

論 文

UDC 669.14.018.298 : 669.15'26'28-194.2 : 621.9.016.3 : 620.186.8

低合金鋼のオーステナイト結晶粒度に およぼす冷間加工の影響について*

木下 修司**・上田 武司**・鈴木 章***

Effect of Cold Working on Austenite Grain Coarsening Temperature in Low Alloy Steels

Shushi KINOSHITA, Takeshi UEDA, and Akira SUZUKI

Synopsis:

The effect of cold working on the austenite grain coarsening temperature has been investigated by the use of low carbon chromium molybdenum steels and the result has been discussed in terms of the particle size of aluminum nitride and the initial grain size of austenite.

It is indicated that the austenite grain coarsening temperature decreases with an increase of the reduction of cold rolling and increases by an annealing treatment subsequent to cold rolling in the temperature range of 500 to 700°C.

There is no significant difference between the particle size of aluminum nitride precipitated in austenite of the cold rolled steel and that of the steel not rolled.

The initial grain size of austenite decreases with an increase of cold reduction and increases by annealing at 700°C after cold rolling. It can thus be concluded that the depressed austenite grain coarsening temperature for the cold steel results from finer initial grain size of austenite formed from the deformed ferrite-carbide aggregates.

(Received Nov. 16, 1972)

1. 結 言

著者らはこれまでに低合金鋼のオーステナイト結晶粒粗大化温度（以下単に結晶粒粗大化温度と呼ぶ）におよぼす熱処理、熱間加工などの効果について調べ、これらの前処理が結晶粒粗大化温度におよぼす効果を、AINの大きさならびにオーステナイトの初期粒度の観点から詳細に検討を加えてきた^{1)~4)}。その結果、前処理の効果はそれがAINの大きさならびにオーステナイトの初期粒度におよぼす効果によつて説明することができるが、前組織、熱間加工の効果など、多くの場合結晶粒粗大化温度は前処理によるオーステナイトの初期粒度の変化により、大きく左右されることを示してきた。

本研究では冷間加工が結晶粒粗大化温度にどのような影響をおよぼすかを調査し、その効果をこれまでと同様に、そのAINの大きさおよびオーステナイトの初期粒度におよぼす効果の点から考察した。

冷間加工が結晶粒粗大化温度におよぼす効果を調べたこれまでの研究報告は割合に少ない。冷間加工をほどこ

した試料をオーステナイト化したときにオーステナイト結晶粒度がどのように変化するかについては、研究者、実験方法によつて必ずしも一致した傾向を示していない⁵⁾⁶⁾。また冷間加工による結晶粒粗大化温度の変化の原因についてはほとんど検討がなされていない現状である。

2. 供試材ならびに実験方法

2.1 供試材

供試材は Table 1 に示す化学組成を有する Cr-Mo 鋼で、100kVA 塩基性高周波炉にて溶製後、90 kg の丸型鋼塊とし、皮削り後断面が 20 mm × 30 mm になるように鍛伸して試験に供した。

2.2 実験方法

冷間加工は実験用小型冷間圧延機で行なつた。オーステナイト結晶粒界の現出には表面活性剤を添加した飽和

* 昭和47年10月本会講演大会にて発表
昭和47年11月16日受付

** (株)神戸製鋼所中央研究所

*** (株)神戸製鋼所鍛造本部技術部 工博

Table 1. Chemical composition of steels (wt%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	N
X	0.18	0.27	0.46	0.006	0.009	0.03	1.01	0.20	0.044	0.0089
Y	0.19	0.33	0.46	0.008	0.010	0.08	1.02	0.23	0.055	0.0072

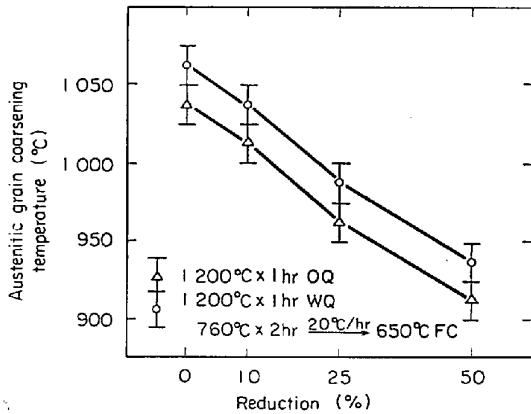


Fig. 1. Austenitic grain coarsening temperatures indicated as a function of reduction in cold rolling (CR). (Steel Y)

