力緩和挙動を測定するため, 昇温定荷重試験はPWHT過程での各HAZ組織固有の変形能および高温強度を調べる目的で行ったもので, その試験方法の詳細は前報^{7,8)}と同様である。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1に再現溶接熱サイクル処理により得たSH-CCT図を示す。冷却時間約9~10s付近でラスマルテンサイト組織が消滅し, ベイナイト組織が現れていた。ベイナイト組織は約10~100sにわたり現れており, 約100s以上ではベイニティックフェライト組織が現れていた。

Fig. 2は再現溶接熱サイクル処理後の冷却時間（以下： t_c ）とビッカース硬度値(HV)及び結晶粒径(μ m)への影響を示す。硬度値は $t_c=1.7$ s（ラスマルテンサイト組織）でHV約360~400となるが, 冷却時間が長くなるにつれ徐々に低下し $t_c=200$ sで受入れ材（以下：A.R.材）とほぼ同じ硬さとなっていた。平均結晶粒径はA.R.材が17~25 μ mであったが, 1623K-2s保持の再現溶接熱サイクル処理条件により処理後の平均結晶粒径は約100~180 μ mにまで粗大化し, 冷却時間が長くなるに従い, 徐々に粗大化する傾向を示した。

Fig. 3は各HAZ組織の中で代表的な4つのマイクロ組織を示したものである。 $t_c=1.7$ sはラスマルテンサイト組織であり, ラス状で微細なランダムな結晶方位のマイクロ組織がはっきりと観察された。 $t_c=10$ sは下部ベイナイト組織であり, 粒内に微細な粒状炭化物が析出し, ラスマルテンサイト組織に比べラス幅が広がるのが観察された。 $t_c=50$ sの上部ベイナイト組織では粒界やラメラに粗大な棒状炭化物を析出し, 粒状炭化物も多く観察された。また粒界が明瞭に表れてきており, 結晶粒が粗大化しているのが観察された。 $t_c=100$ sのベイニティックフェライト組織はラス幅がさらに広がっており, 溶接後の冷却過程で析出した炭化物が凝集し粒界やラメラ間にさらに粗大な棒状炭化物として存在していた。

Fig. 4はPWHT過程873~1073Kでの高温引張試験結果である。a) 引張強さでは $t_c=1.7$ sのラスマルテンサイト組織が873Kで570MPa, b) 0.2%耐力では520MPaとなりA.R.材や他のベイナイト系HAZ組織に比べても, 大差なく強度

