

論 文

UDC 669.14.018.8 : 669.15'26-194.57 : 539.52 : 669.71 : 669.786

17%Cr ステンレス鋼の材質におよぼす Al 添加の影響*

沢谷 精**・南野 繁**・山口 美紀**

Effect of Al Addition on Mechanical Properties of 17%Cr Stainless Steel

Tadashi SAWATANI, Shigeru MINAMINO, and Minori YAMAGUCHI

Synopsis:

17% Cr stainless steel containing Al has better deep drawability than SUS430 does. The followings have been found in this investigation.

(1) The mechanical properties and formability of 17% Cr stainless steel are effectively improved by the addition of Al more than 6 times N content and less than 0.1% in weight.

(2) The increase of Al/N ratio improves the r value in cold rolled and annealed steel sheet.

(3) Results of texture examination show that the increase of Al/N ratio does not change the cold rolled texture but intensifies {111} and {112} and suppresses {110} and slightly {001} components in recrystallized texture.

(4) The poor bending workability after cold rolling due to Al addition originates mainly in the precipitated AlN. To improve the bendability, the following conditions are especially required

$(\%Al \text{ as AlN}) + 0.3 \times (\%C) < 0.04$ and $N \leq 0.01\%$.

On the basis of these results, the 17% Cr stainless steel containing Al which has superior deep drawability and good bending workability after cold rolling has been successfully manufactured.

1. 緒 言

SUS 430 (17%Cr) で代表されるフェライト系ステンレス鋼の加工性は Al 添加により改善されることが THOMSON ら¹⁾の報告あるいは RANDAK²⁾の特許で古くから知られている。著者らは、17%Cr ステンレス鋼に Al 添加することにより加工性は改善されるが、加工後の曲げ加工性が著しく劣化する場合があることを見出した。本報は、加工後の曲げ加工性が劣化する原因を検討し、Al, C と N 量を適切にコントロールすることにより、加工後の曲げ加工性が劣化せず、プレス成形性に優れた Al 添加 17%Cr ステンレス鋼が得られることを見出しあわせて現場製造実験で確性した結果について報告する。

2. 実 験

2.1 供試材

本実験に用いた代表的試料の化学成分を Table 1 に示す。Al および N レベルの異なる真空溶解材を用い、熱延により 3.8 mm 厚の板とし、815°C × 2 h の焼鈍後 2.0 mm 厚まで冷延し、さらに焼鈍後 0.7 mm 厚まで冷延した。中間および最終焼鈍は 830°C × 2 min で行つ

た(以下標準工程と呼ぶ)。

現場製造材は、N レベルの低い転炉材と N レベルの高い電炉材の 3.8 mm 厚の hot coil を用い、真空溶解材と同じ工程で最終焼鈍板を製造した。

2.2 実験方法

2.2.1 引張試験

試験機は万能引張圧縮試験機 TOM 10 000X 型(新興通信工業製)、試験片は JIS 13号 B、試験は室温で、ひずみ速度 20 mm/min で行つた。

2.2.2 加工曲げ試験

厨房関係成品において加工後の曲げが必要となる場合が、しばしば見られるが、1例としてガスレンジ天板のはぜ折り加工の場合を Fig. 1 に示す。鋼板は浅い絞り加工後、はぜ折り加工を受けるが、その曲げ加工においてとくに C 方向曲げで激しい割れが発生する場合がある。本報の加工曲げ試験はこのような加工を想定した 1 種のシミュレート試験である。

(1) ひずみ付与方法の検討

実際の作業に近いプレスによる加工も検討したが、与えられるひずみの均一性、試料作成時間、および加工後の試験片の大きさなどを考慮して冷間圧延による方法を採用した。

* 昭和 51 年 9 月 9 日受付 (Received Sept. 9, 1976)

** 新日本製鉄(株)光製鉄所 (Hikari Works, Nippon Steel Corp., 3434 Shimada Hikari Yamaguchi 743)

Table 1. Chemical analyses of typical materials.

