

© 1992 ISIJ

論 文

17%Cr フェライト系ステンレス鋼の熱間 圧延板金属組織とリジング特性に及ぼす 熱間圧延条件の影響

植松美博*・山崎浩一*2

Effects of Hot Rolling Conditions on Hot Rolled Microstructures and Ridging Properties in 17%Cr Ferritic Stainless Steel

Yoshihiro UEMATSU and Koichi YAMAZAKI

Synopsis:

Effects of rolling temperature and inter-pass annealing on the microstructures of hot rolled and annealed strips and the ridging property of cold rolled and annealed sheet have been investigated of continuously cast slab of Nb added 17%Cr stainless steel which had a near $\{100\}$ //*N. D* orientation.

In such a case of no inter-pass annealing where no recrystallization during hot rolling occurs, decrease in the rolling temperature increases deformation bands, and these banding makes recrystallized structures of hot rolled strip fine. When recrystallization occurs by inter-pass annealing, microstructures of hot rolled strip become finer and uniform recrystallization occurs after hot strip annealing.

The ridging property of cold rolled and annealed sheet corresponds to the condition of recrystallization of hot rolled and annealed strip. When coarse unrecrystallized domains remain in the center layer of annealed hot strip, it causes severe ridging in final annealed sheet. These results suggest that the unrecrystallized center layer of hot rolled and annealed strip retains strong $\{100\}$ //*N. D* orientation and thereby deteriorates ridging properties of final annealed sheet. The suggestion is supported by another experiment of one pass hot rolling.

Key words: ferritic stainless steel; 17%Cr steel; hot rolling; microstructure; crystal orientation; ridging.

1. 緒 言

フェライト系ステンレス鋼薄板は、深絞り加工時にリジングと呼ばれる縞状の表面起伏を生じる場合があり、大きな欠点となっている¹⁾。リジングの発生は冷延焼鈍鋼帯中に存在する帯状の集合組織によるものと考えられ^{2)~4)}、その成因として、熱延鋼帯中の金属組織に存在する粗大な回復フェライト粒がその後の冷延焼鈍工程でも結晶方位の近い集合体として受け継がれるためではないかと考えられている⁵⁾。熱延過程において、この粗大なフェライト粒組織の微細化を図ることができれば、リジング特性の改善に有効なものと期待できる⁶⁾。

熱延での組織の微細化に対し、変形帯が利用できるのではないかと考え一連の研究を進めてきたが、その

結果、1000~1100°Cの温度域でバンド状の変形帯が発生し、変形組織が微細化することが明らかとなった^{7)~10)}。これらの変形帯の形成は熱延板焼鈍での再結晶組織に、さらには最終の冷延焼鈍板のリジングに影響を及ぼすと考えられるが、この点を研究した報告は見当たらない。

そこで、本研究では、 $\{100\}$ //*N. D*の初期方位を有するNb含有17%Crフェライト単相系ステンレス鋼の連続製造スラブの柱状晶部分を用いて抽出温度、パス間焼鈍の有無および熱延仕上温度を変えた多パス熱延実験を行い、熱延板、熱延焼鈍板の金属組織と冷延焼鈍板のリジング特性に及ぼす影響を研究した。それらの結果をもとに、リジング特性に及ぼす熱延条件の影響を熱延での変形帯の形成の観点から考察した。

昭和61年4月本会講演大会にて発表 平成3年8月5日受付 (Received Aug. 5, 1991)

* 日新製鋼(株)鉄鋼研究所 (Steel R & D Laboratories, Nisshin Steel Co., Ltd., 4976 Nomuraminamimachi Shinnanyo Yamaguchi 746)

*2 日新製鋼(株)鉄鋼研究所 (現:日新製鋼(株)研究管理部) (Steel R & D Laboratories, Now R & D Dept., Nisshin Steel Co., Ltd.)

2. 供試材および実験方法

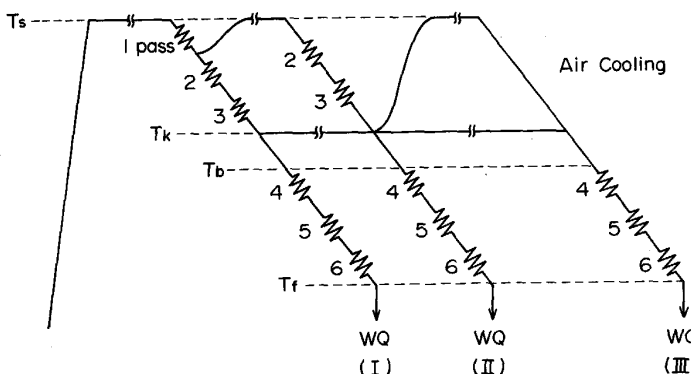
供試材は、化学成分を Table 1 に示す極低炭素、窒素 Fe-17%Cr-0.3%Nb の連続鋳造スラブを用いた⁹⁾。熱延用のサンプルは、スラブ横断面の柱状晶部分から柱状晶の成長方向が板厚方向となるように切り出した。この時の各柱状晶の初期方位はほぼ $\{100\} // N. D$ ($N. D$ は圧延面の法線を示す) であった⁹⁾。熱延用サンプルの寸法は、40 mm t × 50 mm w × 80 mm L のブロックとした。

