

9Cr フェライト系耐熱鋼の HAZ 模擬熱処理材における組織自由エネルギー

名古屋大学[院] ○竹田広太郎、岩下和尋 名古屋大学 村田純教、森永正彦
新日本製鐵(株) 長谷川泰士、森本裕

System free energy of HAZ in 9Cr ferritic heat resistant steel prepared by the simulated heat treatments

Koutarou TAKEDA, Kazuhiro IWASHITA, Yoshinori MURATA, Masahiko MORINAGA,
Yasushi HASEGAWA, and Hiroshi MORIMOTO

1 緒 言

高 Cr フェライト系耐熱鋼では、溶接熱影響部 (HAZ) 外縁で発生する低延性型の局所的なクリープ損傷である「Type IV 型損傷」が大きな問題となっている¹⁾。その原因を明らかにし、対策を講じるには HAZ が受ける熱履歴に伴う組織変化を定量的に評価する必要がある。そこで、本研究では、HAZ 部を再現した多重熱サイクルを施した 9Cr フェライト系耐熱鋼について、組織情報に関する定量的な熱力学的指標である組織自由エネルギーを評価し、クリープ強度との関連を調査することとした。

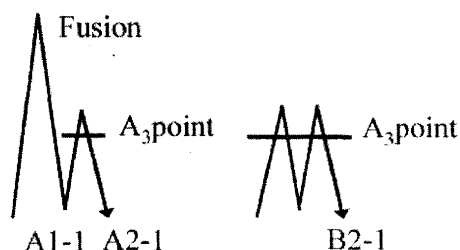
2 実験方法

2.1 試料

供試材として 9Cr フェライト系耐熱鋼 (Gr.92 鋼) の調質材を用いた。この材料に溶接熱履歴を模擬して以下に示す種々の熱処理を施した。

- A1-1: 1400℃まで急熱・急冷する Bond 相当熱サイクル。
A2-1: A1-1 の処理後に、 A_3 点直上の HAZ 外縁相当(細粒域再現)短時間加熱サイクルを行う。
A4-1: A2-1 の処理後に、740℃, 1h の溶接後熱処理(PWHT)を行う。
B2-1: HAZ 外縁相当熱サイクルを 2 回行う(多重 HAZ 外縁相当熱サイクル)。
B4-1: B2-1 の処理後に、740℃, 1h の PWHT 処理を行う。

Fi coarse grain HAZ fine grain HAZ



A4-1 and B4-1 are PWHTs after
A2-1 and B2-1, respectively.

i
c diagram showing the simulated HAZ thermal cycle

2.2 組織自由エネルギー

組織自由エネルギーとは、弾性歪エネルギー、界面エネルギー、および化学的自由エネルギーの総和としての自由エネルギーである。変態、析出、析出物成長などの組織変化は組織自由エネルギーが低下する方向に進行することが知られている。ただし、ラスマルテンサイト系では、旧オーステナイト粒界やマルテンサイトパケットおよびブロックといった界面エネルギーは弾性ひずみエネルギーに比べ極めて小さくなることが知られている²⁾。そこで、本研究では組織エネルギーを化学的自由エネルギーと弾性歪エネルギーの和として評価することとした。

一方、著者らの研究で、マルテンサイト変態に伴う弾性歪エネルギーは炭化物析出に伴うひずみエネルギーに比べて、桁違いに大きいことが分かっている。また、耐熱鋼のように炭素量が少ない鋼におけるラスマルテンサイト相は変態ひずみを転位として蓄えている。そこで、HAZ 模擬熱サイクルを施した試料における弾性歪エネルギーを、試料に蓄積された転位密度から評価した。転位密度測定は X 線回折(XRD)により求めた。X 線回折ピークの半値幅は結晶内の歪および結晶粒サイズにより変化することが知られている。本研究では Modified Williamson-Hall 式および Modified Warren-Averbach 式を用いて X 線回折ピークを解析し、結晶粒サイズの因子と歪の因子を分離することにより転位密度を求めた²⁾。

化学的自由エネルギーについては、Thermo-Calc を用いて、MX 炭窒化物、 $M_{23}C_6$ 炭化物の析出の時間変化を考慮した熱力学計算により算出した。

3 実験結果

Fig.2 に転位密度測定に基づいて算出した模擬熱処理材における弾性歪エネルギーを示す。A1-1、A2-1 および B2-1 材における弾性歪エネルギーは 10~10.5J/mol であり、これらの試料間で大きな差は認められない。しかしながら、PWHT を施した A4-1 および B4-1 材の弾性歪エネルギーはそれぞれ 3.5J/mol、1.37J/mol と急激に低下した。

Fig.3 に、各試料における化学的自由エネルギーの値を示す。これらのエネルギー値は、抽出残渣測定により求

めた各試料の 1mol あたりの析出相の量を基に、Themo-Calc を用いて求められた。その析出相量を Table1 に示す。

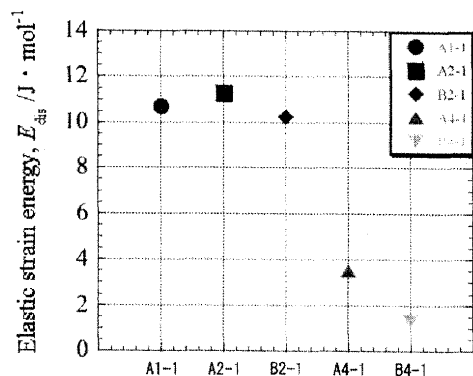


Fig.2 Elastic strain energy in samples after the simulated HAZ thermal cycle.