(wt %)

Sample No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	N	Al/N	
1	0.060	0.53	0.52	0.015	0.010	0.18	16.65	0.003	0.0089	0.34	Vacuum melted
2	0.062	0.53	0.55	0.015	0.011	0.18	16.60	0.026	0.0088	2.95	
3	0.062	0.57	0.52	0.016	0.010	0.18	16.65	0.056	0.0086	6.51	
4	0.059	0.54	0.45	0.015	0.009	0.17	16.59	0.103	0.0088	11.70	
5	0.058	0.58	0.48	0.016	0.010	0.17	16.59	0.135	0.0088	15.34	
6	0.057	0.58	0.48	0.015	0.009	0.17	16.59	0.175	0.0084	20.83	
7	0.06	0.52	0.43	0.021	0.006	0.15	16.53	0.068	0.0092	7.39	Commercially produced
8	0.06	0.49	0.46	0.026	0.006	0.13	16.65	0.004	0.0095	0.42	
9	0.06	0.48	0.39	0.022	0.006	0.10	16.51	0.054	0.0096	5.63	
10	0.06	0.50	0.37	0.021	0.005	0.08	16.48	0.004	0.0101	0.40	
11	0.06	0.53	0.38	0.022	0.005	0.08	16.53	0.030	0.0104	2.88	
12	0.06	0.51	0.38	0.021	0.005	0.09	16.52	0.071	0.0103	6.89	
13	0.06	0.49	0.42	0.027	0.006	0.06	16.64	0.056	0.0067	8.36	
14	0.034	0.55	0.50	0.018	0.009	0.14	16.54	0.103	0.0070	14.71	Vacuum melted
15	0.030	0.51	0.50	0.018	0.010	0.19	16.49	0.003	0.0090	0.33	
16	0.07	0.53	0.44	0.024	0.006	0.07	16.49	0.065	0.0177	3.67	Commercially produced
17	0.07	0.50	0.47	0.020	0.005	0.11	16.62	0.080	0.0134	5.97	
18	0.07	0.57	0.40	0.028	0.006	0.08	16.55	0.070	0.0080	8.75	
19	0.06	0.52	0.45	0.023	0.006	0.12	16.58	0.053	0.0091	5.82	

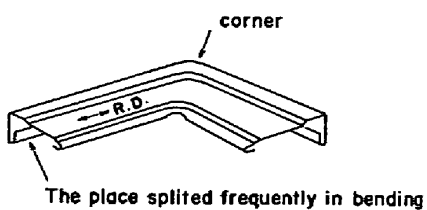


Fig. 1. The top of gas range.

(2) ひずみ量の検討

冷間圧下率 0~50% まで検討したが、圧延後の C 方向密着曲げの割れ発生の程度および実際のプレス加工におけるひずみ量を考慮して 30% (0.7 mm→0.49 mm) とした。

圧延は 4 段圧延機 (ワークロール径: 100 mm) で、圧延速度を 10m/min とし、圧延張力なし、ソルブル油潤

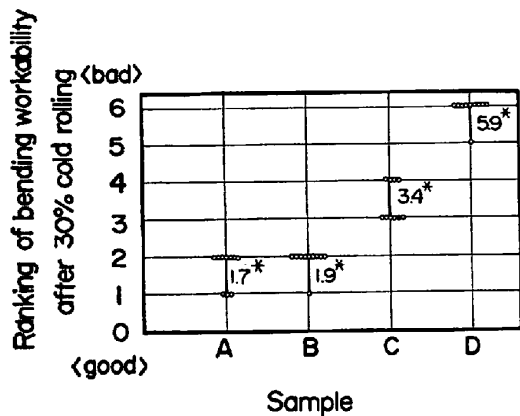


Fig. 2. Observable accuracy of bending workability test after 30% cold rolling (* : mean value).