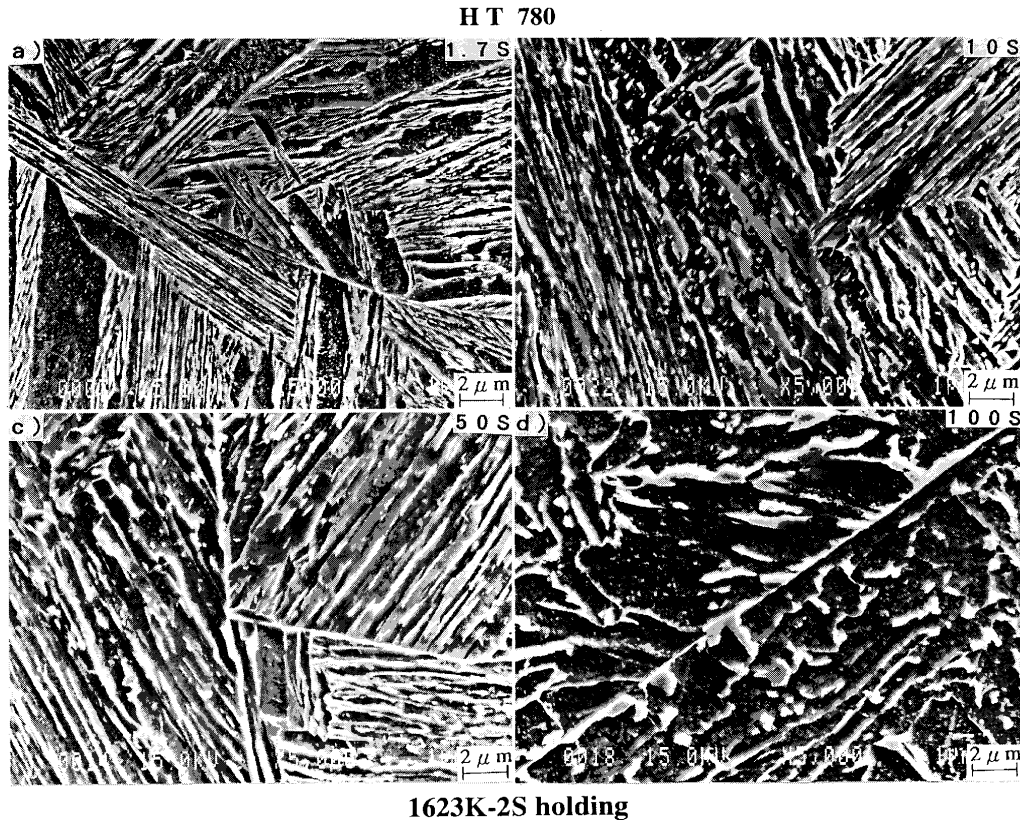


Fig. 3. Scanning electron micrographs after synthetic-weld heat treatment on HT780 steel.

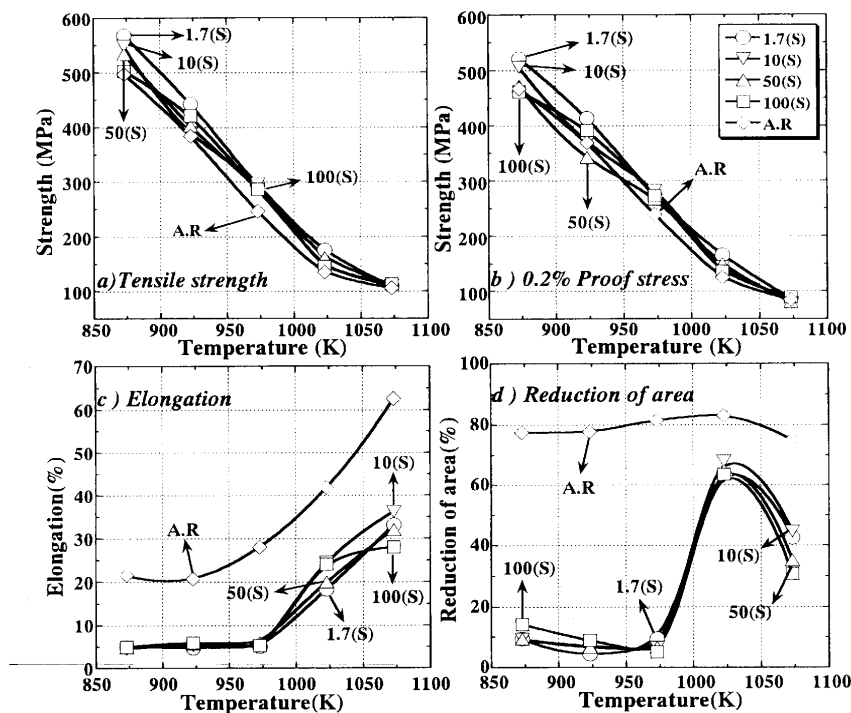


Fig. 4. Relation between the mechanical properties of high temperature and PWHT temperature.
a) Tensile strength b) 0.2% Proof stress c) Elongation d) Reduction of area

面におけるHAZ組織の相違による影響はほとんど見られなかった。一方、c) 伸びについては873~973Kで全てのHAZ組織に大幅な脆化(約5%)が観察されたが、1073Kでは $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態によって伸び値約32%まで回復する傾向を示した。d) 絞り値についても同様に873~973Kにおける脆化

(約10%)が観察されたが、1023Kでは絞り値約65%にまで回復し、1073Kで約40%まで再低下することが認められた。この傾向は他の高張力鋼には認められず⁶⁾、合金添加元素のオーステナイ化に伴う固溶または析出現象による延性低下と考えられるが、詳細は明らかでない。一方、A.R.