熱延はロール径 330 mm ϕ 、ロール回転数 50 rpm の実験室熱延機で行った。熱延条件の影響は、抽出温度、パス間焼鈍 I. A の有無、および、仕上熱延温度に注目した。熱延抽出温度は 1050°C ~ 1230°C である。圧延パス・スケジュールは 40/24/17/12/7/5.5/4.0 mm の 6 パス圧延とした。Fig. 1 に熱延条件の概要を示す。6 パス熱延でのパス間焼鈍は、(I) パス間焼鈍なし、(II) インラインのデイレイを想定した 1 回焼鈍、および (III) 再結晶組織を得ることを目的とした 2 回焼鈍とした。焼鈍の位置は 1 パス後または/および 3 パス後とした。パス間の焼鈍条件は、抽出温度 T_s または 3 パス熱延後の温度に近い T_k で 2~10 min 保持とした。また、3 パス熱延後にテーブル上で放冷して 4 パス目の入り口温度 T_b を調整し、仕上温度 T_f をおおむね 600~810°C の範囲で変化させた。熱延板焼鈍はすべて 1000°C で 1 min の均熱とし、冷延は 4.0/2.0/0.9 mm の中間焼鈍を含む 2 回冷延焼鈍の 2CR の工程で行い、中間および仕上焼鈍はいずれも 950°C で 1 min の均熱とした。

リジング試験は圧延方向と平行に採取した平行部 35

Table 1. Chemical composition of specimen used (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	N	Nb	Fe
0.006	0.58	0.24	0.023	0.003	16.17	0.012	0.29	Bal.



- (I) Straight process without inter-pass annealing
- (II) Inter-pass annealing at T_s or T_k after 1st or 3rd pass rolling
- (III) Inter-pass annealings at T_s and/or T_k after 1st pass and 3rd pass rolling
- T_s : Soaking temperature
- T_k : Keeping temperature
- T_b : Beginning temperature at 4th pass
- T_f : Finishing temperature at 6th pass

Fig. 1. Schematic illustration of three types of experimental hot rolling conditions.

mm w × 75 mm L の試験片を用い、20% の引張与歪みを付与してから表面粗さ計を用いて幅方向に中心線平均粗さ R_a (Cut off 値 2.5 mm) を測定した。また、表面を #1000 のペーパーで幅方向に研磨し、リジングの状態を標準試料と比較し目視により A (良) ~ E (劣) の 5 段階に判定した。リジング試験の n 数は 3 とした。

Table 2 に 6 パスおよび 3 パス段圧熱延の実績、熱延板の硬さ測定結果および最終の冷延焼鈍板のリジング試験結果を示した。

金属組織調査は熱延材の圧延方向と平行な L 断面について行った。3 パス熱延材は熱延板組織および熱延焼鈍板組織のそれぞれを光学顕微鏡で観察した。また、3 パス熱延後の段圧組織を光学顕微鏡および位相差顕微鏡で観察した。

3. 実験結果

3.1 リジング特性に及ぼす熱延条件の影響

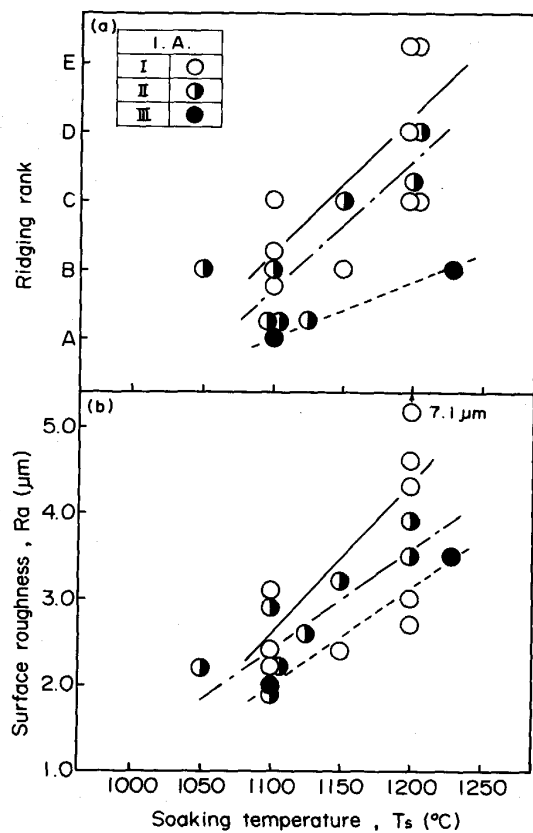
Table 2 の結果から、リジング特性を抽出温度 T_s とパス間焼鈍 I. A の有無で整理した結果を Fig. 2 に示す。目視判定および中心線平均粗さ R_a のいずれの結果でも、全体としては抽出温度が低下するとリジング特性は向上する傾向にある。また、パス間焼鈍を施した II および III の場合は、パス間焼鈍無しの I の場合に比べ、リジング特性は優れている。特に、3 パス後に 2 回目の焼鈍を施した III の場合は、より良好なリジング特性を示していることが分かる。Fig. 2 では、パス間焼鈍無しの群でデータのばらつきが大きい。これは、仕上圧延温度の影響があるものと考えられる。

