

© 1984 ISIJ

加工硬化したオーステナイトからの拡散変態の速度論

論 文

梅本 実*・大塚 秀幸*²・田村 今男*³

Diffusional Transformation Kinetics from Work-hardened Austenite

Minoru UMEMOTO, Hideyuki OHTSUKA, and Imao TAMURA

Synopsis:

The deformation of austenite below its recrystallization temperature markedly accelerates the subsequent diffusional transformation. This acceleration is mostly caused by the increase in the nucleation rate. The increase in the nucleation rate per unit volume of specimen is attributed (1) to the increase in the austenite grain area by the elongation of grains, (2) to the increase in the nucleation rate per se per unit area of grain surface, and (3) to the formation of additional nucleation sites such as annealing twin boundaries, deformation bands, etc. Considering these effects, a kinetic equation for the deformed specimens was derived and from this equation, a method to estimate quantitatively the individual effect of the above three factors on the increase in the transformation rate was developed by defining the acceleration multiplying factors. Furthermore, the effects of the amount of rolling reduction and austenite grain size on the individual effect of the three factors on the acceleration of transformation were discussed based on the derived kinetic equation. Finally, as an application of the developed method, the acceleration multiplying factors for the pearlite transformation in the hot-rolled SKD 6 steel were calculated as functions of rolling reduction and austenite grain size.

1. 緒 言

制御圧延は加工と熱処理を合理的に組み合わせて合金成分を変えずによりすぐれた性質を持つ鋼を作ろうとするもので、近年数多くの研究がなされている。制御圧延においては、特に加工硬化したオーステナイトからフェライトを生成させることによりフェライト粒の微細化を通して材料の性質を著しく向上させることから、加工硬化したオーステナイトからの拡散変態挙動を理解することが重要である。しかしながらこれに関する系統的研究は現在なお少ないようである。そこで本研究では、まず加工硬化したオーステナイトからの拡散変態の速度式の導出をおこない、次にその式に基づいて加工により拡散変態が促進される個々の要因を定量的に評価する方法を検討した。つぎに、圧下率や加工前のオーステナイト粒径及び核生成速度と成長速度の比が、加工後の拡散変態の kinetics に及ぼす影響を定量的に評価する方法を

検討した。さらに上記の方法を使つて SKD 6 鋼における加工によるパーライト変態促進に対する各因子の効果を定量的に比較検討した。

2. 加工材における変態の kinetics 及び加工により変態を促進する諸原因の定量的比較方法

2.1 加工による変態促進をもたらす諸因子

オーステナイトの加工硬化の影響は拡散変態の核生成と成長の促進として現れる。まず、核生成速度の増加は次の3つの因子に分けて考えることができる。

- (1) オーステナイト粒が伸長することによる単位体積あたりの粒界面積の増加
- (2) オーステナイト粒界面での単位面積当たりの核生成速度そのものの増加
- (3) 変形帯など新たな核生成場所ができることによる増加

また、成長速度への影響としては、加工により導入され

昭和 58 年 4 月本会講演大会にて発表 Trans. ISIJ Vol. 23 (1983) No. 9 に一部掲載

昭和 58 年 6 月 17 日受付 (Received June 17, 1983)

* 京都大学工学部 Ph. D. (Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi Sakyo-ku Kyoto 606)

*² 京都大学大学院 (Graduate School, Kyoto University)

*³ 京都大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Kyoto University)

た過剰空孔や、転位によるパイプ拡散により拡散速度が速くなる効果がまず考えられる。次に新しい相が成長するときにはその界面において母相中の転位を消滅させることから、これら転位のエネルギーの放出を駆動力とした成長の促進が考えられる。しかし、別の報告で明らかにしたように全体的な変態速度に及ぼす影響としては加工による核生成速度の促進の効果が大部分で、加工による成長促進の寄与は比較的小さい¹⁾。そこで次に加工によるこれらの影響を考慮して加工材における変態の kinetics を表す式を求めてみる。

2.2 加工材における拡散変態の速度式

加工材では粒界面での核生成が主になるものと考えられる¹⁾が、オーステナイトの粒界面が主たる核生成場所である場合の無加工材における変態の kinetics について CAHN²⁾は、単位粒界面積当たりの核生成速度 $I_{g.b.}$ と成長速度 G が時間によらず一定である場合の時間 t での拡張体積率 X_e は次式で与えられることを示している。

$$X_e = 2 S_{g.b.} G t \int_0^1 (1 - e^{-\pi I_{g.b.} G t^2 [\frac{1-x^3}{3} - x^2(1-x)]}) dx \dots\dots\dots (1)$$

また一般に、拡張体積率 X_e と変態率 X の間には次の関係が成り立つ。

$$X = 1 - e^{-X_e} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、(1)式において $S_{g.b.}$ は単位体積当たりの粒界面積、そして $x = y/Gt$ であり、 y は粒界面からの距離である。 $S_{g.b.}$ は平均結晶粒切片 \bar{l} を使って次式で与えられる³⁾。

$$S_{g.b.} = \frac{2}{\bar{l}} \dots\dots\dots (3)$$

また、ASTM 公称粒径 D は \bar{l} と次のような関係にある⁴⁾。

$$D = 1.1225 \bar{l} \dots\dots\dots (4)$$

ところで(1)式は無加工材に対して与えられた式であるが、これを加工材における変態の kinetics に拡張することを考えてみる。まず簡単のために次のように仮定する。

(1) 加工によりオーステナイト粒内に導入される付加的な核生成場所は、変形帯のみである。

(2) 変形帯における核生成速度は、粒界面上における核生成速度と等しい (実際は変形帯よりも粒界の方が核生成に対する寄与は大きいと考えられる)。

(3) 粒界面上での核生成速度 $I_{g.b.}$ は、真歪み ϵ ($= -\ln(1-p)$) の一次の関数で与えられる。すなわち、

$$I_{g.b.}(p) = I_{g.b.}(p=0) + A \ln(1-p) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 A は定数。