滑で行った。

(3) 曲げ方法の検討

加工後の曲げは、あらかじめLおよびC方向試片について曲げ半径の検討を行ったが、もつとも割れ程度の大きいC方向密着(曲げ半径:0)曲げを採用した。なお試験片幅は40mmである。

(4) 試験精度の検討

加工曲げ試験後の割れの程度は1から6までの6段階の評点で判定した。

素性の異なる試料A, B, CとDのおおの10個を用いて、加工曲げ試験を行った結果をFig. 2に示す。加工曲げ性のよいもの、悪いものはあまり差がないが中間のものはバラツキがある。したがって、試験片数は5とし、評点はその平均値で示した。

(5) 加工曲げ試験法

0.7mm厚×40mm幅の鋼板を冷間圧延で30%の加工後、0.49mm厚×40mm幅×180mm長の試験片とする。手加工によりおよそ170°まで曲げた後、プレス機で徐々に荷重を加えて密着するまで押える。割れ評点2.5以下であれば合格とする。

2.2.3 成形性試験

(1) エリクセン試験

試験機はトーシ式自動型万能深絞り試験機(東京試験機製作所)、試験片はJIS 1号、A法を用い、潤滑はグラファイトグリース、試験値は3個の平均値で表示した。

(2) コニカルカップ試験

試験機はエリクセン試験と同様のものを使用し、試験片は打抜き円板($d_0=36$ mm)を用い、ベンゾールで全面脱脂後両面に $\#120$ マシン油を塗布し、試験工具はJIS 13型を使用した。

(3) 角筒絞り試験

試験機は前川製作所製2000t油圧プレス(最大荷重

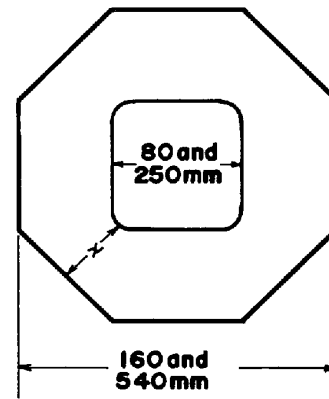


Fig. 3. Blank size.

Table 2. Dimensions of punch and die.

blank	r_{pc}	r_p	r_{dc}	r_d	punch	die	material
160mm	15	9	16.5	5	80×80	83×83	SKD-6
540mm	65	20	66.5	7	250×250	253×253	SCM 3

r_{pc} : punch corner rad. r_p : punch sholder rad.
 r_{dc} : die corner rad. r_d : die sholder rad.

100t-最大しわ押え力100t複動)、試験片は0.7mm厚の160と540mm角の板をFig. 3に示すようにコーナ部を切断し八角形のブランクを用い、Table 2に示す金型でプレス試験を行った。しわ押え力は80mm角では12t、250mm角では材質特性を考慮してもつとも望ましいしわ押え力、すなわちAl添加材は33t、SUS 430は35tで行った。

2.2.4 AlNの分析法

板状試料を10%アセチルアセトン-1%テトラメチルアンモニウムクロライド-メチルアルコール電解液で定電位電解し、ニュークルポアフィルタ(GE-20)で吸引ろ別し、水蒸気蒸留、インドフェノール青吸光度法でNを定量してAlN量を算出する。水蒸気蒸留は酸性ソーダ溶液でAlNだけを分解する条件で行っている。本法は定量範囲としてAlNを形成しているNとして、鋼中0.0002%以上0.05%以下に適用が可能である。

2.2.5 集合組織の測定

X線はMo-K α 線を用い、(200)正極点図は全自動極点図測定装置を用い、透過領域はDecker-Asp-Harker法で $\alpha=0^\circ\sim 30^\circ$ 、反射領域はSchulz法で $\alpha=30^\circ\sim 90^\circ$ までの全域を測定した。反極点図はX線回折装置で純鉄の無方向試料とのピーク高さによる強度比を測定した。試験片はND面は化学研磨し最後に電解研磨で透過法では両面から中心層60~80 μ 、反射法では片面から中心層まで研磨した。RD面は表面スケールをペーパー