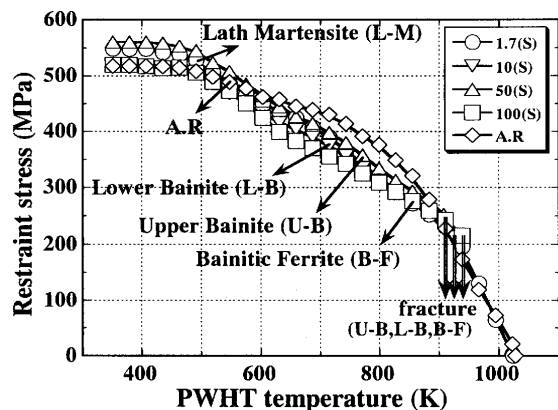


Fig. 5. Stress relaxation behavior of 5 types of microstructure obtained by Constant-strain rate test on heating.

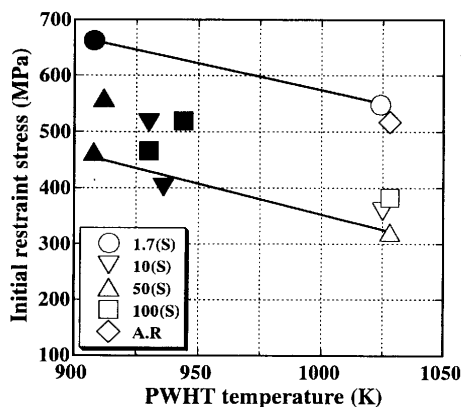


Fig. 6. Relation between initial restraint stress and PWHT temperature obtained by Constant-strain rate test on heating.

材についてはc)伸び、d)絞り共に非常に良好な延性を示した。しかし、溶接による熱影響を受けたHAZ部では873~973Kで大幅な脆化域が存在することがわかった。

Fig. 5は昇温定歪速度試験による初期応力約530 MPaでの各HAZ組織ごとの応力緩和挙動を示す。応力緩和挙動結果でもFig. 4で示した高温引張試験結果と同様に、応力緩和傾向にはHAZ組織依存性がほとんど観察されなかった。但し、 $t_c=1.7$ sのラスマルテンサイト組織とA.R.材はPWHT温度1025Kで完全に応力緩和した。一方、ベイナイト系組織では $t_c=10$ sの下部ベイナイト組織、 $t_c=50$ sの上部ベイナイト組織及び $t_c=100$ sのベイニティックフェライト組織においてPWHT温度約900~950K、残留応力値200~250 MPaで応力緩和できずに破断、すなわち再熱割れを発生した。この傾向は前報²⁾と同様であり、ベイナイト系組織は他組織に比べ再熱割れ感受性が高いことが今回の実験でも判明した。

Fig. 6は応力緩和試験における初期拘束応力値とPWHT温度の関係を示す。黒丸(●)は再熱割れ発生、白丸(○)は再熱割れ発生せずを示している。各HAZ組織とも負荷応力は異なるがPWHT温度900~950Kでいずれも再熱割れが発

生していた。ラスマルテンサイト組織の再熱割れ発生限界応力（ここでは試験片が完全に破断、分離した際の応力値で示す）は約600 MPa、ベイナイト系のそれは約400~420 MPaと考えられ、ベイナイト系HAZ組織は再熱割れ感受性がラスマルテンサイト組織と比較すると高いことが判明した。

