フェライト縞状組織におよぼすオーステナイト結晶粒度と鍛造比の影響について

日下 邦男* 荒木昭太郎* 岩丸 正明*

Kunio Kusaka, Shotaro Araki and Masaaki Iwamaru : On the Influence of Austenite Grain Size and Forging Ratio on Ferrite Banded Structure. The influence of austenite grain size on ferrite banding has been investigated. Ferrite bands of annealed steels are largely influenced by the austenite grain size. When the annealing temperature is very high, the microstructure does not show a banded structure due to the diffusion of segregation and the grain growth. On annealing of the mixed grain structure, the region of fine grains is banded, but that of coarse grain is not. When fully annealed, fine grained steels show a banded structure, but coarse grained steels do not. The banded structure is extremely influenced by the relation between the forging ratio, i.e. the width of segregation zones and the austenite grain size. With increase in grain size of austenite rather than in width of segregation zone, the banded structures are hardly distinguishable, and when reversed, the banded structure has the tendency to be clear. The mechanism of formation of the banded structure is also discussed.

(Received June 2, 1970)

I. 緒 言

肌焼鋼の被削性は、他の条件が一定であれば、硬度は低いほど良く、また顕微鏡組織は層状パーライトがより均一に分布した組織、すなわちフェライト縞状組織がより軽微な組織ほど良い。縞状組織に関しては、生因⁽¹⁾⁽²⁾、生成機構⁽³⁾⁽⁴⁾、拡散焼鈍の影響⁽⁵⁾、機械的性質におよぼす影響^{(6)~(11)}などについて古来多くの研究が行なわれている。しか

し、オーステナイト結晶粒度と鍛錬比の関係に関連づけた研究は見当たらないようである。われわれは経験的に細粒鋼を甚しい高温たとえば1150°C程度に加熱して、オーステナイト結晶粒を粗粒にすることによって、その後に徐冷しても、縞状組織は軽微なものが得られることを知っている。このことから、比較的低温のオーステナイト化温度でも結晶粒が粗大化する粗粒鋼を使用すれば、焼鈍温度を極度に高くしなくても、縞状組織の軽微なフェライト、パーライト組織が得られるものと考え、鍛錬比およびオーステナイ

* 特殊製鋼株式会社技術研究所 (Technical Research Laboratory, Tokushu Seiko Co., Ltd., Tokyo)

(1) 古沢：金属学会誌，**24**(1960)，833.

(2) 大沢：金属学会誌，**25**(1961)，433.

(3) 内山：鉄と鋼，第37年(昭26)，第4号，234.

(4) 古沢，児島：金属学会誌，**18**(1954)，599.

(5) 藤原，小畑：電気製鋼，**33**(1962)，106.

(6) 内山：鉄と鋼，第35年(昭24)，第2号，39.

(7) 内山：鉄と鋼，第36年(昭25)，第1号，13.

(8) 藤原，福井：電気製鋼，**34**(1963)，114.

(9) 藤原，福井：電気製鋼，**35**(1964)，2.

(10) B.H.Schwartzbart：Trans.ASM，**44**(1952)，845.

(11) 新井，宮野：不二越技報，**18**(1962)，No.3，53.

ト化の条件を種々変えて縞状組織の現われる状況を調べ、あわせて縞状組織の生成機構について考察を試みた。

II. 実験方法

供試材として最も一般的な肌焼鋼である、0.2% C, 1% Cr, 0.2% Mo の JIS SCM₂₂ 鋼を選択し、12t エルバー炉により1t 鋼塊を溶製し、これを所要の寸法に鍛造または圧延して、これより熱処理用試片を採取した。Table 1 に供試材の化学成分を示す。Aは細粒鋼であり、Bは950°Cのオーステナイト化温度で混粒を示すような結晶粒成長特性を有するものであり、Cは粗粒鋼である。Fig.1 に各供試材の結晶粒成長特性を示す。

III. 実験結果および考察

1. 細粒鋼の高温加熱による焼鈍組織

筆者らは経験的に、細粒鋼でも1000°C以上の高温に長

時間加熱し、その後に徐冷すると、結晶粒は粗大化しているが、方向性の軽微なすなわち縞状組織の軽微な層状パーライト組織を得られることを知っている。Photo.1 は試料

Fig.1 Relationship between austenite grain size and heating temperature

Table 1 Chemical compositions of specimens

Steel	Chemical compositions (%)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al
A	0.20	0.29	0.80	0.016	0.007	0.05	1.03	0.19	0.07	0.027
B	0.23	0.34	0.85	0.009	0.005	0.12	1.18	0.17	0.16	0.007
C	0.20	0.31	0.66	0.010	0.012	0.08	1.02	0.20	0.08	0.002