ピクリン酸水溶液を用い、オーステナイトの状態から急冷して一部ベーナイトを含むマルテンサイトとした試料をこの腐食液で腐食した。粒度測定は ASTM の截片法 (Intercept procedure) にしたがった。粒度試験のためのオーステナイト化時間は工業的試験の場合を考慮して 5hr とした。結晶粒粗大化温度を正確に求めることは困難であるので、25°C の加熱温度間隔でオーステナイト結晶粒度を測定し、混粒の発生が初めて認められた温度を上限温度とした。そしてそれより 25°C 低い温度を下限温度 (この温度では混粒の発生はなく整細粒である) とし、図には結晶粒粗大化温度を上限と下限の温度範囲で示した。なお、本研究においても前報³⁾⁴⁾と同様に、875°C に 5hr 保持したときのオーステナイト結晶粒度をオーステナイトの初期粒度と定義した。

AIN の分析も前報¹⁾と同様に学振のブロムエステル法に準じて行なつた。AIN の電子顕微鏡観察のための抽出レプリカの作成には、第一段腐食液として 1% 硝酸アルコール溶液を、また第二段腐食液として 4% 硝酸アルコール溶液を用いた。AIN の大きさは電子顕微鏡写真にあらわれた個々の AIN 粒の面積を測定し、その面積あるいはその面積と同じ面積を有する正方形 (等価正方形) の辺長で表示した。なお供試材は初期条件を一定にするために、冷間圧延前にすべて 1200°C に 1hr 加熱して AIN を溶体化し、その後室温まで急冷した。そして冷間圧延前の前処理として溶体化処理のままと溶体化後フェ

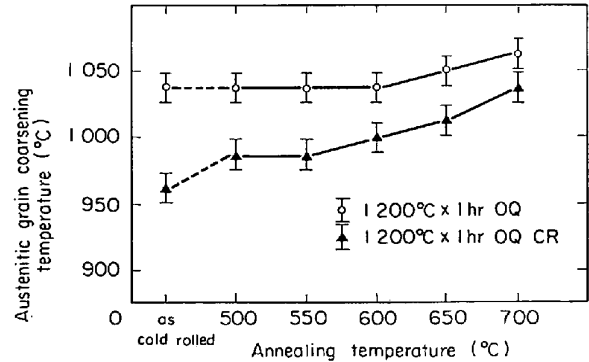


Fig. 2. Effect of annealing subsequent to 50% cold rolling on austenitic grain coarsening temperature. (Steel X)

ライトの高温域に加熱して AIN を十分に析出させたものの 2通りの処理を選んだ。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 冷間加工と結晶粒粗大化温度

Fig. 1 は供試材 Y を 1200°C に 1hr 加熱して AIN を溶体化後室温まで急冷したものおよび溶体化後 760°C に 2hr 加熱して AIN を十分析出させ、その後 650°C まで徐冷して炭化物を球状化させたものに、冷間圧延により 0~50% の加工を加えた後、オーステナイト域に昇温して結晶粒粗大化温度を調べた結果である。いずれの前処理の場合も、圧延率の増加とともに結晶粒粗大化温度は低下することが知られる。Fig. 2 は供試材 X を溶体化処理後 50% 冷間圧延し、続いてこれを 500~700°C の温度に 5hr 加熱して低温焼なましした場合の、焼なまし温度と結晶粒粗大化温度の関係を調べた結果である。比較のために熱履歴は同じであるが、冷間圧延を加えていない場合の結果もあわせて示してある。冷間圧延のままの状態では冷間圧延を行なっていないものに比較して結晶粒粗大化温度はかなり低い、低温焼なましを行なうと上昇することがわかる。その結晶粒粗大化温度の上昇は 550°C 以上の温度でいちじるしいが、冷間圧延を行なっていないものでも 600°C 以上の温度に加熱すると、冷間圧延を行なつたものと同様に、結晶粒粗大化温度が上昇する現象がみられる。しかしながらその程度は冷間圧延を行なつたものほどいちじるしくない。Fig. 3