(4) 変形帯の密度 $S_{d.b.}$ は、真歪み ϵ の二次の関数で与えられる。すなわち、

$$S_{d.b.}(p) = B \{\ln(1-p)\}^2 \dots\dots\dots (6)$$

ただし B は定数で、この仮定は KOZASU ら⁵⁾や SANDBERG と ROBERTS⁶⁾が報告している、圧下率に対する変形帯密度の変化の実験データに基づいたものである。また、加工による成長速度の促進効果は比較的小さいことから、ここでは成長速度は加工によらず一定であるとする。

さて、(1)と(2)の仮定より、加工材における拡散変態の kinetics は次のように表される。

$$X_e = 2 \{S_{g.b.}(p) + S_{d.b.}(p)\} G t \int_0^1 (1 - e^{-\pi I_{g.b.}(p) G t^2 [\frac{1-x^3}{3} - x^2(1-x)]}) dx \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $S_{g.b.}(p)$ と $S_{d.b.}(p)$ はそれぞれ圧下率 p の圧延を施したときの単位体積当たりの粒界面積及び変形帯密度であり、 $[S_{g.b.}(p) + S_{d.b.}(p)]$ は KOZASU ら⁵⁾が有効界面積と呼んでいるものに相当する。また、圧延前と圧延後の単位体積当たりの粒界面積の比を $q(p)$ とすると、圧下率 p の圧延を施したあとのオーステナイト粒の単位体積当たりの粒界面積 $S_{g.b.}(p)$ は、圧延前の単位体積当たりの粒界面積 $S_{g.b.}^0$ に $q(p)$ をかけたもの、すなわち

$$S_{g.b.}(p) = S_{g.b.}^0 \cdot q(p) = \frac{2q(p)}{\bar{l}}$$

で表せる。従つて、加工材における拡散変態の kinetics を表す(7)式は

$$X_e = 2 \left\{ \frac{2q(p)}{\bar{l}} + S_{d.b.}(p) \right\} G t \int_0^1 (1 - e^{-\pi I_{g.b.}(p) G t^2 [\frac{1-x^3}{3} - x^2(1-x)]}) dx \dots\dots\dots (8)$$

と書ける。ただしこの場合、粒界面上での核生成速度及び成長速度は時間によらず一定であるとしているので、この(8)式は成長速度が一定である、たとえばパーライト変態の場合に適用できる。また、成長速度が時間とともに変化するフェライト変態の kinetics を表す式も同様にして導くことができる。まず、無加工材においてはフェライト粒は軸比 3:1 の回転楕円体⁷⁾で、一定の核生成速度で粒界面上に生成し、成長速度は変態時間の 1/2 乗に比例するとすれば、

$$X_e = \alpha S_{g.b.} t^{1/2} \int_0^1 (1 - e^{-\frac{9}{2} \pi \alpha^2 I_{g.b.} t^2 (1-2x^2+x^4)}) dx \dots\dots\dots (9)$$

と表せる。ただし α は厚さ方向の成長速度を表す放物線速度定数 (parabolic rate constant) である。(フェライト変態では一般に明瞭な潜伏期が存在する⁸⁾。従つて

(9)式における t は厳密には潜伏期を除いた時間を意味する。) 次にこの式を 2.2 節で述べた, 加工材の相変態における 4つの仮定を使って加工材でのフェライト変態の場合に拡張すると,

$$\left. \begin{aligned} X_e &= \alpha (S_{g.b.}(p) + S_{d.b.}(p)) t^{1/2} \int_0^1 (1 - e^{-\frac{9}{2}\pi\alpha^2} \\ & \quad I_{g.b.}(p) t^2 (1 - 2x^2 + x^4)) dx \dots\dots\dots \\ S_{g.b.}(p) &= S_{g.b.} \cdot q(p) \dots\dots\dots \\ I_{g.b.}(p) &= I_{g.b.}(p=0) + A' \ln(1-p) \dots\dots\dots \\ S_{d.b.}(p) &= B' \{\ln(1-p)\}^2 \dots\dots\dots \end{aligned} \right\} (10)$$

(A' , B' は材料や加工条件によつて決まる定数) と書き表せる。ただし, α は加工により変化しないものとして取り扱つた。この(10)式が加工材におけるフェライト変態の kinetics を表す式である。

2.3 加工による粒界面積の増加率の計算

単位体積当たりのオーステナイト粒界面積は圧延による粒の伸長により増加するが, 圧延前と圧延後の単位体積当たりの粒界面積の比 $q(p)$ は次のようにして計算できる。簡単のためオーステナイト粒を Fig. 1(a) に示すような, 単位半径をもつ球形と近似し, (このことはオーステナイト粒が圧延方向に対してランダムに分布した微小平面から成り立つと仮定することに等しい。) それ

$$S^0 = 4\pi \dots\dots\dots (11)$$

が, 圧下率 p の圧延によつて Fig. 1(b) に示すような楕円体になつたとする。このとき, 圧延前の球の表面積

$$S(p) = \int_{1-p}^1 \frac{1}{1-p} \left[\left\{ 4x \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - (2p - p^2) \sin^2 \theta} d\theta \right\} \sqrt{\frac{x^2(1-p)^6}{1-x^2(1-p)^2} + 1} \right] dx \dots\dots\dots (12)$$