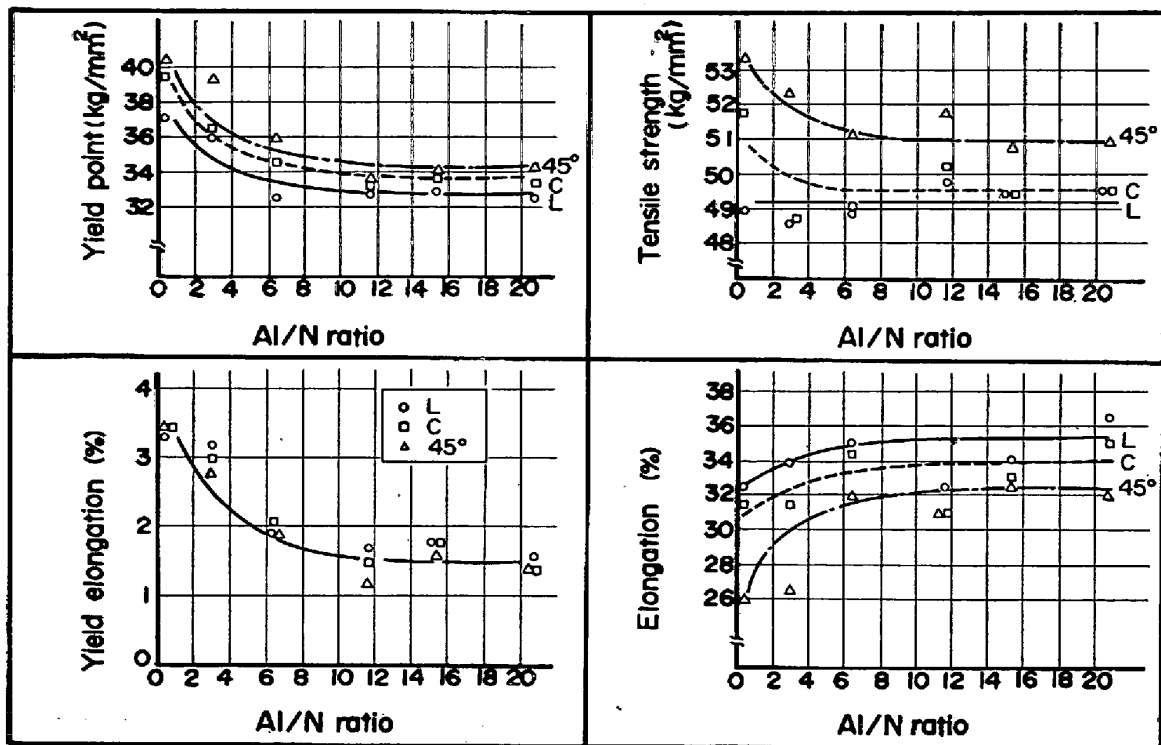


Fig. 4. Effect of Al/N ratio on the tensile properties of Al added 17%Cr stainless steel.

研磨で除去し重ね合わせて約 20 mm とし、はんだで固定して表面をND面と同様に研磨した。

3. 実験結果および考察

3.1 引張特性

3.1.1 Al/N 比の影響

真空溶解でCとNをそれぞれ 0.06% と 0.009% と一定にし、Al 量を変えた試料 (Sample No. 1~6) を標準工程で板厚 0.7 mm にし、引張特性を Al/N 比で整理した結果を Fig. 4 に示す。

降伏点は Al/N 比の増加とともに低くなり、Al/N 比が 6 以上で飽和し、その時の低下量は Al 無添加材 (Al = 0.003%, Sample No. 1) に比べて約 5 kg/mm² である。降伏点伸びおよび引張強さも降伏点と同様に Al/N 比とともに低下し、Al/N 比が 6 以上で飽和する。破断伸びは Al/N 比の増加とともに改善され、Al/N 比が 6 以上で飽和し、Al 無添加材に比べて約 4% 改善されることが認められる。

3.1.2 降伏点におよぼすN量の影響

Al/N 比に伴う降伏点の変化をN量が 0.009% と 0.02% の 2 水準で検討した。供試材はNレベルの異なる転炉材と電炉材の hot coil を用いて、標準工程にて最終焼鈍板を作製し、引張試験を行った。その結果を Fig. 5 に示す。N量が 0.02% の試料は Al/N 比の小さいとこ