Fig. 3 に、リジング特性に及ぼす仕上温度の影響を示す。抽出温度が 1200°C と高くかつパス間焼鈍のない場合には、熱延仕上温度を低下させることによってリジング特性はかなり向上するが、抽出温度が低い場合およびパス間焼鈍を施している場合では、仕上温度の影響は小さい。

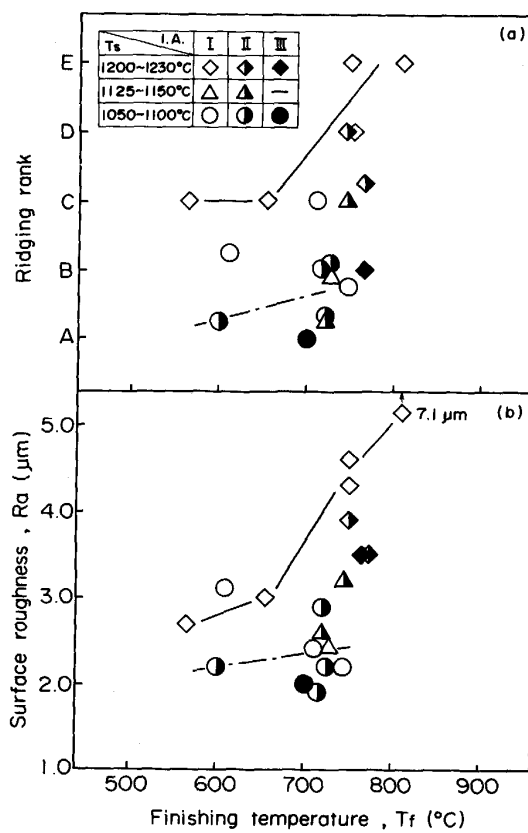
Table 2. Summary of 6 passes and 3 passes hot rolling tests.

Sample No.	Soaking temperature Ts	Type of inter-pass annealing	Inter-pass annealing		4th pass Beginning temperature, T _b	6th pass Finishing temperature, T _f	Vickers hardness	Ridging rank	Surface roughness Ra(μm)
			1st pass	3rd pass					
1	1200°C	I	—	—	950°C	810°C	171	E	7.1
2	1200°C	I	—	—	850°C	750°C	199	E	4.3
3	1200°C	I	—	—	850°C	750°C	198	D	4.6
4	1200°C	I	—	—	N·D	655°C	241	C	3.0
5	1200°C	I	—	—	N·D	<600°C	250	C	2.7
6	1150°C	I	—	—	850°C	725°C	191	B	2.4
7	1100°C	I	—	—	950°C	745°C	199	B ⁺	2.2
8	1100°C	I	—	—	850°C	710°C	204	C	2.4
9	1100°C	I	—	—	650°C	610°C	235	B ⁻	3.1
10	1200°C	II	—	1050°C×2min	850°C	750°C	199	D	3.9
11	1200°C	II	1200°C×10min	—	850°C	765°C	184	C ⁻	3.5
12	1150°C	II	1150°C×2min	—	850°C	745°C	196	C	3.2
13	1125°C	II	1125°C×2min	—	850°C	720°C	202	A ⁻	2.6
14	1100°C	II	1100°C×2min	—	950°C	720°C	203	A ⁻	2.9
15	1100°C	II	1100°C×2min	—	850°C	715°C	213	B	1.9
16	1100°C	II	1100°C×2min	—	650°C	600°C	247	A ⁻	2.2
17	1050°C	II	1050°C×2min	—	850°C	725°C	215	B	2.2
18	1230°C	III	1230°C×5min	1000°C×10min	850°C	765°C	192	B	3.5
19	1100°C	III	1100°C×5min	1100°C×10min	850°C	700°C	201	A	2.0
20	1200°C	I	—	—					
21	1200°C	II	1200°C×2min	—					
22	1200°C	III	1200°C×2min	1200°C×10min					
23	1100°C	I	—	—					
24	1100°C	II	1100°C×2min	—					
25	1100°C	III	1100°C×2min	1100°C×10min					

Note
 Samples No.20~25 were used to study the effect of inter-pass annealing on the microstructure changes after 3rd pass.



(a) Visual examination
 (b) Measurement of mean roughness of center line
 Fig. 2. Effects of soaking temperature and inter-pass annealing conditions on ridging properties of cold rolled and annealed sheet.



(a) Visual examination
 (b) Measurement of mean roughness of center line
 Fig. 3. Effect of finishing temperature of hot rolling on ridging properties of cold rolled and annealed sheet.

熱延仕上温度の影響を考慮するために、熱延板の板厚中心部の硬さを測定し、リジング特性との関係を調べた。Fig. 4 および Fig. 5 に、熱延板の硬さと熱延仕上温度との関係およびリジング特性と硬さの関係をそれぞれ示す。

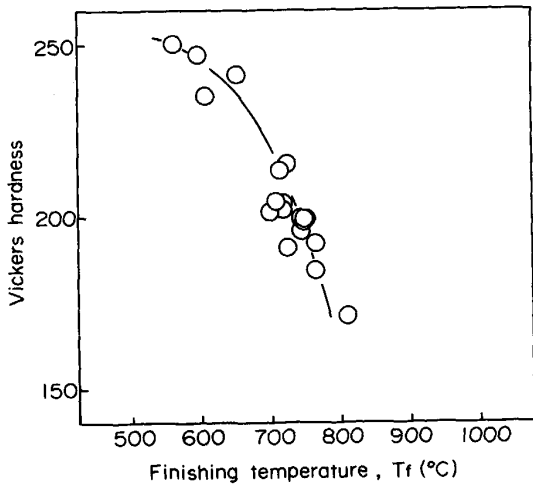


Fig. 4. Relationship between finishing temperature and hardness of center layer of hot rolled sheet.

