中炭素 Si-Mn 鋼のベーナイトおよびマルテンサイト 變態に関する磁氣的研究*

小野 健二** 根本 正** 八重樫 敏雄**

Kenji Ono, Tadashi Nemoto and Toshio Yaegashi : Study on Transformation Mechanism in Bainite and Martensite Transformation Ranges for Si-Mn Steel by Magnetic Analysis.

Previously isothermal transformation diagrams of four kinds of Si-Mn Steel were determined and the mechanism of the isothermal transformation at various temperature was elucidated. The present research was also carried out, mostly by magnetic analysis, on the decomposition of austenite in the intermediate and martensite transformation ranges; on the influence of holding time at isothermal transformation upon subsequent bainite and martensite transformations during cooling; on the influence of transformation temperature on the transformation process; on the influence of holding time at transformation temperatures on the amount of the residual austenite; and on the influence of holding time at 400° on hardness by micro-hardness measurement. We arrived at the following conclusions; (1) The decomposition of austenite is not completed by isothermal transformation, therefore at the end of transformation a considerable amount of residual austenite remains. (2) The length of holding time of isothermal transformation has the effect of progressively lowering the temperature of the subsequent transformation on cooling. (3) On heating the residual austenite decomposes in two stages at temperatures between 200 and 500°.

(Received June 30, 1953)

I. 緒 言

先に著者等は C 0.45~1.2% の範囲で C 量を變えた 4 種の Si-Mn 鋼の中間段階における變態機構について實驗

を行つた際⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 時間-硬さ曲線において二次的に硬さが増加することをみとめた。これは中間段階において $\gamma \rightarrow B$ と

* 日立製作所日立研究所

* 1953年10月本會仙臺大會に發表; 討論592頁参照,

(1) 小野, 根本, 日本金屬學會秋期講演大會, (1949).

(2) 小野, 根本, 日本金屬學會春期講演大會講演梗概, (1950), p. 79.

(3) 根本, 日立評論, 32 (1950), 28.

$\gamma \rightarrow M$ と兩變態が生起することによると考えた。その後再び恒温磁氣分析装置を用いて變態速度、變態中途から常溫までの冷却途上における二次 Ar'' 變態の生起状況、恒温保持時間と γ_R との関係、深冷處理ならびに加熱による γ_R の分解の様相を究明した。以下本實驗について記述する。

II. 試料および實驗

1. 試 料

電解鐵、白銑、Fe-Si および電解 Mn を配合して中炭素 Si-Mn 鋼を高周波電氣爐により熔製した。これを 8mm ϕ に鍛伸後旋削により磁氣測定試片 (5 mm ϕ ×70 mm) と顯微鏡および硬さ測定試片 (8 mm ϕ ×15 mm) を作成した。次いでこれらを真空中で A_1 變態點の上下に反復加熱および冷却して炭化物を球狀化させた。Table 1 は試料の化學成分および變態點を示す。

Table 1 Chemical Composition and Transformation Range.

Chemical Composition (%)			Transformation Range			
			Heating		Cooling	
C	Si	Mn	Begin	End	Begin	End
0.64	1.46	1.12	755	775	678	650

2. 恒温磁氣分析裝置

變態の進行状況はすべて恒温磁氣分析裝置により求めた。本裝置は彈動檢流計による裝置を改良し交番磁場内で測定し得るように逆轉法による手数を省いたものである。Fig. 1 は裝置の概略を示すが詳細はすでに報告されてあるので省略する⁽³⁾。

Fig. 1 Apparatus of Magnetic Analysis.

3. 熱 處 理

最高加熱溫度 900° から變態溫度 400~100° の範圍で 50 おきの各溫度に恒温處理を行い、變態進行に伴う磁氣および硬さの變化から變態速度を求め、次いで變態中途の種々の保持時間から冷却し、溫變降下に伴う磁氣變化より二次 Ar'' 變態生起溫度を求めた。またこれら試片の一部を -170° の液體酸素に浸漬したものおよびしからざるものについて 600° までの磁氣分析を行い γ_R の分解様相を究明した。またすべての硬さ試片について檢鏡した。

III. 實驗結果

Fig. 2~5 は變態溫度 400~250° における磁氣分析結果である。

- (1) Relation between holding time at isothermal transformation and intensity of magnetization at 400°.
- (2) Relation between temperature and intensity of magnetization during cooling from 400° to room temperature.
- (3) Relation between temperature and intensity of magnetization on heating.

Fig. 2 Result of Magnetic Analysis (Transformation temperature 400°).

- (1) Relation between holding time at isothermal transformation and intensity of magnetization at 350°.
- (2) Relation between temperature and intensity of magnetization during cooling from 350° to room temperature.
- (3) Relation between temperature and intensity of magnetization of heating.

Fig. 3 Result of Magnetic Analysis (Transformation temperature 350°).