Fig. 7は応力緩和試験により再熱割れが発生した各HAZ組織における再熱割れ破面を示す。どのHAZ組織も典型的な粒界破壊を起こしているのが観察される。 $t_c=1.7$ sのラスマルテンサイト組織では初期応力値が663 MPaと高いが、粒界表面には延性を示し白っぽく見られる凹凸が一部に観察される。一方、 $t_c=10$ sの下部ベイナイト組織では初期応力値402 MPaと他のHAZ組織に比べ最も初期応力は低い、粒界表面に延性を示す凹凸は全く観察されなかった。 $t_c=50$ sの上部ベイナイト組織、 $t_c=100$ sのベイニティックフェライト組織は共に同じ様な破面形態を示し、a)のラスマルテンサイト組織に比べては少ないが、粒界表面に一部延性を示す凹凸が観察された。これらの破面観察からも各HAZ組織ごとの再熱割れ感受性の差が見られる。

Fig. 8は同様に応力緩和試験で再熱割れ感受性が一番高かった $t_c=10$ sの下部ベイナイト組織において割れの入った粒界近傍のマイクロ組織を示す。尚、このマイクロ組織においてa)及びc)は異なる視野のHAZ組織であり、b)はa)の中心部の拡大組織となっている。b)に示す粒界観察より再熱割れは結晶粒界を連続して進展するのではなく、結晶粒界等の不連続個所に生じた小さな割れが連結、成長することでa)やc)に示すマイクロ組織のように結晶粒界に沿って破断していくことが判明した。また、割れの起点としては同様にb)に見られるように結晶粒界に析出した炭化物や介在物であり、そこから優先的に割れが発生しているのが認められた。これらの析出物をSPEED法（定電位電解選択腐食法⁵⁾により抽出し、X線回折により同定した結果、 M_3C 、 M_2C 等の存在が認められた。 M_3C とはFe、Cr等を多く含む $(Fe, Cr)_3C$ であり、 M_2C とはMo、Vを多く含む $(Mo, V)_2C$ を示している⁵⁾。これらの炭化物の粒界での存在は再熱割れ感受性に重要な影響を与えている。

Fig. 9は昇温定荷重試験で得られた各HAZ部の強度特性の内、絞り値および負荷応力と破断温度の関係を示す。負荷応力では同一応力に対してほぼ同一の破断温度となっており、A.R.材を含め各HAZ組織の相違が見られなかった。絞り値では800~900Kで全てのHAZ部が著しい脆化（絞り値5%以下）を示していた。この温度範囲はHT780鋼における焼戻し過程での炭化物の析出、凝集、それに伴うマトリックスのフェライト化及び二次硬化が急速に起こっている温度領域と考えられ、また脆性から延性への遷移領域であるとも思われる。