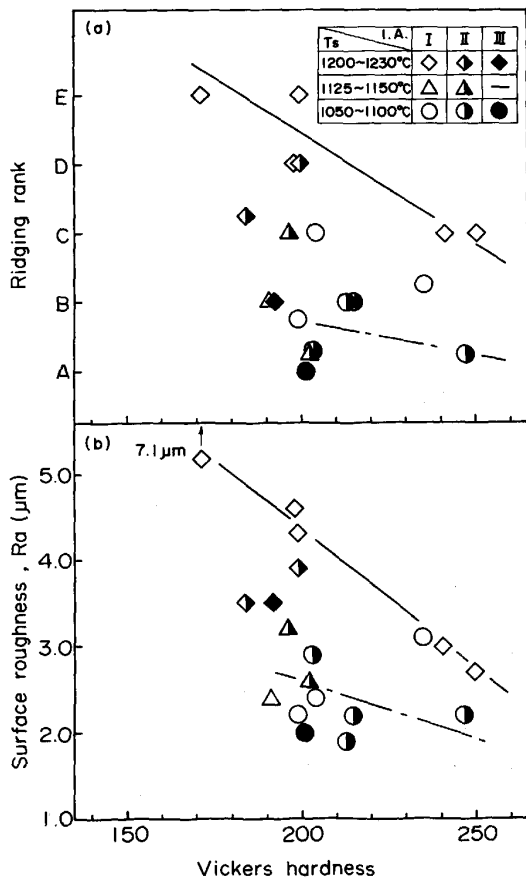


Fig. 5. Relationship between hardness of hot rolled sheet and ridging properties of cold rolled and annealed sheet.

す。Fig. 4 から、抽出温度やパス間焼鈍の有無にかかわらず熱延板の硬さは仕上温度が低下する上昇していることが分かる。一方、Fig. 5 から、硬さとリジング特性の関係をみると、高温抽出でパス間焼鈍の無い場合には硬さの上昇と共にリジング特性は向上する傾向が認められるが、低温抽出およびパス間焼鈍を施した場合には、硬さが 200 の近傍でリジングと硬さの関係は大きなばらつきが認められる。硬さは熱延板の歪みエネルギーの蓄積を示す指標として重要ではあるが、リジング特性を硬さのみで整理することは困難と考えられる。

3.2 熱延板および熱延焼鈍板の金属組織に及ぼす熱延条件の影響

熱延板および熱延焼鈍板の L 断面を光学顕微鏡観察の一例を Photo. 1 および Photo. 2 にそれぞれ示す。Photo. 1 より、熱延板の変形組織には黒く筋状にエッチングされた変形帯の発生が観察される。この変形帯の

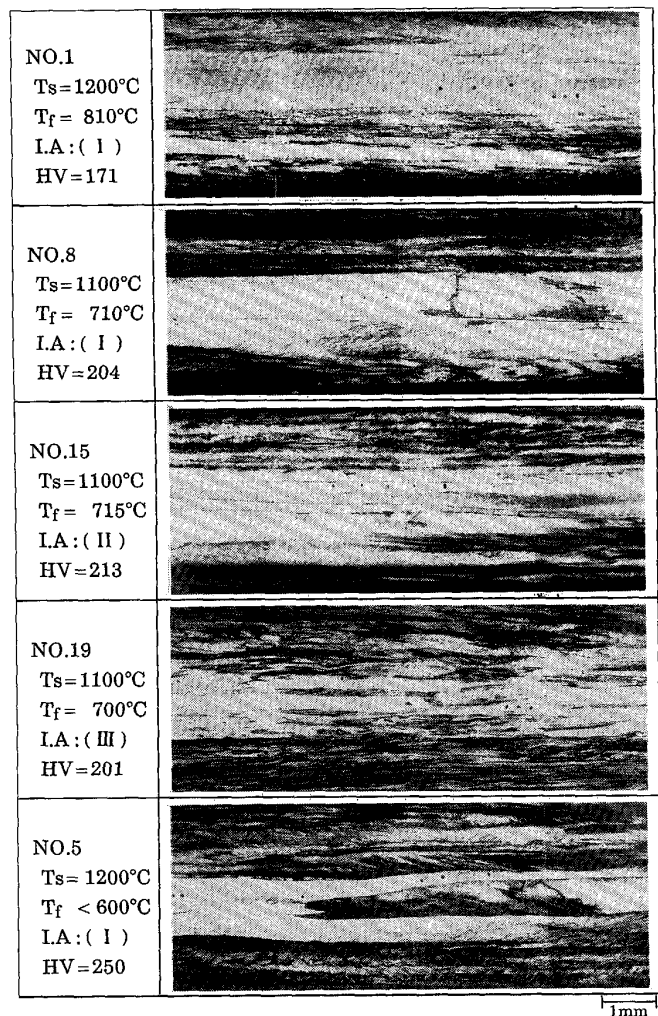


Photo. 1. Effects of hot rolling conditions on deformed structure presented by optical microstructures of hot rolled sheets.