となり, 両者の比 $q = S(p)/S^0$ を種々の圧下率 p に対して計算しプロットすると, Fig. 2 のようになる。(圧下率 p により真歪み ϵ は $\epsilon = -\ln(1-p)$ で表されるので Fig. 2 には q と ϵ の関係も示してある。) 圧延により個々の粒の体積は変化しないので, Fig. 1(a) の球と Fig. 1(b) の楕円体は体積が等しい。従つて, Fig. 2 に

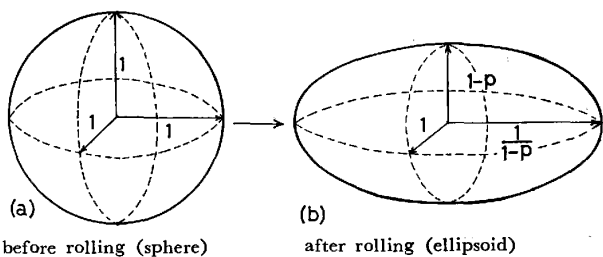


Fig. 1. The shape change of an austenite grain by the rolling with reduction p .

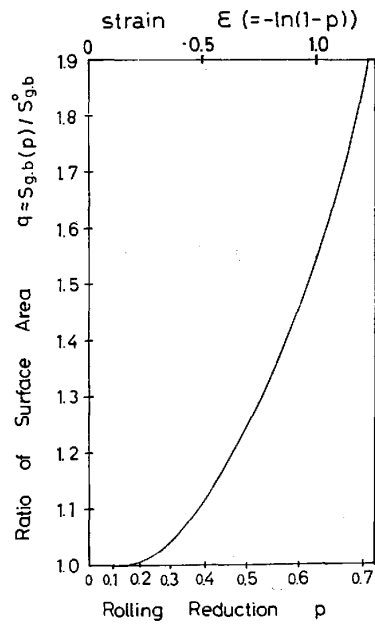
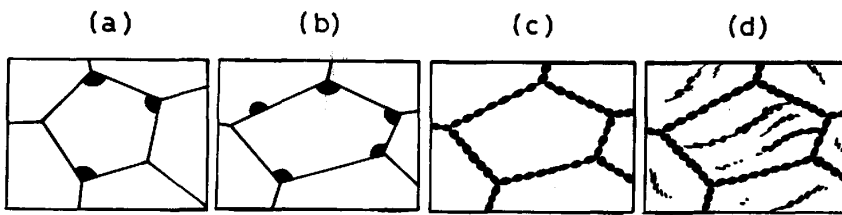


Fig. 2. The ratio of austenite grain surface area before rolling to that of after as a function of rolling reduction p .

おける比 q は, 圧延前と圧延後の単位体積当たりの粒界面積の比, $S_{g.b.}(p)/S_{g.b.}$ に等しい。Fig. 2 より, p が小さい時は単位体積当たりの粒界面積の増加はきわめて小さいが, 圧下率が大きくなると粒界面積の増加の寄与は急に大きくなつてくることがわかる。

2.4 変態促進に及ぼす3つの要因の効果の比較方法

オーステナイトを加工すると, 2.1 節で述べた拡散変態促進の3つの要因のすべてが同時に働くわけであるが, これら3つの要因の効果をも50% 変態に達するまでの時間 (50% 変態時間, half transformation time) の減少割合として評価する方法を考えてみる。まず, 個々の要因を理解しやすくするために, オーステナイトの加工硬化状態を Fig. 3 に模式的に示す3つの仮想的段階に分けて考える。Fig. 3(a) は無加工状態を示し, (b) はオーステナイト粒は伸長したが, 単位粒界面積当たりの核生成速度は無加工材と変わらず, 変形帯も導入されていない状態を, (c) は粒が伸長し, 単位粒界面積当たりの核生成速度が増加したが, 変形帯は導入されていない状態を, (d) は粒が伸長し, 単位粒界面積当たりの核生成速度が増加し, 変形帯が導入された状態, すなわち加工によつて付与されるすべての効果が働いた場合を示している。個々の図においては加工されたオーステナイトの状態をより明確に示すためにそれぞれのオーステナイト状態からの相変態の初期段階を示してある。Fig. 4 は, Fig. 3 で示した4つのオーステナイト状態における変態曲線を模式的に示したものである。ここで, (a) ~ (d) の記号で示したそれぞれの変態曲線は, Fig. 3 に



(a) the initial, non-deformed condition.
 (b) a deformed condition in which the grains are elongated only.
 (c) a deformed condition in which grains are elongated and the rate of nucleation on grain boundary is increased.
 (d) a deformed condition in which grains are elongated, the rate of nucleation on grain boundary is increased and deformation bands are produced on which to invite further nucleation.

Fig. 3. An early stage of pearlite transformations in 4 different austenite conditions.

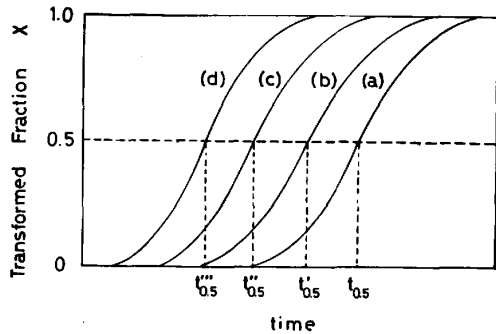


Fig. 4. Schematic transformation curves. The curves (a) to (d) correspond to the austenite condition (a) to (d) in Fig. 3.