Fig. 10は同様に昇温定荷重試験で破断した各HAZ組織での最小の絞り値が得られた破面近傍のマイクロ組織を示す。

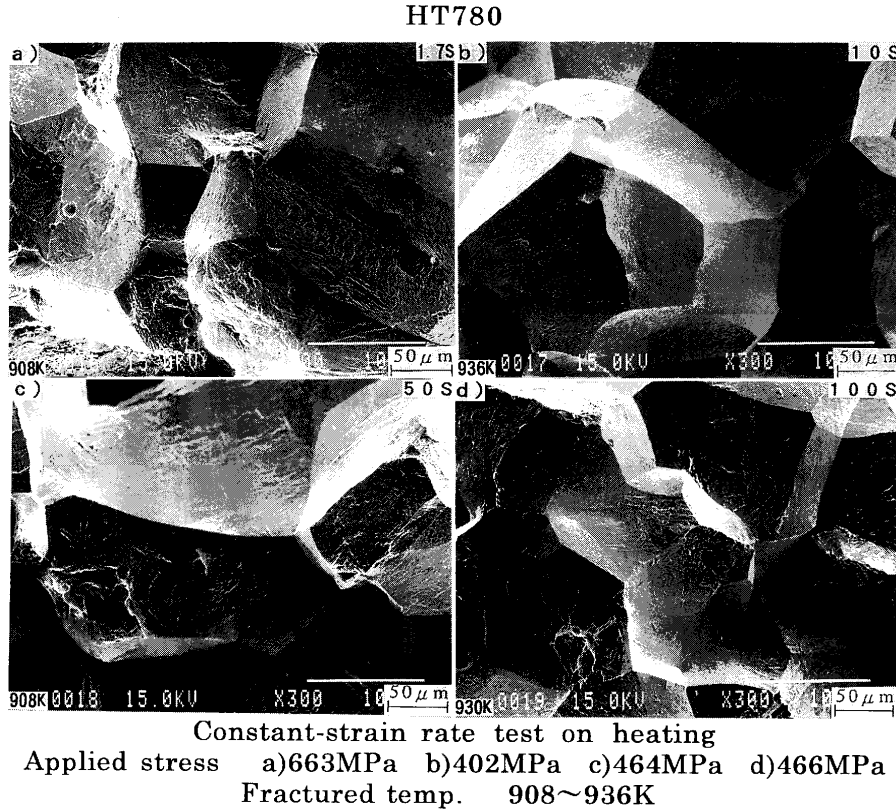


Fig. 7. Scanning electron micrographs of intergranular fracture surface obtained by Constant-strain rate test on heating.

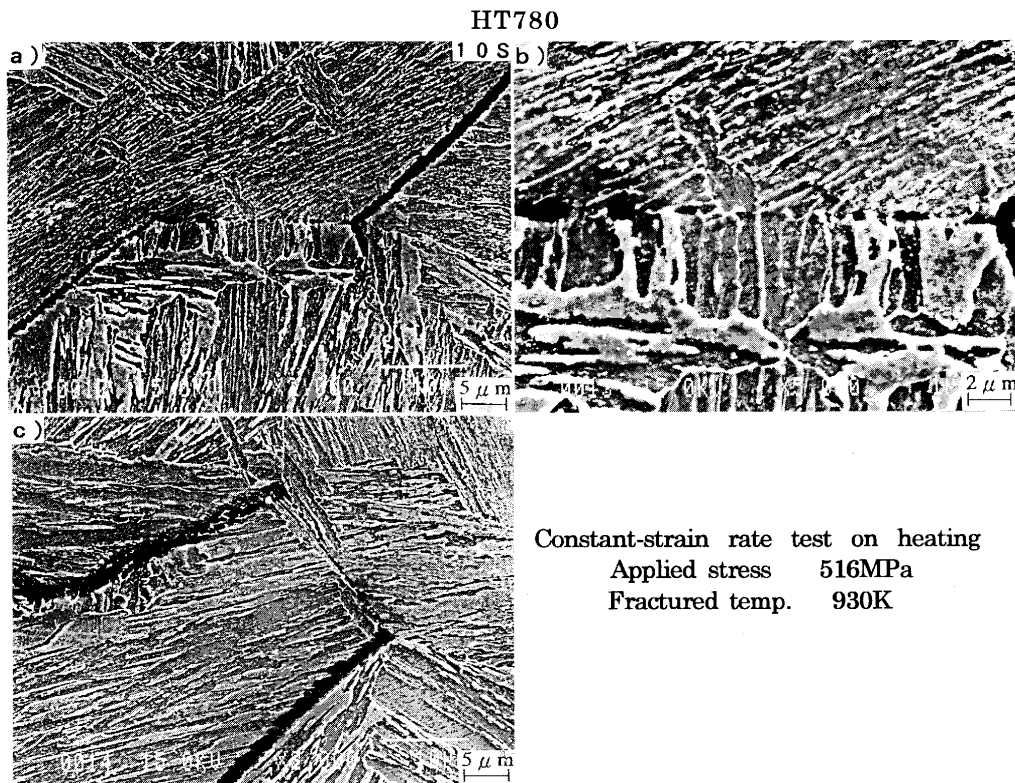


Fig. 8. Scanning electron micrographs of lower bainitic structure near by reheat cracking surface.