発生に及ぼす熱延条件の影響を見ると、高温抽出-高温仕上げ熱延の No. 1 の場合には熱延板中心部にほとんど

変形帯が認められないが、抽出温度が低い No. 8, および、1パス後1回の焼鈍を施した No. 15 では筋状の変形帯の密度は上昇し、さらに、3パス後に2回目の焼鈍を施した No. 19 を見ると、変形帯を示す細かな筋と共にパス間で再結晶したと考えられる再結晶粒界の痕跡も認められる。高温抽出-低温仕上げの No. 5 は高温抽出-高温仕上げの No. 1 に比べると黒い変形帯の部分が多くの、黒い部分と白い部分が明瞭に分離した組織となっている。

次に Photo. 2 より熱延焼鈍板の組織を見ると、再結晶の状態は熱延板の変形組織に良く対応していることが分かる。すなわち、抽出温度が高く仕上げ温度も高い No. 1 では熱延焼鈍板の板厚中心部はほとんど再結晶していない。これに対し、抽出温度が低下すると再結晶状態は改善され、さらに、2回のパス間焼鈍を施した No. 19 では再結晶が極めて均一に生じている。高温抽出-低温仕上げの No. 5 を見ると、熱延焼鈍板の組織は板厚中心部まで再結晶しているが、再結晶組織は結晶粒径が粗い部分と細かい部分が層状に分布したものとなっている。これらの再結晶の状態を熱延板の変形組織と比較すると、熱延板で白く変形帯の少ない部分は粗く再結晶するのに対し、変形帯が多数導入されている黒い部分では密に再結晶し、熱延板での変形帯の発生状況と熱延焼鈍板の再結晶の状態は良く対応している。

3.3 3パス熱延材の金属組織

Photo. 3 に、3パス熱延後の金属組織に及ぼす抽出温度とパス間焼鈍条件の影響を示す。パス間焼鈍を施さない I の工程では、1100°C および 1200°C 抽出のいずれの場合も柱状晶がくの字に変形しているのみである。パス間焼鈍を1回施した工程 II では、1100°C および 1200°C 抽出ともに表層部が部分的に再結晶して

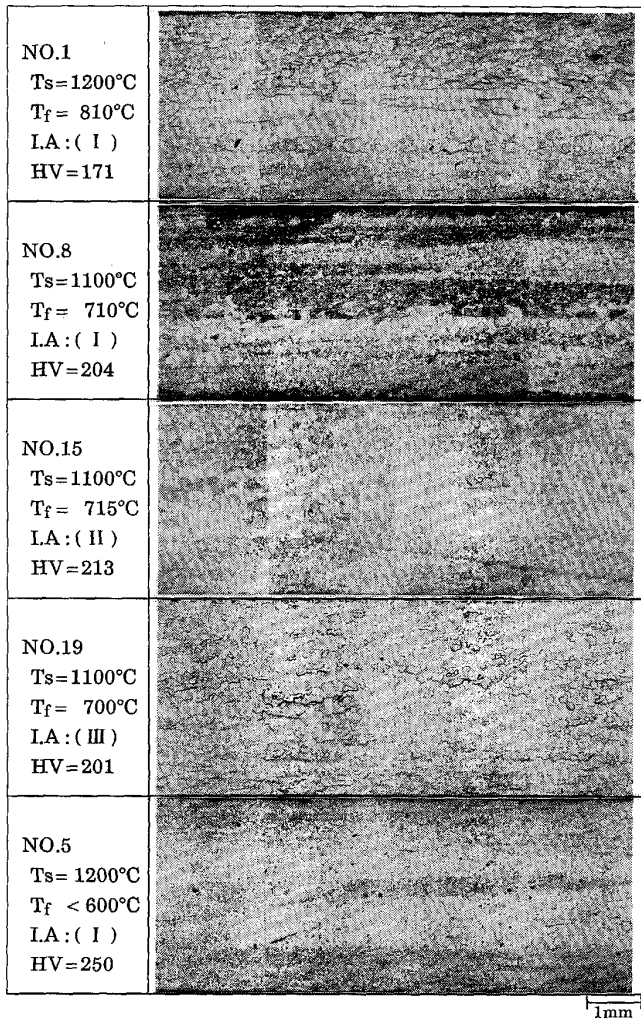


Photo. 2. Effects of hot rolling conditions on recrystallized structure presented by optical microstructures of hot rolled annealed sheets.

