Fe-Al-2% C 合金鑄放し材の加熱による性質の変化*

西 田 恵 三** 田 上 道 弘**

Keizo Nishida and Michihiro Tagami: The Effect of Heating on Some Properties of the Chill-Cast Fe-Al-2% Al Alloy. The Fe-Al-2% C alloys with up to 20% Al were heated up to 900°C from the chilled state by cyclic heating and isothermal heating, and changes in the structures, hardness, graphitization and growth, were examined. The results obtained were as follows:

(1) The alloys with 1~4% Al showed a remarkable softening by the cyclic heating due to the graphitization. With more than 10% Al, however, the hardness remained unchanged (about 450~500 Hv).

(2) On the isothermal heating (for 3.5 hrs), the alloy with 4% Al showed the maximum growth at about 650°C, and at higher temperature it rather decreased. Other alloys showed a similar behavior, but with more than 10% Al no growth was shown.

(3) From the change in dilatation due to the eutectoid-type reaction and its reaction temperature on the cyclic heating, it appears that the limiting composition showing such a reaction is up to about 7% Al and that the reaction temperature increases up to about 815°C with 7% Al.

(4) As compared the structures of these alloys with the existing phase diagram, there are no great differences except the rise of the eutectoid-type reaction temperature.

(Received August 25, 1965)

I. 緒 言

Al が鉄鋼に対する合金元素として利用される分野は、MT 鋼⁽¹⁾のごとく磁気的方面ではよく知られているが、さらに耐酸化性はもちろん、耐硫化性においてもすぐれた性質を与えることが知られ⁽²⁾、また鋳鉄においても耐食効果のあることが認められてきた⁽³⁾。しかし鋳鉄に Al 添加して耐硫化性材料として使用する場合、Si と同様にある組成で著しく黒鉛化作用があり⁽⁴⁾、これがため高温使用中に局部的材質の変化が起り、亀裂、破壊などを生じ使用不能となることが考えられる。したがって Al 鋳鉄を有効な耐硫化性材料として使用するには、この黒鉛化を完全に阻止するか、あるいは最初から黒鉛化させて安定な状態にするかのいずれかの手段を考えねばならない。それゆえ、耐硫化性材料としての効果をあげるためには、まず Fe-Al-C 合金の加熱に伴う諸性質の変化を研究する必要がある。

鋳鉄に Al 添加したときの影響についての研究は、古くは沢村⁽⁵⁾の研究があり、またこれら合金の状態図の研究としては、Keil, Jungwirth⁽⁶⁾, Sohnchen, Piwowarsky⁽⁷⁾などおよび Morral⁽⁸⁾がそれぞれ行なっているが、最も新しいと思われる状態図としては、Lohberg, Schmidt らの研

究がある⁽⁹⁾。彼らによると、Fig.1 に示す通り、4% Al 付近で著しい黒鉛化を示すが、約 10~16% Al の範囲では完

Fig.1 Graphitization in aluminum cast iron.

全に黒鉛化は起らず、さらに約 18% Al 付近から再び急激に黒鉛化を見ることが示されている。しかしながら、この図の変化はすべて共晶組成の融体から冷却凝固させたものであり、Al 含量の変化とともに C 含量は当然共晶線に沿って変化してくるはずである。したがって、一定炭素量の鑄放し Fe-Al-C 合金が、加熱によりいかなる挙動を示すか、黒鉛化を生ずるならば、いかなる Al 組成で生ずるか、またこれに伴って機械的性質はどう変るかなどをしらべるために、本実験では、とくに 2% C 一定の各種 Al 含量の Fe-Al-C 合金(約 20% Al まで)試料について、各種加熱方法による熱膨張、硬度など各試験結果を比較し、さらにそのとき得られた組織を比較検討し、上述の状態図とも比較を行なつた。

II. 実 験 方 法

1. 試 料

- (8) F.R. Morral: J. Iron and Steel Inst., **28**(1934), 419.
(9) K. Lohberg and W. Schmidt: Arch. Eisenhütt., **11**(1938), 607.

** 室蘭工業大学金属工学科 (Department of Metallurgy, Muroran Institute of Technology, Muroran)

* 1965 年 4 月東京大会に発表。

- (1) 三島, 牧野: 日本金属学会分科会報告, No. III (1950) 第 9 分科会 p.16.
(2) E.B. Backensto et al: Corrosion, **18**(1962), 253 t.
(3) 塩沢, 中井: Rep. Castings Res. Lab., No.5 (1954), 11; 西田: 電気化学, **26**(1959), 650.
(4) 西田: 室工大研報, **3**(1959), 221.
(5) 沢村: Mem. Kyoto Imp. Univ., **4**(1926), No.1.
(6) O.V. Keil and O. Jungwirth: Arch. Eisenhütt., **4**(1930~31), 224.
(7) E. Sohnchen and E. Piwowarsky: Arch. Eisenhütt., **5**(1931), 17.