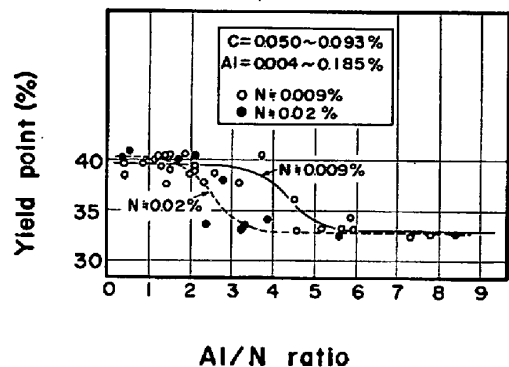


Fig. 5. Effect of nitrogen content on the yield point of Al added 17%Cr stainless steel.

ろから降伏点が低下し始め、ほぼ Al/N 比が 3 以上で飽和しその時の降伏点は 0.009% N の試料の飽和した時の値とまったく同じである。

17%Cr ステンレス鋼の降伏点におよぼす Al/N 比およびN量の影響については、十分明らかにされておらず、本報で用いた 800°C 付近の熱処理温度は後に示す (Fig. 15) ように AlN がもつとも析出しやすい温度であり、AlN の析出挙動と関連させて検討すべきである。なお、降伏点挙動を固溶N量で検討するため内部摩擦法で実験したが、17%Cr ステンレス鋼では Cr の影響が大きく N のピークを見出すことができないため、固溶N量が求められなかった。

3.2 成形性

3.2.1 r 値および模型成形性におよぼす Al/N 比の影響

3.1.1 で用いた真空溶解材の r 値, エリクセン値およびコニカルカップ値におよぼす Al/N 比の影響を Fig. 6 に示す. r 値は Al/N 比の増加とともに改善され, Al/N 比が 6 以上で飽和する. 面内異方性を見ると, Al 添加により 45° 方向の r 値 (r_{45°}) が他の方向の r 値より改善効果が大きいことがわかる. 後に示す集合組織的検討から r 値の改善は {111} 方位, また r_{45°} の改善は {112} 方位の増加とよく対応している. エリクセン値およびコニカルカップ値も, r 値の改善に伴って改善される.

3.2.2 深絞り性

Al 添加 17%Cr ステンレス鋼 (Sample No. 7) と SUS 430 (Sample No. 8) の深絞り性を比較するために 80 mm 角筒絞り試験を行った結果を Fig. 7 に示す. フランジを 6 mm 残す時の絞り深さは, Al 添加材は 48.5 mm で SUS430 は 44.5 mm であり, またblank サイズ 24~32 mm における破断に至るまでの絞り深さは常に Al 添加材の方が優れている.

3.2.3 集合組織

(1) 2 段冷延材の集合組織

Al 添加 17%Cr ステンレス鋼 (Sample No. 9) の 2 段冷延の各工程における集合組織変化を (200) 極点図および逆極点図で検討した.

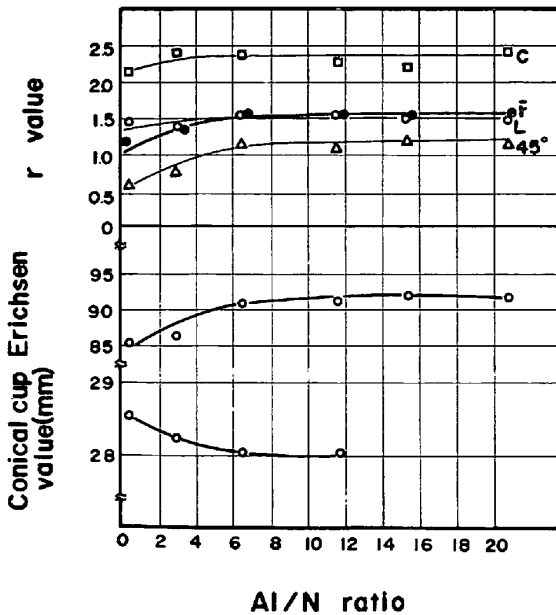


Fig. 6. Effect of Al/N ratio on the r value, Erichsen, and conical cup values of Al added 17%Cr stainless steel. (Sample No. 1~6)