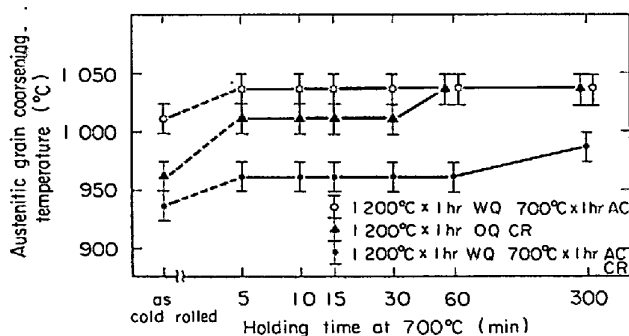


Fig. 3. Effect of annealing time at 700°C subsequent to 50% cold rolling on austenitic grain coarsening temperature. (Steel X)

には供試材 X を 1200°C に 1hr 加熱して溶体化急冷後 50% 冷間圧延を行なったもの、および溶体化急冷後 700°C に 1hr 再度加熱して AlN を十分に析出させた後、50% 冷間圧延を行なったものを 700°C で低温焼なましを行ない、焼なまし時間と結晶粒粗大化温度の関係を調査した結果を示す。参考のため溶体化のままで冷間圧延を行なっていないものについても示してある。Fig. 2 と同様にいずれの前処理の場合も保持時間の経過とともに結晶粒粗大化温度は上昇することが知られるが、冷間圧延を行なっていないものではその上昇の程度が軽微であるのに対し、冷間圧延を行なったものではかなり顕著である。

冷間加工による加工率と結晶粒粗大化温度の関係を調べた報告はきわめて少ないが、河村、石田⁷⁾らによると熱間圧延のままの試料においては熱間圧延のままの結晶粒粗大化温度が低いものでは加工率の増加とともに結晶粒粗大化温度は上昇するが、高いものでは逆に低下する傾向がある。McCarthy⁸⁾は冷間加工率が小さいときは一時結晶粒粗大化温度は低下するが、加工率が大きくなると逆に上昇すると述べている。本実験結果は河村、石田らによる熱間圧延のままの結晶粒粗大化温度が高いものに冷間加工を加えた場合と傾向的に一致しているが、河村、石田らも指摘しているように、熱間加工、熱処理などの履歴によつて冷間加工による結晶粒粗大化温度の変化が影響を受けることは十分に察せられる。冷間加工後の低温焼なましは結晶粒粗大化温度におよぼす効果についての報告は見あたらない。

3.2 冷間加工と AlN の析出

Fig. 4 は供試材 X を 1200°C に 1hr 加熱して AlN を溶体化し室温まで急冷後、400~1200°C に 5hr 加熱した場合と、溶体化急冷後 50% の冷間圧延を加え、続いて 400~1000°C に 5hr 加熱した場合の AlN の析出

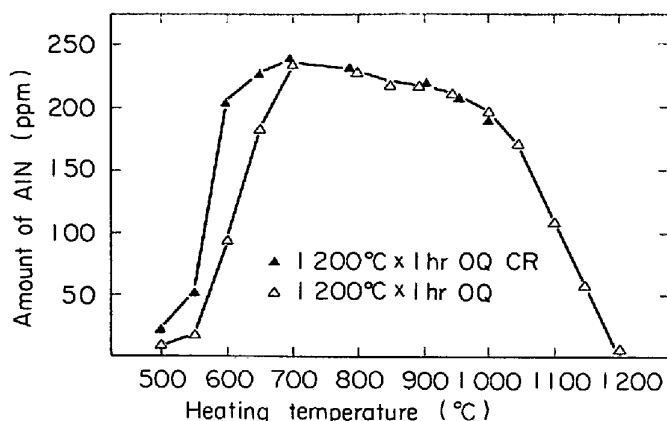


Fig. 4. Amount of AlN precipitated as a function of temperature, when held for 5hr after solution treatment and solution treatment and 50% cold rolling. (Steel X)

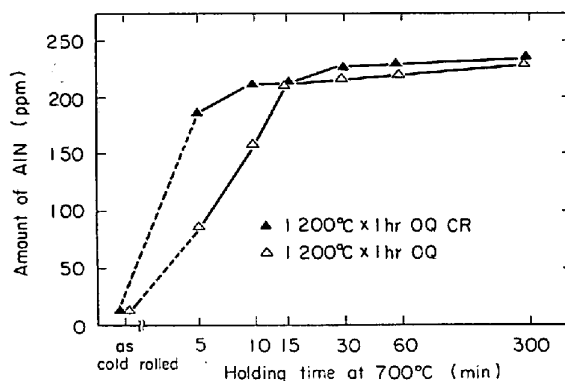


Fig. 5. Amount of AlN precipitated as a function of holding time at 700°C after solution treatment and solution treatment and 50% cold rolling. (Steel X)