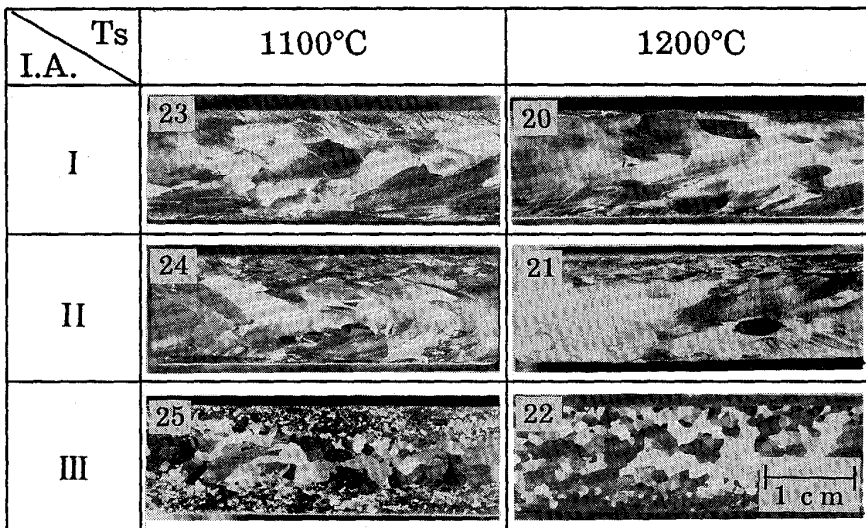


Photo. 3. Effects of soaking temperature and inter-pass annealing on recrystallization behaviour presented by microstructures of 3 pass hot rolled specimens.

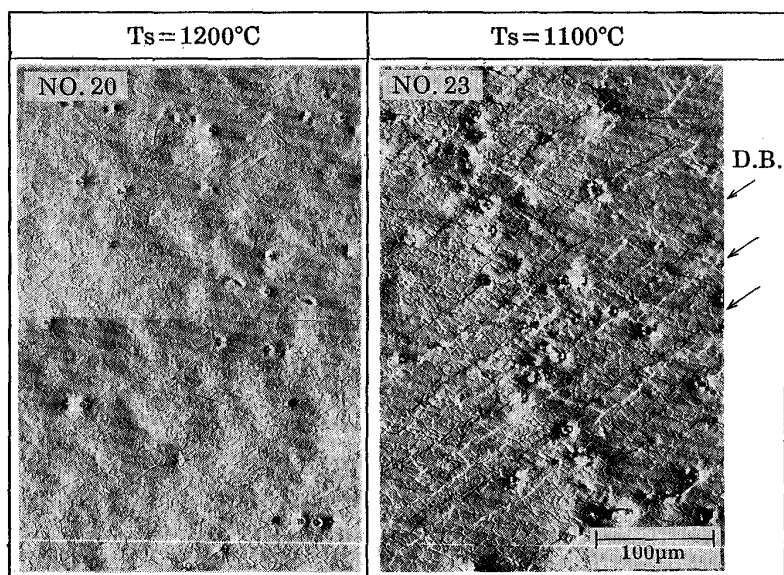


Photo. 4. Effects of soaking temperature on formation of deformation band presented by optical microstructures of 3 pass hot rolled specimens.

いる。これに対し、2回パス間焼鈍を施した工程Ⅲでは、1100°Cおよび1200°C抽出ともに中心部まで再結晶している。

Photo. 4に、工程Ⅰでの3パス熱延後の変形下部組織に及ぼす抽出温度の影響を示す。1200°C抽出材では回復したサブグレイン組織が観察されるが、変形帯は観察されない。一方、1100°C抽出ではサブグレイン組織の中に多数の変形帯が観察される。抽出温度を低下すると変形帯が発生し、このような変形組織の差が熱延焼鈍板での再結晶組織の差となったものと考えられる。

4. 考 察

Fig. 2, 3およびPhoto. 1, 2の対応からわかるように、17%Cr鋼のリジング特性は熱延焼鈍板の金属組織と密接な関係にあり、熱延焼鈍鋼板の金属組織が微細かつ均一に再結晶しているものほどリジング特性は良好であったが、板厚中心部に粗大なフェライトが存在するものはリジング特性は著しく劣っていた。大橋⁵⁾はSUS430熱延鋼帯の研究から、リジングは熱延鋼帯中心部に残存する粗大な回復フェライト粒が以後の冷延工程でも引き継がれることにより発生すると指摘した。また、中川ら¹²⁾はTi添加17%Cr鋼について、リジングの優れた鋼材は熱延板焼鈍で良好な再結晶を示し、熱延終了温度が低温ほど良く再結晶することを報告している。本実験の結果および従来⁹⁾の結果は、リジング特性が熱延焼鈍板の組織と密接な関係にあることを示唆している。そこで、金属組織に及ぼす熱延条件の影響について検討した。

4.1 抽出温度の影響

Photo. 1およびPhoto. 2の金属組織観察結果から、熱延板焼鈍後の再結晶組織は熱延条件の違いにより大きく異なり、再結晶組織は焼鈍前組織の影響を強く受けていた。熱延組織を制御するために本鋼の熱延過程での組織変化についてみると、Photo. 1, 3からわかるように、本鋼は熱延での再結晶が遅くストレート熱延(Ⅰ)では熱延工程中にはほとんど再結晶しない。そのため、Photo. 4に示されているように、高温抽出-高温仕上熱延でパス間焼鈍を施さない工程では変形帯の少ない回復組織になり、熱延焼鈍後も板厚中心部に未再結晶フェライトが残存していた。これに対し、抽出温度を低下すると変形帯が発生する。別途行った1パス熱延結果⁹⁾によれば、 $\{100\}/N.D$ 初期方位を有する柱状晶は高温で熱延すると変形帯が発生しにくく、熱延後もこの方位が残存する傾向があった。熱延温度が低下すると、1000~1100°Cの温度域でバンド状の変形帯が発現し、方位が分散してくる⁹⁾。一方、 $\{100\}/N.D$ 方位が残存すると、この方位はFe-3%Si合金単結晶の研究から再結晶しにくいと言われており¹³⁾、No. 1の熱延焼鈍板に未再結晶の領域が存在したのはそのためと考えられる。