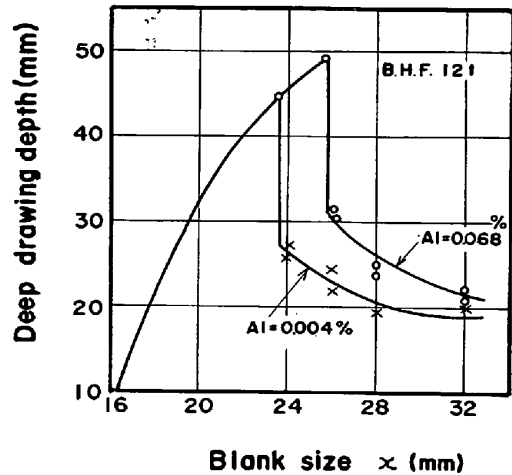
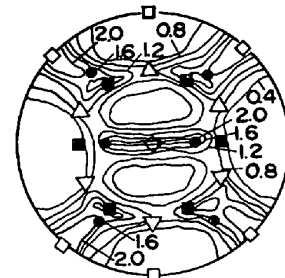


Fig. 7. Effect of Al addition on the deep drawing depth of 17%Cr stainless steel. (Sample No. 7, 8) [Blank size, x: cf. Fig. 3]



△: {554}<225>, ■: {111}<110>, ●: {112}<110>
◇: {001}<110>, □: {110}<001>

Fig. 8. (200) pole figure of Al added 17%Cr hot rolled sheet. (Sample No. 9)

熱延板中心層の極点図を Fig. 8 に示す. 強い RD//<110> 軸繊維組織を示し SUS 430 のそれとほとんど同じである. 逆極点図を Fig. 9 a に示すが, 中心層に比べて表面層では再結晶しやすい {110} 方位が増加している. これを焼鈍すると, Fig. 9 b からランダム化は進むが, なお RD//<110> 軸繊維組織の残存が認められる.

約 40% の 1 段目冷延をした冷延材および焼鈍材中心層の極点図を Fig. 10 に, また逆極点図を Fig. 11 に示す. 冷延材は {112}<110> を中心とした RD//<110> 軸まわりの繊維組織を示す. これを焼鈍すると {001}<110> と弱い {554}<225> 方位の比較的ランダムな集合組織となる. しかし, SUS430 で比較的強い集積を示す {110}<001> 方位が認められない特徴を有する. {110}<001> 方位は {111}<112> 冷延方位から再結晶するが, その際析出物によつてひずみ解放が著しく抑制される方位であることが知られており³⁾, この場合も AlN の析出状態がこの方位の抑制に好ましい状態であったことが考えられる.