各組織とも粒界近傍にトラップされた炭化物の析出が見られるが $t_c=10$ s及び $t_c=50$ sのベイナイト組織でその傾向が強く見られた。1.7sのラスマルテンサイト組織では冷却過

程で観察されなかった二次炭化物(M_2C)が粒界近傍よりむしろ粒内に多数観察される。10s, 50sのベイナイト組織では冷却過程ですでに多くの炭化物(M_3C)を析出しており、

PWHT過程で新たに析出した炭化物(M_2C)は少なかった¹⁰⁾。しかし、結晶粒界近傍にトラップされた棒状炭化物が凝集、粗大化しており、このことが脆化の一因と思われる。 $t_c =$

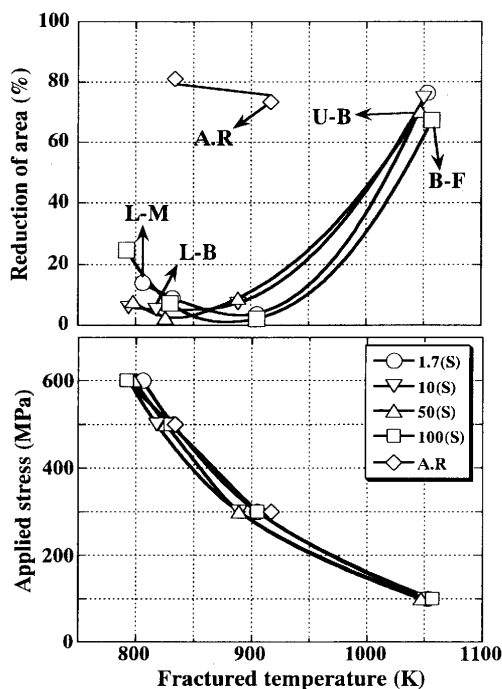


Fig. 9. Relation between the reduction of area, applied stress and the fractured temperature obtained by Constant-load test on heating.

100sのベイニティックフェライト組織では冷却過程で、ほとんどの炭化物が M_3C として析出しており、粒界近傍には新たな炭化物の析出は少ない。つまり再熱割れ感受性に影響する因子として結晶粒界に析出した炭化物に着目してみると、ベイナイト系組織ではラスマルテンサイト組織に比べ、粒界への析出炭化物が顕著に見られる。そのため材料変形時の粒界滑りが妨げられ大幅な脆化を引き起こしたと思われる^{11,12)}。また、これらの炭化物はMo·Nb·V等の炭化物生成傾向の強い合金元素が含まれている場合、より強く現れる。これは前報⁵⁾と同様の傾向でありPWHTでは充分注意が必要である。

Fig.11は前報⁸⁾で示したPWHT過程での延性・脆性評価法により各HAZ組織ごとの再熱割れ感受性及び延性・脆性評価をした図を示す。ここでDeformabilityとは昇温定荷重試験における負荷応力一定下の各々の条件における破断時の各HAZ部の変位量(C. L. values), すなわちこの試験は応力緩和がない試験であるため、HAZ部が持つ固有の変形能を示している。一方、Displacementとは昇温定歪速度試験で入力した熱膨張による変位量(C. S. values)である。この値は各HAZ部にPWHT過程で最低限必要な変位量を示している。つまりPWHT過程での材料及びHAZ部の再熱割れ発生の有無や脆化の程度を評価する場合、各種HAZ部での塑性変形能の把握が重要である。図中の変形能曲線と変位量線の交差は、熱膨張による変形量にHAZ