これらの結果から、抽出温度の低減は柱状晶の $\{100\}/N.D$ 方位をバンド状変形帯により分散させ、その結果リジングの改善に寄与したものと考えられる。

4.2 仕上熱延温度の影響

抽出温度の低減と共に、高温抽出では仕上熱延温度の低下が効果のあることが分かった。しかし、これらの方法はリジングにはともに効果をもたらしたが金属組織には若干の差異が認められた。

抽出温度の違いは熱延前段の粗圧延温度を変え、低温抽出の場合は熱延前段が1100~1000°Cの比較的低温で圧延されるのに対し、高温抽出では熱延前段が1200~1100°Cの高温圧延となる。一方、高温抽出で低温仕上熱延とした場合、熱延後段の仕上圧延温度のみが低下する。抽出温度と仕上温度の金属組織に及ぼす影響はこの圧延温度の面から検討する必要がある。

Photo. 2の熱延焼鈍板の組織で、低温抽出材が比較的均一に再結晶していたのは、Photo. 4の観察から、3パスまでの熱延前段でバンド状の変形帯が発生したことにより、粗大な柱状晶組織が大な単位でブロック状に分断されたためと考えられる。一方、Photo. 2の高温抽出-低温仕上熱延材をみると、再結晶は生じているが、再結晶の仕方が低温抽出材に比べてやや不均一で層状になっている。

前報⁹⁾の変形帯の観察によれば、900°C以下の低温熱延では変形帯は線状もしくは島状の微細な形態を呈していた。これは、Photo. 1のNo. 5に変形組織が変形帯の入り方としては細かいこととよく対応している。したがって、仕上温度を低減した場合は、柱状晶の内部に発生する細かな変形帯が重要と考えられる。仕上温度の低下は抽出温度の低下で認められたような柱状晶を分断するような効果は少なく、これは上述したような変形帯の単位と関係していると考えられる。低温仕上熱延は加工硬化による歪みエネルギー蓄積効果としては十分である。しかし、組織の均一性を得るためには硬さを上げるのみでは十分ではないことが分かった。したがって、もし、均一な再結晶状態を得ようとすれば、これらの変形

帯を均一に形成させる必要があると考えられるが、それには仕上温度の低下のみでは十分になし得なかったものとする。

4.3 再結晶による熱延組織の微細化

Photo. 3の3パス後の熱延組織から、本実験の範囲で本鋼はパス間焼鈍無し工程では再結晶しないことがわかった。パス間焼鈍として1パス後短時間の焼鈍を施した場合、Photo. 3から分かるように、段圧後の組織は最表層部分はかなり細かくなっていたが中心部ではほとんど再結晶しておらず、全体としてまだ十分な微細化効果が得られていない。E. POUILLARDら¹⁴⁾¹⁵⁾は、17%Cr鋼において粗圧延終了後にインラインのディレイを入れるとリジングが向上することを示した。また、原勢ら¹⁶⁾は、17%Cr鋼の熱延においてパス間時間を10sから30sに増すと粗圧延後の{100}<011>方位が若干減少し、リジングが改善されるとした。本実験では、パス間で積極的な加熱を試みたが、インラインのディレイを想定した1回の加熱を施した群でも若干リジングが改善されており、定性的には同様の傾向を示している。しかし、これらの実験は、いずれも再結晶状態として不十分なため、リジングの改善に対しては必ずしも十分とは言えない。一方、3パス後に積極的な焼鈍を施したものは板厚中心部まで十分に再結晶していた。このように、熱延過程で完全に再結晶させるためには、焼鈍前にかんがりの歪みを与えかつ再加熱して十分な焼鈍を施す必要がある。このようにすると、熱延中にも再結晶による組織の微細化を図ることができる。

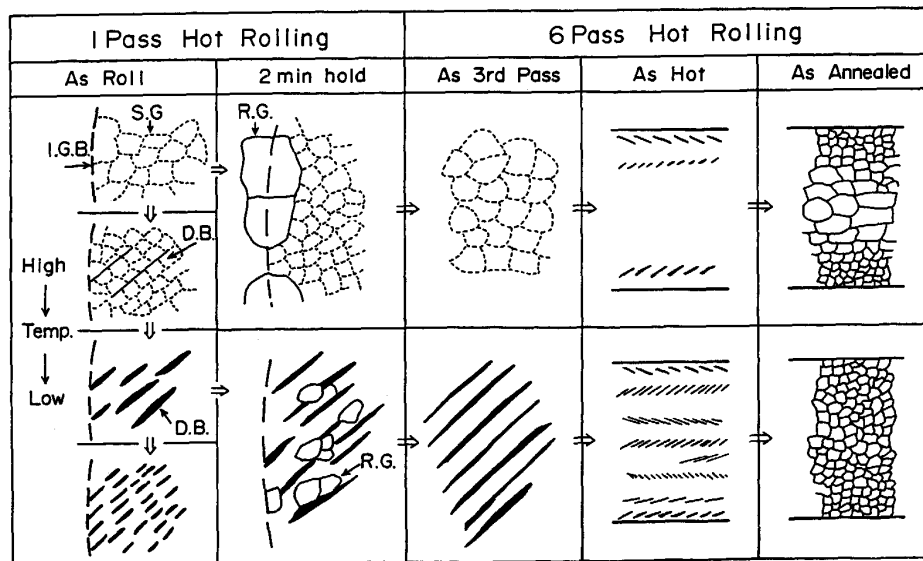


Fig. 6. Schematic illustration on effects of hot rolling conditions on hot rolled microstructures of Fe-17%Cr-0.3%Nb stainless steel.