果である。圖中(1)は各變態溫度における保持時間に伴う磁氣の變化すなわち變態速度を示し、(2)は各變態溫度で種々の時間保持後常溫までの冷却過程における磁氣の變化を示し、(3)はそれらの 600° までの磁氣分析結果である。まず變態溫度 400° の場合 (Fig. 2) についてみるに短時間で變態は急激に進行し保持時間 15 分附近でやゝ緩慢になり以後變態は段階的に徐々に進行することがわかる。今變態速度曲線上の各保持時間から徐冷したときの二次 Ar''

変態生起様相(2)をみるに短時間保持(20分まで)のものは冷却開始と同時に磁気が増加して変態が引續いて起るが磁気が急増する點は Ar'' 變態が生起することを示す。またこの場合 $\gamma \rightarrow M$ 變態開始温度は保持時間が増すほど

- (1) Relation between holding time at isothermal transformation and intensity of magnetization at 300°.
- (2) Relation between temperature and intensity of magnetization during cooling from 300° to room temperature.
- (3) Relation between temperature and intensity.

Fig. 4 Result of Magnetic Analysis (Transformation temperature 300°).

- (1) Relation between holding time at isothermal transformation and intensity of magnetization at 250°.
- (2) Relation between temperature and intensity of magnetization during cooling from 250° to room temperature.
- (3) Relation between temperature and intensity of magnetization on heating.

Fig. 5 Result of Magnetic Analysis (Transformation temperature 250°).

低温側に移行し、一定時間が経過すると再び高温側に移行するようである。變態が緩慢になる時間すなわち 20 分間保持後冷却した場合は温度降下による僅かな磁気増加以外著しい磁気變化がみとめられない。すなわち未變態 γ はそのまま常温に持ち來たされて残留するものと考えられる。さらに保持時間が増すと 200° 付近までは短時間保持後の場合と同様の磁気増加が起るが、200° 以下になると磁気の増加は僅少である。この 400~200° の範圍の冷却

時における磁気増加は變態初期に生成されたペーナイトの分解に伴うセメントタイトの磁気回復、未變態 γ の C 量が漸減することによる Ar'' 變態の温度上昇ならびに温度降下による磁気増加が加算されて現われる。これは冷却後の加熱に伴う磁気の減少と對照してもうなずける。これらの現象は變態温度が低い場合でも (Fig. 3~5) 同様の傾向がある。次に變態温度から常温まで冷却後の各試片の磁気分析結果 (3) をみると變態温度 400° (Fig. 2) において變態開始直後あるいは變態中途 (保持時間 20 分) からのものは 200~300° 附近から起る第一段の磁気増加および 450° 附近の第二段の増加が現われる。一方冷却時緩慢な變態が起るような恒温變態保持時間のものは第 1 段の磁気増加が消失し、第二段のみが現われている。すなわちこれらの加熱による磁気増加は $\gamma_R \rightarrow \alpha$ 變態に基因するものであり、なお段階的に磁気の増加が現われていることは 200~350° および 500° でそれぞれ分解する 2 種類の γ_R が存在することを示唆するものである。すなわち第 1 段で分解する γ_R 量は恒温保持時間が増すにしたがい消失する。變態温度が 350~300° の場合も同様の傾向を示す。(Fig. 3, Fig. 4) 250° の場合 (Fig. 5) 第一段の $\gamma_R \rightarrow \alpha$ 量は第二段の $\gamma_R \rightarrow \alpha$ 量より多く、兩者を明瞭に區別出来る。すなわち恒温變態の中途から常温まで冷却すると γ_R は常に存在し、短時間保持の場合は低温と高温とで分解する 2 種類の γ_R が存在し、長時間になると高温で分解する γ_R のみが存在することが知られる。

次に Fig. 6~8 は 200° 以下すなわち Ar'' 變態範圍に

- (1) Relation between holding time at isothermal transformation and intensity of magnetization at 200°.
- (2) Relation between temperature and intensity of magnetization during cooling from 200° to room temperature.
- (3) Relation between temperature and intensity of magnetization on heating.

Fig. 6 Result of Magnetic Analysis (Transformation temperature 200°)

における磁気分析結果である。200° の場合 (Fig. 6) 測定開始時すでに變態は開始しており、變態速度は中間段階におけるよりも小である。150° の場合 (Fig. 7) 測定開始時の變態量は 200° の場合より多く變態速度は減少する。100° の場合 (Fig. 8) 測定開始時の變態量はさらに増加し

であろう。すなわち以上の結果から 2 種類の γ_R の中深冷処理によりマルテンサイトに變化するものは低温側で分解する γ_R であり、高温側で分解する γ_R はすべてがマルテンサイトに變化することなく準安定であることが知られる。Fig. 11 は 900° から水および油焼入れした試片の磁

Fig. 11 Result of Magnetic Analysis of the Specimen Quenched in Water or Oil.

気分析結果である。水焼入れしたものは少量の γ_R が存在し、油焼入れのものは 150° 附近から僅かな磁気増加が起り、後者が γ_R 量は多い。またこれらの試片は前述の恒温処理に比し γ_R 量は極めて少ないことがわかる。

以上の各試片の常温における組織が保持時間によつて如何ように變化するかを變態温度 400° の場合について説明しよう。Photo. 1~4 は保持時間による組織の變化であ

Photo. 1 $900 \rightarrow 400^\circ$ 5min A. T.