(a) 900°C x 4 hr slow cool

(b) 1000°C x 4 hr slow cool

(c) 1000°C x 4 hr slow cool
→ 900°C x 1 hr slow cool

(d) 1100°C x 4 hr slow cool
→ 900°C x 1 hr slow cool

Photo.1 Effect of annealing on banded structure ($\times 100 \times \frac{1}{3}$)

Aの細粒鋼，鍛錬比 200 のものを用いて，このことを確認した結果である。(a)は $900^{\circ}\text{C} \times 4 \text{ hr}$ 加熱徐冷した場合の，通常の完全焼鈍状態の顕微鏡組織であり，明瞭な縞状組織が現われているが，このものを $1000^{\circ}\text{C} \times 4 \text{ hr}$ 加熱徐冷した場合には，その顕微鏡組織は (b) に示すように，縞状組織は軽微である。

高温加熱によって縞状組織が消失する理由としては，まず拡散の効果が考えられるので，Photo.1(b) のものすなわち $1000^{\circ}\text{C} \times 4 \text{ hr}$ 加熱して縞状組織の軽微な状態になっているものを，再び $900^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ hr}$ 再加熱徐冷して顕微鏡組織を調べた。(c)はその結果を示したもので，再び明瞭な縞状組織が現われた。したがって $1000^{\circ}\text{C} \times 4 \text{ hr}$ 加熱徐冷により縞状組織が消失する原因としては，拡散の効果とは考えられない。よってわれわれは，これを粗大なオーステナイト結晶粒のためと考えた。

なお，高温加熱もさらに高温になって，たとえば $1100^{\circ}\text{C} \times 4 \text{ hr}$ の場合には，その後に $900^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ hr}$ 再加熱徐冷しても，再び縞状組織は出現しない。よって極めて高温に加熱した場合には，縞状組織消失の原因として，粗大結晶粒のほかに拡散の効果が附加されると考えられる。

2. 混粒試料の焼鈍組織

前項の実験によって，縞状組織とオーステナイト結晶粒度の間に密接な関係があることが認められたので，試料Bを用いてこの点をさらに実験して確認した。試料Bを使用した理由は，試料Bは $950^{\circ}\text{C} \times 2 \text{ hr}$ 加熱徐冷により混粒を示すので，これを用いて粗粒部と細粒部を比較すれば，他の条件を全て一定にしてオーステナイト結晶粒度の差の影響のみによって，縞状組織の変化を観察できるからである。試験方法としては， $950^{\circ}\text{C} \times 2 \text{ hr}$ 加熱後， 100°C/hr の速度で徐冷し，その途中種々の温度から水冷して，フェライトの析出状況により，縞状組織の生成状況を観察した。

Photo.2 はその結果を示したものである。 770°C では粗粒部，細粒部ともに，いまだフェライトを析出していない。 760°C の場合には，粗粒部，細粒部ともにフェライトが粒界に粒状に析出している。 750°C になると面積率で約 25% のフェライトが析出しているが，細粒部ではさきに析出した粒状のフェライトに引き続いて析出したフェライトが縞状を呈しているのに対し，粗粒部では粒界にフェライトが析出しており，縞状組織を呈していない。常温まで徐冷し

Photo.2 Behaviour of ferrite precipitation in a mixed grain steel ($\times 200 \times \frac{2}{3} \times \frac{3}{5}$)

た場合には、細粒部は明瞭な縞状組織を呈しているが、粗粒部は縞状組織を示していない。

上記の結果により、オーステナイト結晶粒が細粒の場合には、縞状組織を呈するが、粗粒の場合には縞状組織にならないことが明らかになった。

3. 粗粒鋼の焼鈍組織

以上の結果から、縞状組織はオーステナイト結晶粒度によって大きな影響をうけることが判明し、オーステナイト結晶粒が十分大であれば縞状組織が現われないことがわかったので、925°Cの加熱によってオーステナイト結晶粒が十分粗大化するいわゆる粗粒鋼を使用すれば、焼鈍によっ

Photo.3 Slow cooled structure of a coarse grained steel ($\times 50 \times \frac{1}{2} \times \frac{3}{5}$)

て縞状組織の軽微なものが得られると考えた。

そこで溶製の際に結晶粒度調製ならびに脱酸のために添加する Al を全然添加しない試料 C を使用して、焼鈍組織を調べた。Photo. 3 は鍛錬比 200 のものを 950°C $\times$ 2hr 加熱後、速度 15°C/hr で徐冷したものの顕微鏡組織である。予想通り、方向性の軽微な顕微鏡組織が得られた。