曲線を示す。700°C 以上の温度では冷間圧延の有無による AlN の析出量に差は認められないが、500~700°C 間では差がみられ、冷間圧延を行なうと AlN の析出がより低温からはじまることが知られる。Fig. 5 は冷間圧延の有無による 700°C における保持時間と AlN 量の関係を供試材 X を用いて調べた結果である。冷間圧延を行なわないものでは 15~30 min の加熱保持により AlN の析出量はほぼ飽和に達するのに対し、50% 冷間圧延を行なったものでは 10~15 min の加熱でほぼ析出が完了し、冷間圧延によつて AlN の析出が促進されることが示されている。冷間加工が AlN の析出を促進することは LESLIE ら⁹⁾によつて報告されており、八木ら¹⁰⁾¹¹⁾によつて確認されている。このようにフェライトの高温域における AlN の析出は冷間加工によつて容易になるが、冷間加工を加えなくても 700°C では約 15 min 保持することにより AlN の析出はほぼ完了し、フェライ

Table 2. Effect of preheat treatments on particle size of AlN at 950°C (Steel X).

Mark	Preheat treatment	Particle size of AlN* (X10 ⁶ mm ²)	Equivalent square edge length (X10 ³ mm)	AGCT** (°C)
A	1 200°C × 1 hr WQ	0.017	0.13	1 000
B	1 200°C × 1 hr OQ, CR	0.017	0.13	950
C	1 200°C × 1 hr OQ, CR, 700°C × 1 hr AC	0.015	0.12	1 025
D	1 200°C × 1 hr WQ, 700°C × 1 hr AC	0.014	0.12	1 025
E	1 200°C × 1 hr WQ, 700°C × 1 hr AC, CR	0.015	0.12	925
F	1 200°C × 1 hr WQ, 700°C × 1 hr AC, CR 700°C × 1 hr AC	0.017	0.13	950

* Average particle size indicated by area of individual particles appeared on electron micrographs

** Austenitic grain coarsening temperature

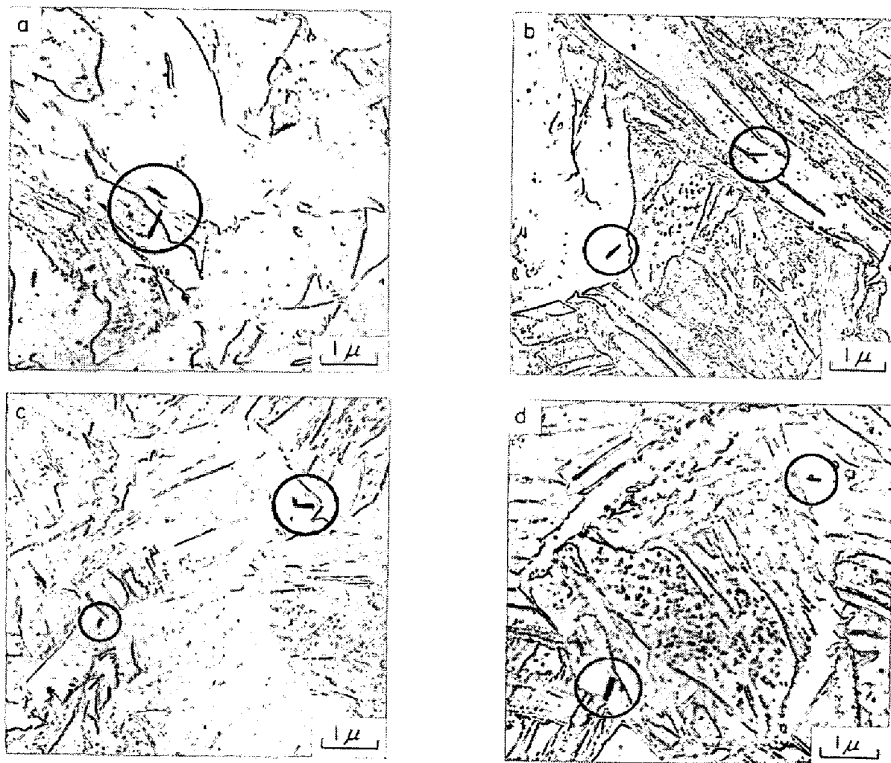


Photo. 1. Electron micrographs (Steel) precipitated at 950°C for 5hr after treatments of:

- 1 200°C × 1hr OQ, and 50% cold rolled.
- 1 200°C × 1hr OQ, 50% cold rolled and 700°C × 1hr AC.
- 1 200°C × 1hr WQ, 700°C × 1hr AC and 50% cold rolled.
- 1 200°C × 1hr WQ, 700°C × 1hr AC, 50% cold rolled and 700°C × 1hr AC.