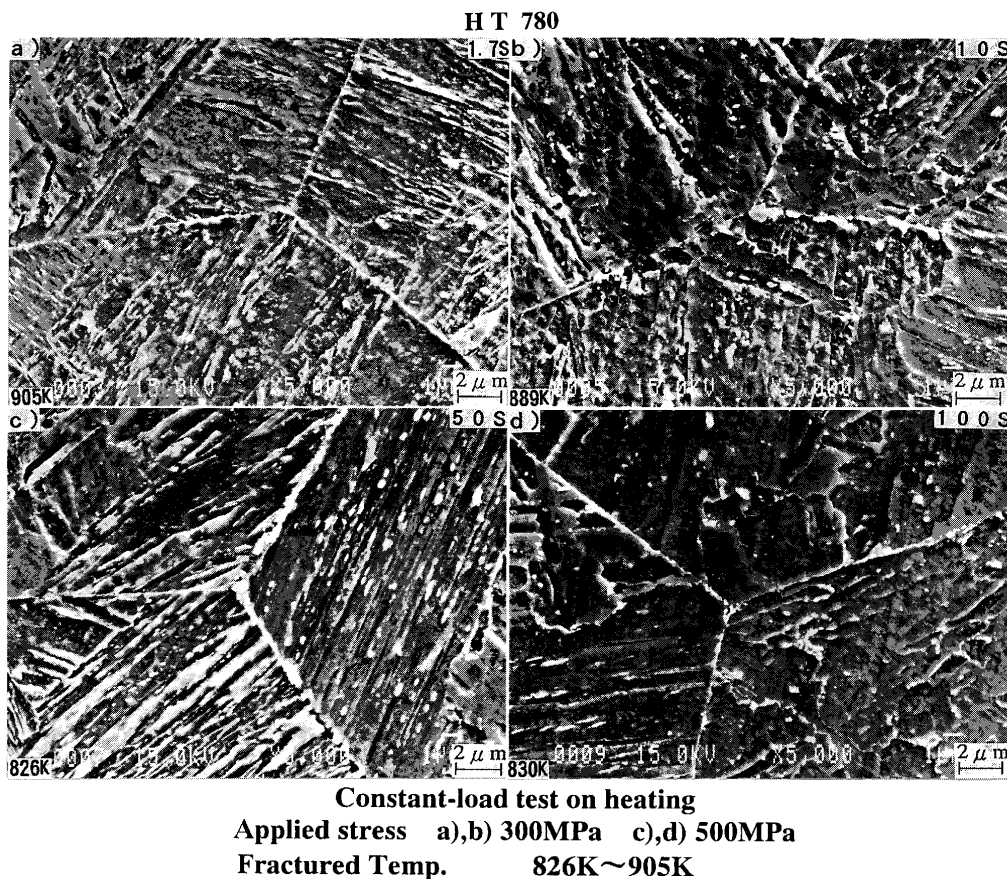


Fig. 10. Scanning electron micrographs of reheat structures near by fractured surface obtained by Constant-load test on heating.

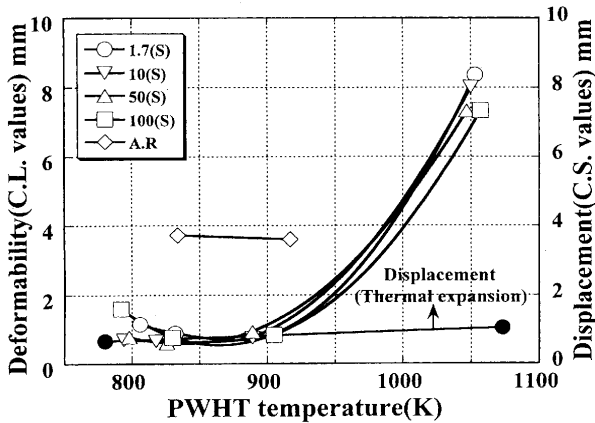


Fig. 11. Relation between the deformability of materials (Constant-load tests values) and the displacement (Constant-strain rate tests values) during PWHT process.