試料は電解鉄，純黒鉛 (0.2% 灰分) を高アルミナルツボを使用して高周波溶解後，これに純 Al (99.99%) を添加し，

2. 組織および硬度の変化について

Table 1 Chemical composition of specimens (wt%).

Name of specimen	Al-0	Al-1	Al-3	Al-4	Al-7	Al-10	Al-12	Al-20
Total C	2.05	2.07	2.01	2.04	1.92	2.10	2.03	1.96
Sol. Al	0.45	1.54	2.86	4.56	7.02	9.85	11.50	19.98
Insol. Al	0.015	0.	0.006	0.004	0.07	0.003	0.070	0.013

溶湯温度 1450°~1500°C から室温 鑄鉄金型 (5.5 mmφ×90 mm×6 本) に鑄込んだものを約 5.0 mmφ×80 mm に仕上げ実験試料とした。

Table 1 には使用した試験片の分析結果を示した。

2. 実験方法

(1) 装置は川鉄式自記熱膨張計を用い，毎分 4°C の加熱速度で 900°C まで上昇し，この温度で 3.5 hr 保持後，再び同速度で冷却する方法を 2 回まで繰返した。これをそれぞれ 1 回，2 回加熱サイクルと呼ぶ。

(2) 上記装置で最初から所定の温度 (600°~900°C) 3.5 hr 保持後冷却を行なつた。この方法を恒温加熱と呼ぶ。またとくに加熱に伴う黒鉛化率を求めるため，別の炉を用い同様の加熱を行ない，これらを分析試料に供した。なお上記実験はいずれも 10⁻³ mmHg の真空度であつた。

加熱前後における試料の組織検出においては，試料を 4 等分し，上部から各断面の組織を比較観察して標準的なものを求めた。また硬度は，ビッカース硬度計を用い，各断面での値を平均したものを採用した。

III. 実験結果ならびにその考察

1. 温度-伸び曲線の分類について

自記記録式熱膨張計による試料の加熱サイクルの様相を一括すると，Fig. 2 のごとくに大別される。この図による

Fig. 2 Classification of the dilatation curve for each alloy, where (a): Al-0, Al-7 in I, (b): Al-1, Al-3, Al-4 in I (c): Al-7 in I and Al-1, Al-3, Al-4 in II (d): Al-12, Al-20 (e): Al-10 in I and Al-10, Al-12, Al-20 in II, in which I refers to one heating cycle and II to two heating cycles.

と 2% C では，ある Al% 以上の合金では変態点が存在しないこと，最初は幾分収縮しても以後安定な組織を示す組成があること (e) 型，また (b) 型の様な低温での膨張が 2 回目には消失すること (c) 型などが特色である。

鑄放し状態と加熱サイクルに伴う硬度の変化を示すと Fig. 3 のごとくである。またこれに対応した組織を Photo.

Fig. 3 Comparison of hardness for each alloy through cyclic heatings with that of as-cast state.

1 に示した。鑄放し硬度で Al-1 が高く，ついで Al-3, Al-4 が幾分軟化することは，マルテンサイトの組織がオーステナイトの組織の残留に変わるためと思われる。またこれらの判断は，先の温度-伸び曲線で 1 回目低温で示された収縮現象が 2 回目の加熱では現われないことから推測される。これらの試料は加熱により黒鉛化が進んで硬度は著しく低下する。Al-7 は鑄放し状態で最高硬度であるが，これはオーステナイト中における K 相の析出過程にもとづくものと考えられ，700°~750°C の範囲で比較的短時間の加熱で軟化することからも予想される。高 Al 側では K 相とフェライト相のみが存在しているが，これは加熱によつてほとんど変つていない。

3. 加熱に伴ういわゆる成長について

Fig. 4 は 1 回，2 回加熱サイクルに伴う各試料の伸び (%) を示した。これから，1 回，2 回加熱サイクルとも Al-0, Al-10 はほとんど変化がないが，その間では 1 回目が 2 回目に対し著しい成長を示す。一方 Al-10 以上では，2 回目はあまり変化ないが，1 回目は収縮を示し，Al-20 で 0.3% に達した。以上の事実

から全成長は 2 回の和であり，最高 Al-4 の場合，約 2.15% の成長を示す。

↑ 別の実験で 700°C 約 1 hr の加熱により 400~500 Hv に軟化することを認めた。

Photo.1 Structure of alloys heat-treated as well as as-cast ($\times 400$).

4. 恒温加熱に伴う組織、伸びの変化

Fig. 4 Comparison of growth for each alloy through two cyclic heatings.

Fig. 5 Comparison of growth for each alloy 600°C~900°C through isothermal heating for 3.5 hrs.