示した (a)~(d) のオーステナイト状態に対応している。各変態曲線における 50% 変態時間をそれぞれ $t_{0.5}$, $t'_{0.5}$, $t''_{0.5}$, $t'''_{0.5}$ とすると、拡散変態の促進に及ぼす 3 つの要因の個々の効果は、50% 変態時間の比により表現できる。すなわち、変態促進倍数として $f_g, f_I, f_{d.b.}$ をそれぞれ

$$f_g = \frac{t'_{0.5}}{t_{0.5}}, f_I = \frac{t''_{0.5}}{t'_{0.5}}, f_{d.b.} = \frac{t'''_{0.5}}{t''_{0.5}} \dots \dots \dots (13)$$

と定義すれば、 $f_g, f_I, f_{d.b.}$ はそれぞれ粒が伸びること、粒界面上での核生成速度が増加すること、粒内での核生成場所が増加すること、による 50% 変態時間の減少割合を表すことになる。つまり、 f の値が小さいほど変態促進の効果は大きいわけである。したがって加工材における変態の kinetics を表す (8) 式を使つて、Fig. 3 に示す各オーステナイト状態での圧下率 p における 50% 変態時間 $t_{0.5}, t'_{0.5}, t''_{0.5}, t'''_{0.5}$ を計算すれば変態促進に及ぼす 3 つの因子の効果を定量的に比較できることになる。

2.5 50%変態時間及び変態促進倍数の求め方

圧下率 p の圧延を施した場合の、Fig. 3 に示す各オーステナイト状態での 50% 変態時間 $t_{0.5}, t'_{0.5}, t''_{0.5}, t'''_{0.5}$ は加工材における拡散変態の kinetics を表す (8) 式を使つて、次のようにして求めることができる。(本節及び次の 2.6, 2.7 節では加工材における変態 kinetics が、(8) 式で表される場合 (パーライト変態等) を扱うが、変態 kinetics が (10) 式で表されるフェライト

変態の場合も、ほぼ同様の取り扱いが可能である.)

まず、無加工材における 50% 変態時間 $t_{0.5}$ は、(8) 式に $X=0.5, q(p=0)=1, S_{d.b.}(p=0)=0 \mu\text{m}^{-1}$ と無加工材における $l, I_{g.b.}(p=0)$ の値及び G の値を代入することによつて求められる。(ただし、実際の計算は積分の部分の数値計算によりおこなわざるをえないので、コンピュータが必要である。) なお、以下 \bar{l} の値は常に無加工材の値を、 G の値は加工した場合もほとんど変化しないとして一定の値を代入する。次に Fig. 3(b) に示されるオーステナイト状態における 50% 変態時間 $t'_{0.5}$ は、(8) 式に $X=0.5$ と加工材における $q(p)$ の値及び無加工材における $S_{d.b.}(p=0)=0 \mu\text{m}^{-1}, I_{g.b.}(p=0)$ の値を代入することによつて求められる。次に Fig. 3(c) に示されるオーステナイト状態における 50% 変態時間 $t''_{0.5}$ は (8) 式に $X=0.5$ と、無加工材における $S_{d.b.}(p=0)=0 \mu\text{m}^{-1}$ 及び加工材における $q(p), I_{g.b.}(p)$ の値を代入することによつて求められる。次に Fig. 3(d) に示されるオーステナイト状態における 50% 変態時間 $t'''_{0.5}$ は、(8) 式に $X=0.5$ 及び、加工材における $q(p), S_{d.b.}(p), I_{g.b.}(p)$ の値を代入することによつて求められる。以上のようにして求めた 50% 変態時間 $t_{0.5}, t'_{0.5}, t''_{0.5}, t'''_{0.5}$ の値から (13) 式で定義した各変態促進倍数が求められる。

2.6 加工による変態促進に及ぼす加工前のオーステナイト粒径の影響

加工による変態促進の原因となる 3 つの因子の相対的な効果は、加工前のオーステナイト粒径に依存していると考えられる。一般に、オーステナイト粒径が大きくなるに従つて最も効果的な核生成場所である粒界の密度は小さくなる。それゆえに粒界上の核生成場所は変態の初期に新相粒子によつて埋まってしまう (site saturation)。従つてオーステナイト粒径が大きくなるにつれて、単位粒界面積当たりの核生成速度の増加よりも粒内に変形帯が生成することによる変態促進の効果の方が大きくなる事が予想される。これを定量的に評価することを試みる。加工材における拡散変態の kinetics を表す (8) 式は、(4) 式を使つて粒径 D を含む形の式として

$$X_0 = 2 \left\{ \frac{2.245q(p)}{D} + S_{d.b.}(p) \right\} Gt \int_0^1 \frac{1-x^3}{3} - x^2(1-x) dx \dots (14)$$

のように表せる。この式の X , $q(p)$, $S_{d.b.}(p)$, G , $I_{g.b.}(p)$ に適当な値を代入することによって 2.5 節で述べたように 50% 変態時間 $t_{0.5}$, $t'_{0.5}$, $t''_{0.5}$, $t'''_{0.5}$ が任意の粒径 D に対して計算できる。従つてある圧下率 p のときの、変態促進に及ぼす 3 つの因子の効果の粒径依存性を定量的に比較することができる。

2.7 加工による変態促進に及ぼす加工前の核生成と成長速度の比の影響

加工による拡散変態促進の各因子の効果を考察する場合のもう 1 つの重要な因子は、核生成速度と成長速度の比 $I_{g.b.}/G$ である。加工前の変態進行が site saturation に近い場合には、加工によつて粒界面上での核生成速度が増加することによる変態促進の効果は非常に小さくなることが予想される。均一核生成の場合には核生成場所の消費率と変態率は等しいが、核生成が粒界に集中的におこるような不均一核生成においては核生成場所の消費率は一般に変態率より多く、その極端な場合が site saturation である。不均一核生成で変態がおこる場合、核生成場所の消費率と変態率との関係は一般に核生成速度 $I_{g.b.}$, 成長速度 G と粒径 D の値で決まる。ここで変態率が 0.5 のとき核生成場所 (粒界表面) の 99% 以上が新相によつて占められる場合に "site saturation" の条件を満たしているとして $I_{g.b.}$, G , D の関係を求めてみる。