部が持つ塑性変形能が耐えきれないことを示しており、再熱割れの発生を意味する。いずれのHAZ部もPWHT温度800~900Kにおいて変形能曲線と変位量線が交差、つまり再熱割れが発生しており、本実験での予熱低減型HT780鋼のHAZ組織の相異による再熱割れ感受性の差はほとんど観察されなかった。

これより、全てのHAZ組織において割れが発生しておりほとんどマイクロ組織依存性がないように思われるが、再熱割れ発生限界応力値や粒界割れ破面観察等による各HAZ組織を比較するとベイナイト系組織の再熱割れ感受性が高いことが判明した。

以上の結果より、HT780鋼溶接部にPWHTを施す場合、残留応力やベイナイト組織を極力減らす施工法、すなわち設計施工段階での対策と溶接入熱量管理などの脆化防止対策が必要であると考えられた。

4. 結言

予熱低減型HT780鋼のPWHT特性を評価するため、HAZマイクロ組織ごとの結晶粒内および粒界の炭化物析出挙動に注目して検討した結果、以下の結論を得た。

1) 昇温定歪速度試験による応力緩和挙動の検討の結果、全てのHAZ組織において再熱割れが発生することが判明した。中でもベイナイト系組織の割れ感受性は高くラスマルテンサイト組織に比べ再熱割れ発生限界応力で約200 MPaの差が現れた。一方、本実験で用いた予熱低減型HT780鋼はPWHT過程における応力緩和挙動において各HAZ組織の相違による差がなく、いずれの組織でも再熱割れ感受性が他の高張力鋼と比べて比較的高いことが判明

した。

2) 再熱割れはPWHT過程で結晶粒内および粒界に析出した炭化物及び介在物が引き起こす粒内強化とそれに伴い相対的に弱い粒界が脆化することによる微視的な割れが拡大、連結を繰り返すことで粒界に沿って伝播し巨視的な割れに発展、その結果、再熱割れが発生することが確認された。

3) 高温強度および各HAZ組織固有の変形能を調べる目的で行った昇温定荷重試験の結果、全てのHAZ組織が破断温度800K~900Kで最も脆化し、絞り値で極小値が5%以下となることが判明した。

4) これらの脆化原因はPWHT過程における炭化物析出挙動がマトリックスの塑性変形能に影響を及ぼしたためだと考えられる。また、これらの炭化物はMo・Nb・V等の炭化物生成傾向の強い合金元素が含まれている場合は、より顕著に現れる。

5) 材料の再熱割れおよび脆性を評価する場合にはPWHT過程における各HAZ組織ごとの塑性変形能の把握が重要であり、HAZ部での塑性変形能とPWHTに必要な変位量との関係から材料の脆化評価図を示した。これにより、予熱低減型HT780鋼にPWHTを施した場合いずれのHAZ組織においても再熱割れが発生し、PWHT温度800~900Kにおいて大幅に脆化することが判明した。

終わりに本研究の一部は、本協会の鉄鋼研究振興資金による助成により遂行したことを付記し、関係各位に厚く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 尾上久浩, 金谷 研, 家澤 徹, 堀井行彦, 小山邦夫, 小堀 威: 溶接技術, **42** (1994) Aug., 106.
- 2) 岡村義弘, 奥島基裕, 田中睦人, 為広 博, 山場良太: まてりあ, **34** (1995), 638.
- 3) 鉄骨製作管理技術者テキスト: 全国鉄構工業連合会編, No. 7 (1997), 34.
- 4) 百合岡信孝: 溶接学会誌, **61** (1992), 298.
- 5) 中村 満, 圓城敏男, 菊地靖志: 溶接学会論文集, **7** (1989), 496.
- 6) 中村 満, 圓城敏男, 菊地靖志: 溶接学会論文集, **9** (1991), 398.
- 7) 中村 満, 田頭孝介, 堀江 皓, 梶原英司, 川島宏貴: 鉄と鋼, **80** (1994), 406.
- 8) M.Nakamura, H.Horie, K.Tagashira and H.Kawashima: *Welding Int.*, **10** (1996), 632.
- 9) 田中甚吉: 溶接学会誌, **65** (1996), 196.
- 10) 牧 正志: 鋳物, **65** (1993), 420.
- 11) R.J.Bowers and E.F.Nippes: *Welding Research Supplement*, **75** (1996), 356S.
- 12) 玉置維昭, 今井兼敬, 鈴木実平, 堀井行彦, 熊谷達也: 溶接学会論文集, **13** (1995), 256.