Photo. 2 $900 \rightarrow 400^\circ$ 10 min A. T.

Photo. 3 $900 \rightarrow 400^\circ$ 1hr A. T.

Photo. 4 $900 \rightarrow 400^\circ$ 3hr A. T.

る。これからわかるように針状パーナイトは保持時間とともに漸次その量が増加する。また變態量が少い時間から冷却したものを強く腐蝕すると Photo. 2 に見られる如くパーナイトの基地に塊状の白色部と茶褐色に着色される部分

とが明瞭に區別され、前者は γ_R で後者は冷却時に生成されたマルテンサイトである。これらの組織の各成分についてライヘルト製微小硬度計によつてその硬さを測定してみると白色部 (γ_R) は約 260、茶褐色の部は 780 でマルテンサイト、パーナイト部は 350 で組織の相違は硬さの差に現われている。また恒温變態後の冷却時に緩慢な變態を示すものは Photo. 3 にみる如く強い腐蝕によつて着色されるマルテンサイトの部分が消失して未變態の γ はそのまま常温に持ち來たされており、さらに保持時間が増すと Photo. 4 には不鮮明であるが僅かに腐蝕されるマルテン

Fig. 12 Relation between Holding Time and Hardness (Transformation temperature 400°).

る。保持時間 1~3 時間で 2 次的に硬さが上昇している。これはパーナイトからの炭化物の析出と未變態 γ の C 量の減少による Ar'' 變態温度の上昇に伴う $\gamma \rightarrow M$ 變態に起因するものと考えられる。

IV. 結果に対する考察

中間段階において短時間で變態は急速に進行するが、變態が一定量すなわち未變態 γ の C 量がある濃度に達すると以後の變態は緩慢となり常温まで冷却後安定な γ_R が存在するがさらに保持時間がますとパーナイトおよび γ から Fe_3C が析出して變態は終止する。また短時間保持の場合は γ_R 200° 附近から 500° までの範囲で二段に分解しすなわち 2 種類の γ_R が存在している。この生因としては變態の進行に伴い C が擴散移動するために部分的に C および Si 量が相違してくるためによるものと考えられる。鋼にある量以上の Si が含有されると焼戻抵抗がますことは知られているが、その抵抗増大の原因の一つとして γ_R の分解温度が高温側に移行することが考え

られる。Photo. 2 に見られるように未變態 γ には冷却中マルテンサイトに變化するものと、そのまま残留するものとが存在し、變態量が一定量に達すると未變態 γ はそのまま常温に持ち來たされるが、さらに變態が進み炭化物が析

サイトの部分が現われることが知られる。これら試片につき硬さを測定した結果が Fig. 12 であ

出する時間になると再び未變態 γ の一部がマルテンサイトに變態することが明らかにされた。また低温側と高温側とで分解する γ_R は恒温處理保持時間と變態温度によりその量が異なるが、前者は深冷處理により一部がマルテンサイトに變化し、後者は變化しない一層安定な形で存在する。C の擴散移動は温度が低いほどおそくなるので變態温度が降下するにしたがい第一段（低温側）でマルテンサイトへ變化する γ_R 量が増すが、水あるいは油焼入れの場合この種 γ_R は存在しても著しく少ない。これはオーステナイトの stabilization と密接なる関連性があるものと考えられる。

V. 結 言

以上中炭素 Si-Mn 鋼のバーナイトおよびマルテンサイト變態様相について磁氣的に究明したが、これらの結果を要約すると下記の如くである。

(A) 中間段階については：(1) 變態ははじめ急速に進行するが、一定の變態量に達すると次後の變態速度は緩慢になり未變態 γ から炭化物が析出し C 量が減じ Ar'' 變態温度が上昇する。(2) 變態中途から冷却すると短時間保

持の場合は $\gamma \rightarrow M$ 變態が進行して常溫に達するが、一定時間以上になると γ は未變態のまま常溫に持ち來たされるが、さらに保持時間が増すと未變態 γ の一部が再びマルテンサイトに變化する。また變態温度の降下とともに γ_R は減少する。(3) 恒温保持時間により γ_R には低温側 (200~350°) および高温側 (450~500°) とで 2 段に分解するものと高温側のみで一段に變化するものがある。(4) これらの γ_R の中低温側で分解するものは深冷處理によりマルテンサイトに分解するが、高温側で分解する γ_R は同處理により分解することなく準安定である。

(B) Ar'' 變態範圍について：(1) 變態速度は大で變態温度の降下とともに短時間における變態速度が増し、以後の變態は緩慢である。また變態中途から冷却すると二次 Ar'' 變態生起温度は保持時間が増すとともに低温側に移行する。(2) γ_R はいずれの恒温保持時間においても低温側と高温側とで 2 段に分解する。(3) 油焼入れした場合の γ_R 量は水焼入れしたものより多いが、これらは恒温處理したものに比してはるかに少い。