粒界面上で核生成がおこる相変態において、拡張体積率 X_0 は (2), (3), (4) 式から

$$X_0 = \frac{4.49Gt}{D} \int_0^1 \left(1 - e^{-\pi I_{g.b.} G^2 t^3 \left[\frac{1-x^3}{3} - x^2(1-x) \right]} \right) dx \dots (15)$$

と表せる。また、新相による粒界占有率 Y_s は、

$$Y_s = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{3} I_{g.b.} G^2 t^3\right) \dots (16)$$

と表せる。変態が半分終了したとき、つまり $X=0.5$ のとき核生成場所 (粒界表面) の 99% 以上が新相に占拠される、つまり $Y_s > 0.99$ となる条件は、

$$\pi I_{g.b.} G^2 t^3 > 6 \ln 10 \dots (17)$$

で与えられる。この条件を式 (15), (16) に代入すると、

$$0.5 > 1 - \exp\left\{ \frac{-4.49Gt}{D} \int_0^1 \left(1 - e^{-6 \ln 10 \left[\frac{1-x^3}{3} - x^2(1-x) \right]} \right) dx \right\}$$

あるいは

$$Gt/D > 0.21 \dots (18)$$

となる。式 (17), (18) から変態が半分終了したとき核生

成場所 (粒界表面) の 99% 以上が新相によつて占められる条件は、

$$I_{g.b.} \cdot D^3/G > 451 \dots (19)$$

と求められる。変態がこの条件を満たすときは site saturation の状態を満たしていると考えられる。(site saturation の状態になる条件については CAHN によつても提案されており、CAHN の与えている条件を本論文の記号を使つて表すと、 $I_{g.b.} \cdot D^3/G > 539$ となる。この条件は変態がちょうど 50% 終了したときに粒界表面の 99.4% が新相によつて占められることに相当している。) このような site saturation の状態になると加工による単位粒界面積当たりの核生成速度増加が変態促進に及ぼす効果は小さくなり、その結果加工されたオーステナイトの変態は主として変形帯の導入によつて促進されることになる。

3. 変態促進の定量的評価の具体例

—SKD 6 鋼におけるパーライト変態—

3.1 30% 圧延した SKD 6 鋼のパーライト変態促進に及ぼす 3 つの要因の効果の比較

ここで、共析鋼に近い SKD 6 鋼における加工硬化したオーステナイトからのパーライト変態の実験結果¹⁾ を使つて前記の変態促進効果を具体的に計算してみる。この実験では 1100°C で 30 min オーステナイト化した試料を SKD 6 鋼の bay の温度にあたる 650°C で 1 min 保持し、加工を施した試料はその温度で 1 パスで 30% 圧延後、nose 温度付近の 715°C に up quench し、種々の時間等温保持し、水焼入れした。また、加工を施さなかつた試料は 650°C から直接 715°C へ up quench し、加工材と同じ時間等温保持したあと水焼入れした。このようにして得られた無加工材と加工材の試料を光学顕微鏡によつて組織観察することによりその変態進行の様子を比較した。これらの実験結果から、粒界と粒内における変態の区別がつきやすい組織を示している、715°C で 60 min 等温保持した無加工材及び 30 min 保持した 30% 圧延材の試料を選び、その平均結晶粒切片 \bar{l} , 結晶粒径 D , 変態率 X を測定し、それらの値と成長速度 G から、核生成速度 $I_{g.b.}$ の値を計算した¹⁾。その結果を Table 1 にまとめて示す。

ここで、Table 1 に示す値と加工材における拡散変態の kinetics を表す (8) 式を用いて、Fig. 3 の各オーステナイト状態における 50% 変態時間を計算してみる。まず無加工材における 50% 変態時間 $t_{0.5}$ は、(8) 式に $X=0.5$, $q(p=0)=1$, $\bar{l}=68 \mu\text{m}$, $S_{d.b.}(p=0)=0 \mu\text{m}^{-1}$, $G=0.31 \mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, $I_{g.b.}(p=0)=20.3 \times 10^{-6} \mu\text{m}^{-2}$.

Table 1. The values of \bar{l} , D , X and G used in the calculation of $I_{g.b.}$ in both non-deformed and deformed specimen.

		not rolled	30% rolled
Transformed at 715°C for	(min)	60	30
Average linear intercept length	\bar{l} (μm)	68.0	71.0
Nominal diameter	D (μm)	76.0	80.0
Fraction transformed	X	0.187	0.284
Growth rate	G ($\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.31	0.31
Nucleation rate	$I_{g.b.}$ ($\text{mm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)	20.3	543