ト高温域での AlN の析出速度はきわめて大きいことが知られる。粒度試験のための加熱温度がオーステナイト領域であり、その保持時間が 5hr であるということを考慮すると、Fig. 4 より冷間加工による結晶粒粗大化温度の変化は AlN の析出量とは無関係であると考えられる。このことは河村、石田⁷⁾も認めている。

結晶粒粗大化温度が AlN の大きさによつて左右されることはよく知られている¹²⁾ので、冷間圧延ならびにそ

の後の熱処理が AlN の大きさに影響をおよぼすかどうかを調べることは意味があると思われる。このような意味から供試材 X を用いて各種の前処理後 950°C に 5hr 加熱したときの AlN を電子顕微鏡により観察し、その大きさを測定した。Table 2 に結晶粒粗大化温度（下限温度を示す）と AlN の大きさの測定結果を示す。AlN の大きさは 50~80 個の AlN の平均値である。Photo. 1 に各種の前処理後 50% 冷間圧延を行なったものならび

に冷間圧延後低温焼なましを行なったものを、950°Cに5hr加熱したときのAINの電子顕微鏡写真を示す。写真にみられる多数の点状析出物は焼入時に析出した炭化物である。なお冷間圧延を加えてないものについては、これまでに報告してきたもの^{2)~4)}と大差がないので省略したが、冷間圧延の有無によるAINの形状、析出状態などに差は認められなかった。

Table 2 からわかるように、溶体化のままの処理AのAINの大きさは等価正方形の辺長で表示した場合0.13 μ であり、それに50%冷間圧延を加えた処理Bも0.13 μ で等しい。冷間圧延後700°Cで焼なましした処理Cではやや小さく0.12 μ であるが、処理AおよびBと実験誤差内で等しいと考えられる。また溶体化処理後低温焼なましを行なった処理D、それに50%冷間圧延を加えた処理Eではいずれも0.12 μ であり、冷間圧延後さらに700°Cで焼なましした処理Fでは0.13 μ でこの3種の処理の場合もAINの大きさに差はないと考えられる。このことから冷間加工およびその後の低温焼なましはAINの大きさにおよぼす効果は非常に小さく、無視できると推察される。これらの結果とこれまで報告してきた熱処理ならびに熱間加工がAINの大きさにおよぼす効果³⁾⁴⁾を総合して考えると、市販鋼程度のAl, Nを含有する低合金鋼においては、AINの大きさを変えるものは熱履歴であり、熱履歴が同じであれば熱間あるいは冷間加工そのものはAINの大きさにほとんど影響をあたえないと考えられる。Table 2においてAINの大きさと結晶粒粗大化温度の関係をみると、全体としてはつきりした傾向は認められず、AINの大きさからは冷間加工による結晶粒粗大化温度の変化を説明することはできないことが知られる。

冷間加工を加えた後、鋼をオーステナイト域に加熱してオーステナイト中でのAINを観察した報告は著者らの知るかぎりでは見あたらない。しかしながら、Al, Nを過飽和に固溶させた鋼に冷間加工を加えた後フェライトの高温域に加熱してAINを析出させると、冷間加工を加えないものに比較して析出するAINは小さいといわれている¹³⁾。本実験ではオーステナイト域への加熱に際して室温から950°Cまで平均約3°C/secの加熱速度で昇温させたので、溶体化状態の試料の場合、昇温途中にフェライトの高温域でAINがどの程度析出したか明らかでないが、析出したとしてもFig. 5の結果から推察されるように十分でなく、かなりの量のAl, Nを固溶したままオーステナイト域に持ちこたされることが考えられる。本供試材の場合 $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態は核生成-成長による拡散型変態と考えられる¹⁴⁾¹⁵⁾ので、 $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態の際に冷