つぎに恒温加熱を行なったときの伸びの量(%)を示すと Fig. 5 のごとくである。図から、伸びは Al-4 で最大になり、ついで Al-3, Al-1 の順で減少しているが、Al-0, Al-1⁰ ともにほとんど成長しない。一方 Al-12 は高温ほど収

縮現象を示す。また高温になると成長量が増し、さらに高温になると減少を示す試料は、後述のごとく状態図にもとづく固溶炭素量の温度による変化と関係していると思われる。Al-4 について組織上からさきの加熱サイクルのものと比較した場合、両方とも完全に黒鉛化が完了していると推察されるが、成長量が前者では 2.15%、一方恒温加熱では 1.35% と著しく異なることが認められる。

5. 恒温加熱に伴う硬度、黒鉛化率の変化

各加熱時間における硬度の変化と黒鉛化との関係を知るため、別の真空炉で恒温加熱を行なつて得た結果を Fig. 6 (a)~(c) に示した。硬度は鋳放し状態の不安定な組織が、その温度で安定な組織に進行するために起るものと、セメントタイトの消失による黒鉛化の生成で影響されるが、大体その変化は黒鉛化と対応している。また黒鉛化の起り方で、鋳放し状態の不安定な組織が、初期黒鉛化をある程度促進すると考えられるものが、Al-1 に見られ、一方 Al-4, Al-3, Al-7 などは高温ほど早く黒鉛化がはじまるもその量が少なく、これは先述の成長量とも関連している。

Fig. 7 Growth for each alloy occurred in its eutectoid-type reaction during cooling.

6. 加熱サイクル中に認められる現象

(1) 変態に伴う伸び、変態温度について

1 回、2 回加熱サイクルの冷却で、いわゆる共析変態における伸び(%)を各試料に対して示したのが Fig. 7 である。1 回目は 2

Fig. 6 Graphitization and the change of hardness for some alloys during an isothermal heating at some temperatures.

回目比べて著しい伸びを示すが、両者とも Al-1 で最大になり、高 Al 側ほど減少し、Al-7 で消失することが推定

Fig. 8 Change of reaction temperature of eutectoid-type reaction with Al content.

される。これは、セメンタイト+フェライトの生成、消失か、または黒鉛+フェライトの生成、消失に相当するものかただいまのところ不明瞭である。また Fig. 8 に 1 回、2 回加熱サイクルで加熱、冷却に現われる変態温度を示した。1 回、2 回ともばらつきは多いが、Al 含有量によって変化し、Al-7 では約 815°C に上昇することが推定される。

Fig. 9 Composition section at 2% C postulated from the phase diagram of an Fe-Al-C system proposed by Löhberg and Schmidt.

7. 既存の状態図による検討

既存の状態図で最も広範な新しい研究結果と思われるのは、Löhberg, Schmidt によるものであるが、これを参考にして当面必要な 2% C の Fe-Al 合金状態図は、彼らの近似組成の状態図や模型作成による解釈によつて、Fig. 9 のごとく作成した。ここで炭素鋼の A₁ 変態点が約 9.5% Al まで続いており、しかも一定温度であることは、さきの実験事実と一致しない。その他の点、とくに高 Al 側 (700°C 付近) では $\alpha + K$ であることは事実と合致しているし、その他の点でも大した異論がないようである。したがって大体本状態図は低 Al 組成側については使用してよいが、共析変態点については、さらに詳細な研究を必要とするであろう。

IV. 結 言

以上の諸実験結果を総合して示せばつぎの通りである。

(1) 繰返し加熱に伴う組織の変化は 1~4% Al 範囲の組成で著しく軟化を示したが、これは黒鉛化によるものと思われ、したがって著しい成長も示した。約 10% 以上の合金ではほとんどその変化は少なく、大体 450~500 Hv の硬度を保持した。

(2) 恒温加熱では、約 4% Al 合金がやはり約 650°C で最高の成長を示した。他の試料も類似の傾向を示したが、高温ほど成長量は減少している。一方約 10% Al 以上ではほとんど成長を示さなかつた。

(3) 繰返し加熱、冷却の際認められるいわゆる共析変態に伴う伸縮量およびその発生温度から判断すると、これら変態を生ずる組成は約 7% Al までであり、しかも変態温度は 7% Al で約 815°C まで上昇すると考えられる。

(4) 既存の状態図と比較した結果いわゆる共析変態点の上昇に関しては著しい相違があるも、その他の点については低 Al% の範囲内においては大きな相違は認められない。

最後に本実験を行なうために、困難な試料の調製に御協力を賜わつた K K 日本製鋼所前川、中川両博士に感謝すると同時に実験遂行上御協力下さつた岡部 誠、矢野信三、笠松紀男、寿原康紘各工学士に謝意を表します。