min^{-1} を代入することによつて求められ、 $t_{0.5}$ は 87.2 min であつた。次に Fig. 3(b) に示されるオーステナイト状態における 50% 変態時間 $t'_{0.5}$ は、(8)式に $X=0.5$, $q(p=0.3)=1.04$, $\bar{l}=68\ \mu\text{m}$, $S_{d.b.}(p=0)=0\ \mu\text{m}^{-1}$, $G=0.31\ \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, $I_{g.b.}(p=0)=20.3 \times 10^{-6}\ \mu\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ を代入することによつて求められ、 $t'_{0.5}$ は 86.1 min であつた。次に Fig. 3(c) に示されるオーステナイト状態における 50% 変態時間 $t''_{0.5}$ は、(8)式に $X=0.5$, $q(p=0.3)=1.04$, $\bar{l}=68\ \mu\text{m}$, $S_{d.b.}(p=0)=0\ \mu\text{m}^{-1}$, $G=0.31\ \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, $I_{g.b.}(p=0.3)=543 \times 10^{-6}\ \mu\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ を代入することによつて求められ、 $t''_{0.5}$ は 47.8 min であつた。次に Fig. 3(d) に示されるオーステナイト状態における 50% 変態時間 $t'''_{0.5}$ は次のようにして求めることができる。まず、SKD6 鋼における粒内での変態率が全変態率の 25% であつたことから、(8)式に $X=0.375(=0.5 \times 0.75)$, $q(p=0.3)=1.04$, $\bar{l}=68\ \mu\text{m}$, $G=0.31\ \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, $S_{d.b.}(p)=0\ \mu\text{m}^{-1}$, $I_{g.b.}(p=0.3)=543 \times 10^{-6}\ \mu\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ を代入すると、 $t=38.4\ \text{min}$ となる。これと同じ長さの時間(38.4 min)で $X=0.5$ となるとき $S_{d.b.}(p)$ の値は(8)式から $1.45 \times 10^{-2}\ \mu\text{m}^{-1}$ と求められる。そこで $X=0.5$, $q(p=0.3)=1.04$, $\bar{l}=68\ \mu\text{m}$, $S_{d.b.}(p=0.3)=1.45 \times 10^{-2}\ \mu\text{m}^{-1}$, $G=0.31\ \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, $I_{g.b.}(p=0.3)=543 \times 10^{-6}\ \mu\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ を(8)式に代入すると、 $t'_{0.5}$ は 38.4 min と求められた。このようにして求められた $t_{0.5}$, $t'_{0.5}$, $t''_{0.5}$, $t'''_{0.5}$ の値を使うと SKD6 鋼における 30% 圧延の場合、 f_g , f_I , $f_{d.b.}$ の値はそれぞれ $f_g=0.99$, $f_I=0.56$, $f_{d.b.}=0.80$ と求められる。

以上の計算により SKD6 鋼では 30% 圧延の場合、単位粒界面積当たりの核生成速度の増加がパーライト変態の促進の最も大きな要因であることがわかる。さらに、この効果は変形帯などの新たな核生成場所が粒内に導入されることによる効果の約 2.3 倍 $((1-f_I)/(1-f_{d.b.})=2.3)$ にもなつている。また 30% 圧延では、粒が伸長することによる粒界面積の増加がパーライト変態

の促進に及ぼす効果は極めて小さいことがわかる。

3.2 SKD6 鋼におけるパーライト変態促進の効果に及ぼす圧下率と加工前の粒径の影響

ここでは SKD6 鋼における、加工によるパーライト変態促進の原因となる 3 つの因子に及ぼす圧下率及び粒径の影響について考える。まず、核生成速度 $I_{g.b.}(p)$ と変形帯密度 $S_{d.b.}(p)$ を圧下率 p の関数として求めてみる。単位粒界面積当たりの核生成速度 $I_{g.b.}$ を、2.2 節の仮定(3)で示したように真歪み $\epsilon (= -\ln(1-p))$ の一次の関数とすると、SKD6 鋼における $I_{g.b.}(p)$ は $p=0$, $p=0.3$ のときの $I_{g.b.}(p)$ の値 $20.3 \times 10^{-6}\ \mu\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$, $543 \times 10^{-6}\ \mu\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ を使つて

$$I_{g.b.}(p) = 2.03 \times 10^{-5} - 1.47 \times 10^{-3} \ln(1-p) \quad (\mu\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}) \dots\dots\dots (20)$$

と求められる。また、変形帯密度 $S_{d.b.}(p)$ は、2.2 節の仮定(4)で示したように真歪み $\epsilon (= -\ln(1-p))$ の 2 次の関数であるとすれば、前節で $p=0.3$ のとき $S_{d.b.}(p=0.3)=1.45 \times 10^{-2}\ \mu\text{m}^{-1}$ であつたことから、SKD6 鋼における $S_{d.b.}(p)$ は

$$S_{d.b.}(p) = 0.114 \{ \ln(1-p) \}^2 \quad (\mu\text{m}^{-1}) \dots\dots (21)$$

と求められる。(ただし、(20), (21)式の係数は 30% 加工の時のデータのみから決めているので、圧下率 p が大きいところへ外挿するのはやや無理がある。) これらの $I_{g.b.}(p)$, $S_{d.b.}(p)$ 及び加工材における変態の kinetics を表す(8)式を用いて、SKD6 鋼における、Fig. 3 に

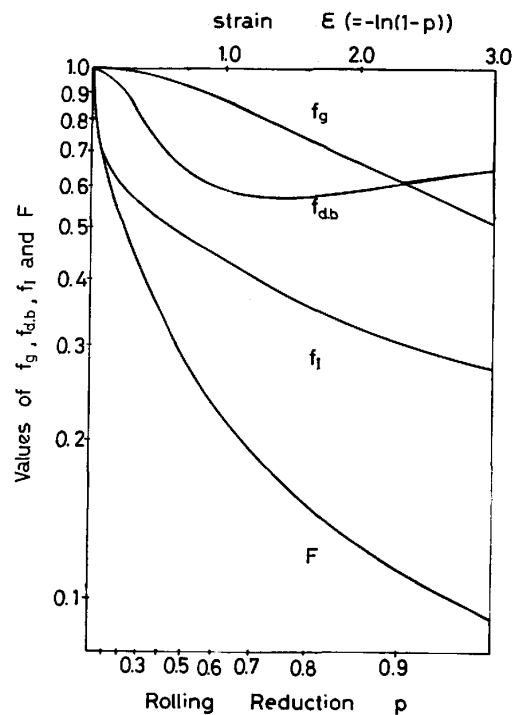


Fig. 5. Estimated variation of f_g , f_I , $f_{d.b.}$, and F as a function of p in the steel studied.