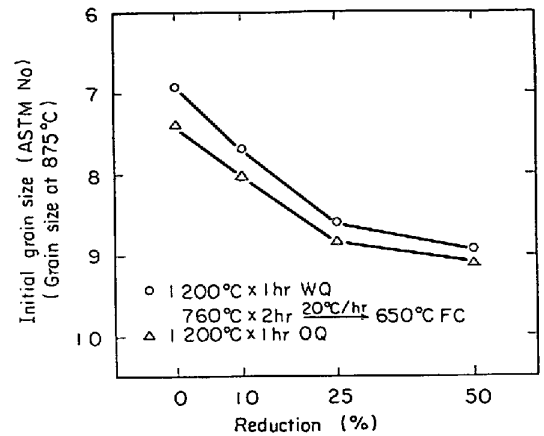


Fig. 6. Initial austenitic grain size indicated as a function of reduction in cold rolling. (Steel Y)

Initial austenitic grain size is defined to be austenitic grain size at 875°C for 5hr.

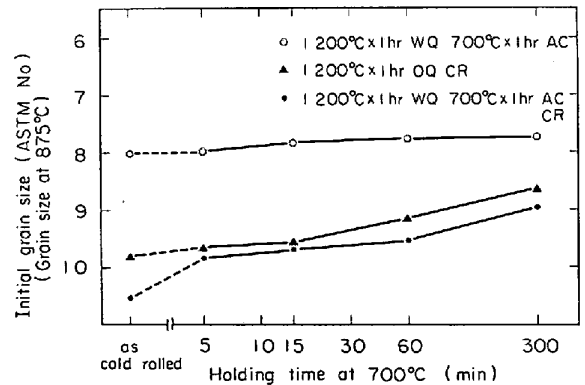


Fig. 7. Effect of annealing time at 700°C subsequent to 50% cold rolling on initial austenitic grain size. (Steel X)

間加工によつて導入された格子欠陥は消失してそのAINにおよぼす効果があらわれなかつたものと考えられる。またオーステナイト化する前に700°Cで焼なましを行なったものでは焼なまし中にAINが十分に析出し、冷間圧延を加えたものでは加えないものに比較して微細に析出していたと考えられる¹³⁾が、微細なものほど凝集しやすいので950°Cに5hr保持する間にAINが凝集し、冷間圧延の効果があらわれなかつたものと考察される。

3.3 オーステナイトの初期粒度

以上の実験から、冷間加工を行なうと結晶粒粗大化温度は低下し、低温焼なましを行なうと上昇することがわかつたが、オーステナイト中でのAINの大きさにおよぼす冷間加工ならびに低温焼なましの効果について調べたところ、その効果はほとんど認められなかつた。した

がつて冷間加工による結晶粒粗大化温度の低下ならびに冷間加工後の低温焼なまし結晶粒粗大化温度におよぼす効果は AIN の大きさの変化によるものではないと結論した。

結晶粒粗大化温度は AIN の量および大きさだけでなく、 $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態によつて生まれたばかりのオーステナイト結晶粒度に強く依存することが知られている³⁾⁴⁾。したがつて前報³⁾⁴⁾と同様にここでも 875°C に 5hr 保持してオーステナイトの初期粒度を求め、それにおよぼす冷間加工ならびに低温焼なましの影響を調査した。

Fig. 6 は Fig. 1 と同様に供試材 Y を 1200°C に 1hr 加熱後急冷したものおよび 1200°C から室温まで急冷した後に 760°C に 2hr 加熱し、引き続いて 650°C まで徐冷して炭化物を球状化させたものに、0~50% の冷間圧延を加えた後 875°C に 5hr 加熱してオーステナイトの初期粒度の変化を調べた結果である。圧延率の増加とともに初期粒度は小さく（粒度番号は大きく）なることがわかる。その傾向は Fig. 1 に示した圧延率と結晶粒粗大化温度の関係と一致し、前処理については、各圧延率とも結晶粒粗大化温度の高い球状化焼なましを行なった場合の方がオーステナイトの初期粒度は大きい（粒度番号は小さい）。Fig. 7 は Fig. 3 に示した 700°C における保持時間に対する結晶粒粗大化温度の変化に対応して、オーステナイトの初期粒度の変化を調べたものである。すなわち各種の前処理をほどこした供試材 X に 50% の冷間圧延を加えた後、700°C に加熱して 5~300 min 保持後急冷して、焼なまし時間とオーステナイトの初期粒度の関係を求めた結果である。冷間圧延を加えていないものも比較のために示してある。冷間圧延を行なっていないものではオーステナイトの初期粒度は大きく、保持時間に対する初期粒度の変化は小さい。一方冷間圧延を行なったものでは冷間圧延のままでは初期粒度は小さいが保持時間の経過とともに初期粒度は急速に大きくなるがわかる。この傾向は Fig. 3 の焼なまし時間と結晶粒粗大化温度の関係と定性的に一致している。これらのことから、冷間加工ならびにその後の低温焼なましによる結晶粒粗大化温度の変化はオーステナイトの初期粒度の変化に強く依存していることが察せられる。