4.4 熱延および焼鈍による組織変化

以上の抽出温度、パス間焼鈍および仕上熱延温度の金属組織に及ぼす影響、および1パス熱延結果^{7)~10)}をもとに Fig. 6 に本鋼の熱延過程における組織の微細化の過程を模式的に示す。本報告の結果を総合すると、フェライト単相系ステンレス鋼のリジグ現象は熱延過程における変形組織を不均一にしその後の焼鈍により均一に再結晶させることにより原理的には十分に改善できることが分かった。そのような組織の微細化には、Fig. 6 に示すように、第1に変形帯の導入過程、第2に回復・再結晶の過程、第3には歪み蓄積の過程により熱延板の組織をまず微細化して、ついで、第4に熱延板焼鈍時の再結晶過程を総合的に利用することが有効であると結論される。

5. 結 言

{100}//N. D 方位を有する Fe-17%Cr-0.3%Nb 鋼の連続鋳造スラブの柱状晶部分を用い、実験室熱延機による多パス熱延実験を行いリジグ特性に及ぼす抽出温度、パス間焼鈍および熱延仕上温度の影響、および、熱延板ならびに熱延焼鈍板の金属組織に及ぼす熱延条件の影響を研究した。得られた結果をもとに、リジグ特性に及ぼす熱延条件の影響について熱延における変形帯の導入と再結晶による熱延板金属組織の微細化の観点から考察した。

(1)パス間焼鈍なしの場合、抽出温度の低下または仕上温度の低下によってリジグ特性はいずれの場合も向上する。1パス後または3パス後に抽出温度または圧延温度で1回短時間のパス間焼鈍を施すとリジグは向上し、さらに、3パス後に2回目の焼鈍を施すとリジグは著しく向上する。

(2)抽出温度および仕上圧延温度を低下すると、熱延板の中心部まで変形帯が導入され熱延焼鈍後に中心部までよく再結晶する。一方、高温抽出-高温仕上熱延では熱延焼鈍板の中心部に粗大な未再結晶フェライトが残存する。これは、変形帯が発生しにくく {100}//N. D 方位の分散が小さいことに関係するものと考察した。

(3)パス間焼鈍を施すと熱延板の組織が細かくなり、とくに3パス後に2回目のパス間焼鈍を施したものは極めて均一な再結晶を呈していた。3パス段圧後の金属組織を調べた結果、1パス後のみのパス間焼鈍では表層のみの再結晶であるのに対し、3パス後にもパス間焼鈍を施したものは中心部まで再結晶していた。

(4)リジグ特性と熱延焼鈍板の組織との対応を見ると、熱延焼鈍板の組織が微細にかつ均一に再結晶しているものほどリジグ特性は優れていた。

(5)以上の結果から、フェライト系ステンレス鋼の熱延板組織の微細化には抽出温度あるいは仕上熱延温度の低下による変形帯の導入およびパス間焼鈍によるパス間での再結晶が有効であることが分かった。以上の知見をもとに本鋼の熱延過程における組織変化を総括した。

文 献

- 1) 宮地博文, 渡辺 敏: 熱処理, 17 (1977), p. 327
- 2) H. C. CHAO: Trans. ASM, 60 (1967), p. 37
- 3) 武智 弘, 加藤 弘, 角南達也, 中山 正: 日本金属学会誌, 31 (1967), p. 717
- 4) R. N. WRIGHT: Metall. Trans. A, 7 (1976), p. 1385
- 5) 大橋延夫: 日本金属学会誌, 31 (1967), p. 519
- 6) 松尾宗次: 日本金属学会会報, 19 (1980), p. 192
- 7) 植松美博, 星野和夫, 牧 正志, 田村今男: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 2152
- 8) Y. UEMATSU and K. YAMAZAKI: Stainless Steel '87, The Institute of Metals (1987), p. 386
- 9) K. YAMAZAKI and Y. UEMATSU: ICPM of Thermech Processing of Steels and Other Metals, Iron Steel Inst. Jpn. (1988), p. 154
- 10) 山崎浩一, 植松美博, 星野和夫: 鉄と鋼, 72 (1986), S596
- 11) 林 豊, 小池正夫, 鎮守辰雄, 松井孝次, 鋸屋正喜: 鉄と鋼, 66 (1980), S1167
- 12) 中川恭弘, 坂本 徹, 山内 勇, 山崎桓友, 上野 学: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 657
- 13) 田岡忠美, 古林英一, 竹内 伸: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 190
- 14) E. POUILLARD and B. OSDOIT: Revue de Metallurgie (1966), p. 679
- 15) E. POUILLARD and B. OSDOIT: Revue de Metallurgie (1969), p. 763
- 16) 原勢二郎, 太田国照, 清水 亮, 竹下哲郎: 鉄と鋼, 76 (1990), p. 1520