Fig.3 と Table 1 から、A1-1 材では、MX 型炭窒化物の析出もごくわずかであることにより、高い化学的自由エネルギー値を示している。これに対し、A1-1 材に加熱サイクルを加えた A2-1 材では、化学的自由エネルギーは A1-1 材に比べ約 50J/mol 低下するが、これは MX 型炭窒化物の析出量が増えたことによる。また、A₃ 点直上の加熱サイクルを 2 回受けた B2-1 材では化学的自由エネルギーが A2-1 材に比べ、約 30J/mol 小さくなった。これは B2-1 材で MX 型炭窒化物の析出量が多くなっていることによる。

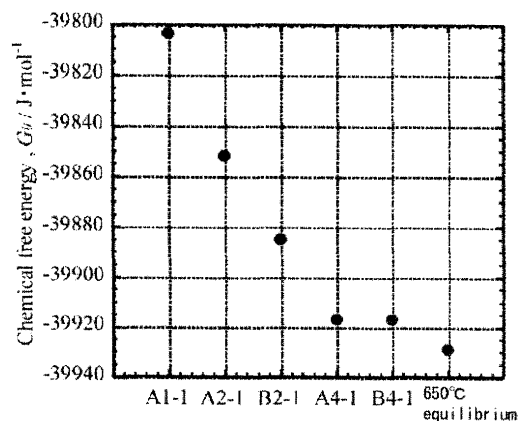


Fig.3 Chemical free energy of samples after the simulated HAZ thermal cycle.

これに対し、PWHT 処理を受けた A4-1 および B4-1 材では、M₂₃C₆ 炭化物量はほぼ 740℃での平衡量となったことを反映して、その化学的自由エネルギーは両試料ともほぼ 740℃での平衡値である -39916.76J/mol となった。

Fig.4 に HAZ 領域各部に対応した最高加熱温度を施した模擬熱サイクル材のクリープ破断寿命を示す³⁾。この結果から、最もクリープ破断寿命が低下するのは最高加熱温度が A_{C3} 点直上となる 1000℃の HAZ 再現熱サイク

ルの場合であり、今回の試料では B4-1 材に相当する。B4-1 では、弾性歪エネルギーの値が模擬熱処理材中で最も小さかった。これらのことから、TypeIV型損傷が発生する細粒域 HAZ では、エネルギーの値が粗粒域 HAZ に比べて小さいことがわかった。

Table 1 The amount of precipitates obtained from the extracted residues.

	A1-1	A2-1	B2-1	A4-1	B4-1	650°C equilibrium
α phase(g)	55.9	55.8	55.8	54.9	54.9	53.9
MX(g)	0.014	0.078	0.13	0.16	0.16	0.096
M ₂₃ C ₆ (g)	0	0	0	0.84	0.84	0.86
Laves(g)	0	0	0	0	0	0.95
Z phase(g)	0	0	0	0	0	0.10

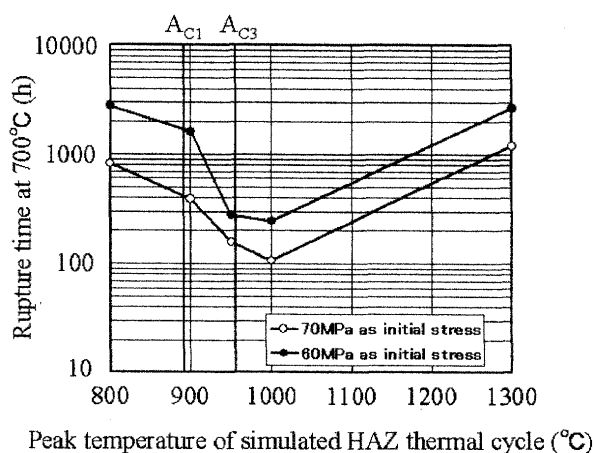


Fig.4 Creep lives of simulated heat treatment samples for peak temperatures correspond to the each part of HAZ.

4 結言

9Cr フェライト系耐熱鋼の HAZ を再現した多重熱サイクルを施した種々の試料について、ひずみエネルギーと化学的自由エネルギーを主として評価することにより組織自由エネルギーとクリープ破断試験結果の関連を評価した。その結果、組織自由エネルギー値がもっとも低下した B4-1 材でクリープ破断寿命が最も短くなることがわかった。このことから、TypeIV型損傷の発生する細粒域 HAZ のエネルギーの値は粗粒域 HAZ のそれに比べて低いことがわかった。

参考文献

- 1) M.C.Coleman, J.D.Parker and D.J.Walters : Int.J.Press.Ves. &Piping, 18 (1985) 277.
- 2) T.Kunieda, M.Nakai, Y.Murata, T.Koyama, M.Morinaga : ISIJ International vol.45 (2005) No.12
- 3) 長谷川泰士, 村木太郎, 大神正浩, 鉄と鋼 vol.90 (2004)