前処理として熱処理および熱間加工を行なった場合、結晶粒粗大化温度ではオーステナイトの初期粒度と AIN の量ならびに大きさの間に ZENER の関係¹⁰⁾が成立することが示されている³⁾⁴⁾ので、ZENER にしたがつてさきに示した Table 2 の AIN の大きさの測定結果と Fig. 4 から求めた結晶粒粗大化温度における AIN の析出量、ならびに Fig. 7 から求めたオーステナイト初期の粒度

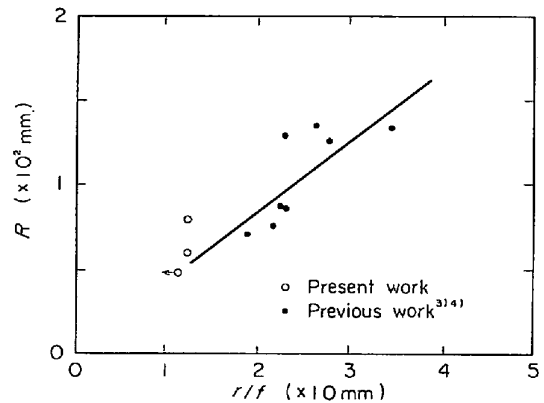


Fig. 8. Relationship between R and r/f , where R is mean radius of initial austenitic grains, r mean half edge length equivalent square of AIN particles and f volumetric fraction of AIN particles.

の関係をプロットした結果を Fig. 8 に示してある。図において r は等価正方形の辺長の 1/2 で示した AIN の大きさであり、 f は体積分率で示した結晶粗大化温度における AIN の析出量である。また R はオーステナイトの初期粒の半径である。Table 2 の AIN の大きさの測定結果はいずれも 950°C における結果であり、950°C が結晶粒粗大化温度のものは処理 B と処理 F だけであり、他のものは AIN の大きさを測定した温度と結晶粗大化温度は一致してしない。したがつて AIN の測定温度と結晶粒粗大化温度の食い違いが大きい処理 A, C および D は除いたが、食い違いの小さい処理 E の結果はデータ点に矢印を付して参考のために示した。矢印の方向は結晶粒粗大化温度で AIN の大きさを測定し、その結果にもとづいてプロットすればデータ点が移動すると考えられる方向を示してある。なお Fig. 8 には本実験結果とともに、これまでに報告した熱処理、熱間加工による結果³⁾⁴⁾もあわせて示してある。これからわかるように、冷間加工を行なった場合にも ZENER の関係が成立し、しかもこれまでに用いた供試材はいずれも低炭素 Cr-Mo 鋼ではあるが Al, N の含有量は若干異なっているにもかかわらず一つの関係に整理されることは大変興味深い。このように冷間加工を行なったものおよび冷間加工後低温焼なましを行なったものに対しても ZENER の関係が成立することから、本実験における冷間圧延を含む各種の処理によつて結晶粒粗大化温度が変化する現象はそれによつてオーステナイトの初期粒度が変化するためであると結論され、AIN の役割はオーステナイトの粒成長阻止であると考えられるから、冷間加工による結晶粒粗大化温度の低下はオーステナイトの初期粒度の微細化による粒成長力の増大に起因すると考察