4. 粗粒鋼に縞状組織が現われない理由について

前項までの検討によって、完全焼鈍状態において、細粒鋼には縞状組織が現われるのに対し、粗粒鋼の場合には縞状が軽微な組織になることが明らかになったので、その機構を考察した。Fig. 2 は細粒鋼と粗粒鋼におけるオーステナイト状態の結晶粒度と、縞状組織の原因になる偏析巾の関係を示したものである。偏析巾は圧延比、溶解方法などを一定とすれば、粗粒鋼と細粒鋼では一応差がないと考える。すると 1t 程度の鋼塊を使用し、鍛造比 300 とすると、偏析巾は約 0.05 mm になり、また結晶粒度は細粒鋼は粒

度番号 No.7 として径 0.03 mm、また粗粒鋼は粒度番号 No.2 として径 0.2 mm になる。このような状態のもとで、オーステナイト状態から徐冷された場合のフェライトの析出と生長過程を考えてみる。まず A_{r3} 点に達するとフェライトが析出する。フェライトの析出は、偏析巾のうち変態温度の高い部分 (Fig. 2 では点線で示した) と結晶粒界との交線に発生する。さらに温度が下がると、さきに析出しているフェライトが結晶粒界に沿って生長する。同時に圧延方向にも生長する。さらに温度が下がると、フェライト量はさらに増加するが、細粒鋼では偏析巾のうち、変態点の高い偏析帯付近の結晶粒は、粒界をフェライトで囲まれてしまう。粗粒鋼では塊状フェライトが断続的に粒界を囲む状態になる。さらに温度が下がるとさらにフェライトの析出が進み、変態点の高い偏析帯では、結晶粒内にフェライトが進行して、ついに全部フェライトになってしまう。変態温度の低い偏析帯付近はオーステナイトのままで、この部はさらに冷却することによってパーライトになる。これにたいし、粗粒鋼の場合は始めは温度の低下につれてフェライトが粒界および粒内に向って析出しつづけるが、結晶粒が大きく、一結晶粒が数個の偏析巾にまたがっているので、粒内へのフェライト析出が進んでも、粒内がまったくフェライトで埋められてしまうに至らない。結局フェライトバンドは形成しないことになる。

Fig.2 Model diagram of the relation between banded ferrite precipitation and segregation zones

5. 縞状組織におよぼす鍛造比, オーステナイト結晶粒度および冷却速度の影響

粗粒鋼および細粒鋼における縞状組織の挙動については以上のように考察し, その結果偏析山すなわちこれに大きな影響をあたえる鍛造比, オーステナイト結晶粒の大きさの相対的な大きさの関係が縞状組織を左右することを明らかにしたが, これらおよびこれらと共に縞状組織の程度を数量的に表示するために, Photo.4 の基準写真を作成した.

Fig.3 は鍛造比の影響を調べた結果の 1 例である. 加熱

Photo.4 Classifications of ferrite bands ($\times 50 \times \frac{2}{3} \times \frac{5}{6}$)

Fig.3 Effect of forging ratio on ferrite banding

Fig.4 Effect of cooling velocity on ferrite banding

温度は 850°~1100°C, 保持 1 hr, 冷却速度は 100°C/hr である。鍛造比 9 にて, すでに縞状組織が現われるが, 鍛造比の増加とともに縞状組織が軽微になる。また Fig. 4 は冷却速度の影響を示したものである。冷却速度は 100°~5°C/hr に変えた。この範囲では, 細粒鋼は冷却速度の影響は認められず, また粗粒鋼では冷却速度とともに縞状組織が軽微になる傾向が認められる。

Fig. 5 は加熱温度を 850°~1100°C に変えて, 縞状組織におよぼす加熱温度の影響を調べた結果である。加熱温度が高くなるにしたがって縞状組織に軽微になる。

IV. 結 言

縞状組織に及ぼすオーステナイト結晶粒度および鍛造比の影響について研究の結果, つぎの点が明らかになった。

Fig.5 Effect of heating temperature on ferrite banding

(1) 高温加熱により細粒鋼の徐冷組織は縞状組織を呈さないが, 加熱温度が 1000°C 程度の場合にはその原因は結晶粒の粗大化である, 1100°C 程度の極めて高い温度の場合には結晶粒の粗大化および偏析の拡散が原因である。

(2) オーステナイト状態で混粒を示すものを徐冷した場合, 細粒部では縞状組織を示すが, 粗粒部では縞状組織を呈さない。

(3) 細粒鋼はオーステナイト化後の徐冷により縞状組織を呈するが, 粗粒鋼では縞状組織を呈さない。

(4) 縞状組織は鍛造比すなわち偏析巾にオーステナイト結晶粒度の相対的な大きさよりもオーステナイト結晶粒の大きさが大になると, 縞状組織は現われにくくなり, 逆であると明瞭になる傾向がある。