示す各オーステナイト状態での 50% 変態時間 $t_{0.5}$, $t'_{0.5}$, $t''_{0.5}$, $t'''_{0.5}$ を, ある p について計算することができる. さらにこれらを使つて各変態促進倍数が求まる. この計算を種々の圧下率 p についておこなうことにより各変態促進倍数の p による変化を求めることができる.

Fig. 5 は SKD 6 鋼における変態促進倍数 f_g , f_I , $f_{d.b.}$ の値を圧下率 p に対してプロットしたものである. この図には, 3つのすべての因子による変態促進倍数 F ($=f_g \cdot f_I \cdot f_{d.b.}$) も一緒に示してある. ここで f_g , f_I , $f_{d.b.}$, F のそれぞれの値が小さいほどパーライト変態促進の効果は大きいわけである. この図から SKD 6 鋼の場合, あらゆる圧下率 p において f_I が最も小さいこと, すなわち粒界面上での核生成速度の増加がパーライト変態の促進に最も大きい効果を及ぼすことがわかる. さらに, 変形帯が生成することによる変態促進の効果は, p が増加するとともに増える ($f_{d.b.}$ が小さくなる) が, p が 0.6 より大きくなるとほぼ一定になることがこの図から予測される.

以上 SKD 6 鋼においてはすべての圧下率において粒界面上での核生成速度の増加がパーライト変態の促進に最も大きい効果を及ぼすことが明らかになったが, ここで無加工材でのパーライト変態が site saturation に近いかどうかの判定をおこなつてみる. まず SKD 6 鋼の無加工材においては核生成速度 $I_{g.b.}$ ($p=0$) $= 20.3 \times 10^{-6} \mu\text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, 成長速度 $G=0.31 \mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, 粒径 $D=76 \mu\text{m}$ であり, これらの値から $I_{g.b.} \cdot D^3/G=28.7$ となる. この値は 2.8 節で求めた, 変態が 50% 終了したとき粒界表面の 99% が新相によつて占められる条件である, $I_{g.b.} \cdot D^3/G=451$ よりもかなり小さい値である. つまり, SKD 6 鋼の無加工材における変態の進行は site saturation の状態からはかなり遠く, 核生成と成長の両方がおこりつつ変態が進行している. このために加工による粒界面上での核生成速度の増加が変態促進に大きい効果を及ぼす結果となつている.

次に, SKD 6 鋼における 30% 圧延の際のパーライト変態促進の効果に及ぼす粒径 D の効果について計算してみる. 2.6 節で述べた方法により, ある粒径における圧下率 $p=0.3$ のときの 50% 変態時間 $t_{0.5}$, $t'_{0.5}$, $t''_{0.5}$, $t'''_{0.5}$ 及び各変態促進倍数が計算できる. この計算を種々の粒径 D についておこなうことにより, 各変態促進倍数の D による変化を求めることができる. Fig. 6 は, SKD 6 鋼において圧下率 $p=0.3$ のときの f_g , f_I , $f_{d.b.}$, F の値を計算し, D に対してプロットしたものである. このグラフからわかるように, D が変化しても f_g はほとんど変わらないが, f_I と $f_{d.b.}$ は大きく変化

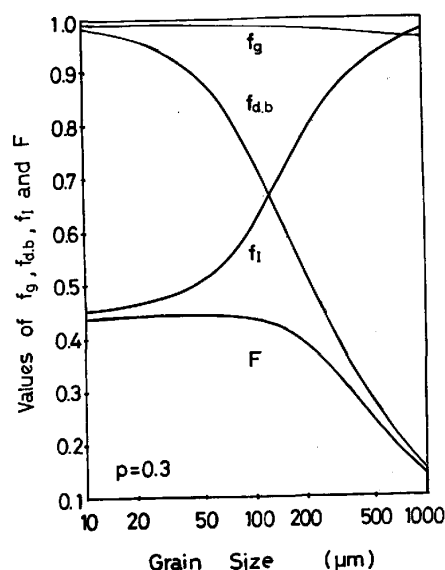


Fig. 6. Estimated variation of f_g , f_I , $f_{d.b.}$, and F as a function of austenite grain size D in the steel studied when $p=0.3$.

することがわかる. 粒界面上での核生成速度の増加による変態促進の効果 (f_I) は, 粒径が小さいところで大きく (f_I の値は小さく), 粒径が大きくなるにつれてその効果は小さく (f_I の値は大きく) なつている. これは, 粒径が小さいときは単位体積当たりの粒界面積が広いため核生成速度の増加がパーライト変態の促進に及ぼす効果は大きい, 粒径が大きくなるほど site saturation の状態に近くなり, パーライト変態速度は粒界面上での核生成速度に次第に影響されなくなるからであると理解される. 一方, 変形帯導入による効果 ($f_{d.b.}$) は, 粒径が小さいところでは非常に小さく ($f_{d.b.}$ は大きく), 粒径が大きくなるにつれて大きくなつている ($f_{d.b.}$ は小さくなつている). これは仮定(4)より, 加工度が同じ場合には単位体積当たりの変形帯密度が粒径の大きさにかかわらず同じであるのに対し, 粒径が大きくなるにつれて単位体積当たりの粒界面積の方は減少するため, 粒径が大きくなるほど粒内に変形帯ができる効果の方が大きくなるからである. SKD 6 鋼の場合, f_I と $f_{d.b.}$ の曲線は $D=126 \mu\text{m}$ の付近で交わり, パーライト変態の促進に及ぼす効果は D が $126 \mu\text{m}$ より小さいときは単位粒界面積当たりの核生成速度の増加による効果が最も大きく, D が $126 \mu\text{m}$ より大きいときは, 粒内に変形帯ができることによる効果が最も大きいことが予測される. また, 3つの効果を全部含んだ変態促進について (F) は, 同じ加工度であつても D が大きくなるほど加工の効果は大きく現れることが示されている.