される。

冷間加工を行なうとフェライト中に格子欠陥が創出されるばかりでなく、炭化物にも欠陥が生ずる^{17)~19)}。このように数多くの欠陥を内蔵した鋼をオーステナイト化すると、核生成に有利な場所がたくさん存在するので、 $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態に際してオーステナイトの核生成が容易になり、したがってオーステナイトの初期粒度が小さくなつて結晶粒粗大化温度は低下するが、冷間加工を加えた鋼をフェライトの高温域で焼なましすると欠陥の統合あるいは消滅が起こつてオーステナイトの核生成に有利な場所の数が減少し、核生成速度が小さくなつてオーステナイトの初期粒度は大きくなり、その結果結晶粒粗大化温度が高くなつたと考えられる。Fig. 2 および Fig. 3 において冷間圧延を行なっていない溶体化のままの試料においても低温焼なましによつて結晶粒粗大化温度が上昇するのは、溶体化のままの試料はペーナイトを含むマルテンサイト組織であるので、低温焼なましにより欠陥の消滅、炭化物の析出、粗大化などの現象が起こり、冷間加工を行なつた場合と同様にオーステナイトの生成に際して核生成に有利な場所が少なくなりオーステナイトの初期粒度が大きくなつたためであると推察される。

4. 総 括

低炭素 Cr-Mo 鋼を用いてオーステナイト結晶粒粗大化温度におよぼす冷間加工の効果を調査し、冷間加工によつて結晶粒粗大化温度が低下する原因を AlN の量と大きさならびにオーステナイトの初期粒度の観点から考察し大略次の結果を得た。

1) 鋼に冷間加工を加えると加工率の増加とともに結晶粒粗大化温度は低下する。

2) 冷間加工によつて結晶粒粗大化温度が低下した鋼を 500~700°C に加熱して焼なましを行なうと結晶粒粗大化温度は上昇する。

3) 冷間加工によつて結晶粒粗大化温度が低下した鋼を 700°C で加熱すると、加熱時間の経過とともに結晶粒粗大化温度は上昇する。

4) AlN を溶体化したまま急冷した試料を冷間加工後再度加熱すると、冷間加工を加えていないものより低温から AlN の析出がはじまる。そして冷間加工による AlN の析出促進効果は 700°C 以下の温度域において顕著であり、オーステナイト域ではその効果はほとんど認められない。

5) AlN を溶体化処理後各種の熱処理を行なつて 950°C に 5hr 加熱したときの AlN の平均の大きさにおよぼす冷間加工の効果を調べたが AlN の大きさに変化は認められず、冷間加工による結晶粒粗大化温度の低下の原因は AlN の大きさの変化ではないと推察される。

6) 冷間加工を行なうと、加工率の増加とともにオーステナイトの初期粒度は小さく (粒度番号は大きく) なる。

7) 冷間加工後フェライトの高温域で焼なましを行なうと、オーステナイトの初期粒度は大きくなる。

8) 冷間加工による結晶粒粗大化温度の低下の原因はオーステナイトの初期粒度の微細化にあると考察される。

文 献

- 1) 鈴木, 木下, 伊藤, 上田: 鉄と鋼, 53 (1967), p. 1299
- 2) 木下, 上田, 鈴木: 日本金属学会誌, 34 (1970), p. 861
- 3) 木下, 上田, 鈴木: 日本金属学会誌, 36 (1972), p. 403
- 4) 木下, 上田, 鈴木: 鉄と鋼, 59 (1973), p. 446
- 5) R. SCHEMPF and C. L. SHAPIRO: Trans. AIME, 125 (1937), p. 411
- 6) 益子: 鉄と鋼, 42 (1956), p. 482
- 7) 河村, 石田: 鉄と鋼, 43 (1957), p. 241
- 8) B. L. McCARTHY: Iron Age, Oct. 10 and 17, (1935)
- 9) W. C. LESLIE, R. L. RICKETT, and C. L. WALTON: Trans. ASM, 46 (1954), p. 1470
- 10) 八木, 福塚, 小川: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 980
- 11) 小川, 福塚, 八木: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 872
- 12) A. B. CHATTERJEA and B. R. NIJHAWAN: Iron Steel, 40 (1967), p. 340
- 13) 花井, 竹本, 水山, 佐直: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 386
- 14) H. W. PAXTON: "Transformation and Hardenability in Steels", Climax Molybdenum Company of Michigan, (1967), p. 3
- 15) G. R. SPEICH and A. SZIRMAE: Trans. AIME, 245 (1969), p. 1063
- 16) C. ZENER: See C. S. Smith in Trans. AIME, 175 (1949), p. 15
- 17) J. D. EMBURY and R. M. FISHER: Acta Met., 14 (1966), p. 147
- 18) A. H. HOLTZMAN, J. C. DANKO, and R. D. STOUT: Trans. AIME, 212 (1958), p. 475
- 19) 井上, 木下: 塑性加工春季講演会講演論文集, (1972) p. 105