4. 総 括

本研究では、加工硬化したオーステナイトからの拡散変態の速度式を導き、それをもとにして加工材における拡散変態の促進をもたらす諸因子の効果を定量的に表現することを試みた。さらに圧下率や粒径がそれらの効果に及ぼす影響を及ぼすかについて考察した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 一般に、加工によりその後の拡散変態は著しく促進されるが、その主たる原因は単位体積当たりの核生成速度の増加である。この核生成速度は主に次の3つの原因により増加する。

1) 粒が伸びることによる単位体積当たりの粒界面積の増加

2) 単位粒界面積当たりの核生成速度そのものの増加

3) 変形帯などの粒界以外の核生成場所の導入

(2) 加工材の主たる核生成場所は粒界表面と変形帯であるとする、核生成速度 $I_{g.b.}(p)$ 及び成長速度 G が時間によらず一定である場合 (パーライト変態等) には、加工材における変態 kinetics は

$$X = 1 - \exp \left[-2 \{ S_{g.b.}(p) + S_{d.b.}(p) \} G t \right]$$

$$\int_0^1 \left(1 - e^{-\pi I_{g.b.}(p) G^2 t^3 \left[\frac{1-x^3}{3} - x^2(1-x) \right]} \right) dx$$

と表せる。同様にして加工材におけるフェライト変態の kinetics は、

$$X = 1 - \exp \left\{ -\alpha (S_{g.b.}(p) + S_{d.b.}(p)) t^{\frac{1}{2}} \right.$$

$$\left. \int_0^1 \left(1 - e^{-\frac{9}{2} \pi \alpha^2 I_{g.b.}(p) t^2 (1-2x^2+x^4)} \right) dx \right\}$$

と表せる。

(3) (1) に示した変態促進の原因となる3つの因子の効果の相対的な大きさは、粒径により大きく影響される。粒径が小さいときには粒界表面上での核生成速度そのものの増加の効果が、粒径が大きいときには変形帯の導入による効果が支配的になる。

(4) 加工前の相変態挙動が site saturation の状態に近い ($I_{g.b.} \cdot D^3 / G$ の値が大きい) ほど、加工による単位粒界面積当たりの核生成速度の増加による変態促進の効果は小さい。

(5) 本研究において導いた加工材における変態速度式を使つて SKD 6 鋼をオーステナイトの未再結晶域で 30% 圧延した場合のパーライト変態を例にとつて、変態促進の原因となる諸因子に及ぼす加工度や粒径の影響を定量的に見積る方法が示された。

終わりに本研究の一部が石原・浅田研究助成金によつ

ておこなわれたことを付記するとともに、感謝の意を表します。

記 号

D : ASTM 公称粒径 (μm)

$f_{d.b.}$: $t'_{0.5}''/t'_{0.5}$

f_g : $t'_{0.5}/t_{0.5}$

f_I : $t'_{0.5}/t'_{0.5}$

F : $f_g \cdot f_I \cdot f_{d.b.}$

G : パーライトの成長速度 ($\mu\text{m}/\text{min}$)

$I_{g.b.}$: 単位粒界面積当たりの核生成速度
(number of nuclei/ $\mu\text{m}^2 \cdot \text{min}$)

\bar{l} : 平均結晶粒切片 (μm)

p : 圧下率

$q(p)$: 圧下率 p の圧延による単位体積当たりの粒界面積の増加割合, $q(p) = S_{g.b.}(p) / S_{g.b.}^0$

$S_{d.b.}$: 変形帯の密度 ($1/\mu\text{m}$)

$S_{g.b.}^0$: 無加工材における単位体積当たりの粒界面積 ($1/\mu\text{m}$)

$S_{g.b.}(p)$: 圧下率 p の圧延を施した場合の単位体積当たりの粒界面積 ($1/\mu\text{m}$)

t : 等温変態時間 (min)

$t_{0.5}$: 無加工のオーステナイト状態における 50% 変態時間 (min)

$t'_{0.5}$: Fig. 1(b) に示したオーステナイト状態における 50% 変態時間 (min)

$t''_{0.5}$: Fig. 1(c) に示したオーステナイト状態における 50% 変態時間 (min)

$t'''_{0.5}$: Fig. 1(d) に示したオーステナイト状態における変態時間 (min)

X : 変態率

X_e : 拡張体積率

Y_s : 粒界占有率

α : 放物線速度定数 (parabolic rate constant)
($\mu\text{m}/\text{min}^{1/2}$)

ϵ : 真歪み

文 献

- 1) 梅本 実, 大塚秀幸, 田村今男: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 238
- 2) J. W. CAHN: Acta Metall., 4 (1956), p. 449
- 3) S. A. SALTYKOV: "Stereometric Metallography", 2nd. ed. (1958), p. 446 [Metallurgizdat, Moscow]
- 4) ASTM Designation E 112
- 5) I. KOZASU, C. OUCHI, T. SAMPEI, and T. OKITA: Proceedings of Microalloying 75 (1975), p. 100 [Union Carbide Corp., New York]
- 6) A. SANDBERG and W. ROBERTS: "Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite"; The Metallurgical Society of AIME (1982), p. 405
- 7) J. R. BRADLEY and H. I. AARONSON: Metall. Trans., 12A (1981), p. 1729
- 8) M. UMEMOTO, N. NISHIOKA, and I. TAMURA: Proc. of 3rd Int. Cong. on Heat Treatment of Materials, Shanghai, China (1983) Nov. p. 2, 31