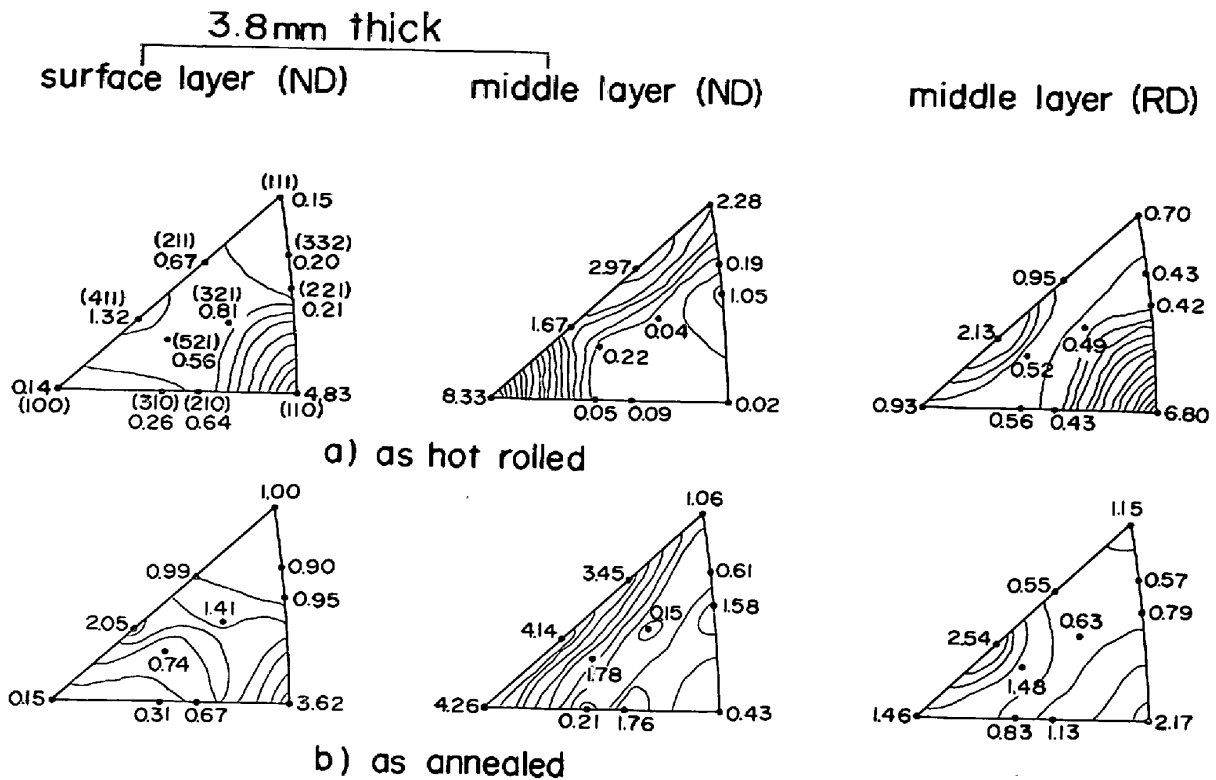


Fig. 9. Inverse pole figures of Al added 17%Cr hot rolled sheet. (Sample No. 9)

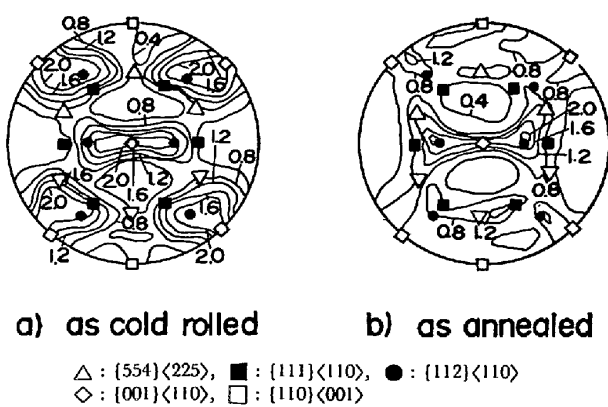


Fig. 10. (200) pole figures of the intermediate cold rolled and annealed sheet of Al added 17%Cr stainless steel. (Sample No. 9)

約 60% の 2 段階冷延をした冷延材および焼鈍材の中心層の極点図を Fig. 12 に、また逆極点図を Fig. 13 に示す。冷延材は $\{112\}\langle 110\rangle$ を主方位とし、 $\{001\}\langle 110\rangle$ 方位まで至っていない。これを焼鈍すると $\{554\}\langle 225\rangle$ を主方位とし副方位として $\{110\}\langle 001\rangle$ を有する再結晶集合組織となる。これは SUS 430 とよく似た集合組織である。2 段階冷延材の再結晶集合組織に現われた $\{110\}\langle 001\rangle$ 方位は Ti 添加低炭素 17% Cr ステンレス鋼ではまったく現われず著しく高い r 値を示す⁴⁾。Ti 添加材中の Ti の析出物は最終焼鈍まで $\{110\}\langle 001\rangle$ 方位の抑制

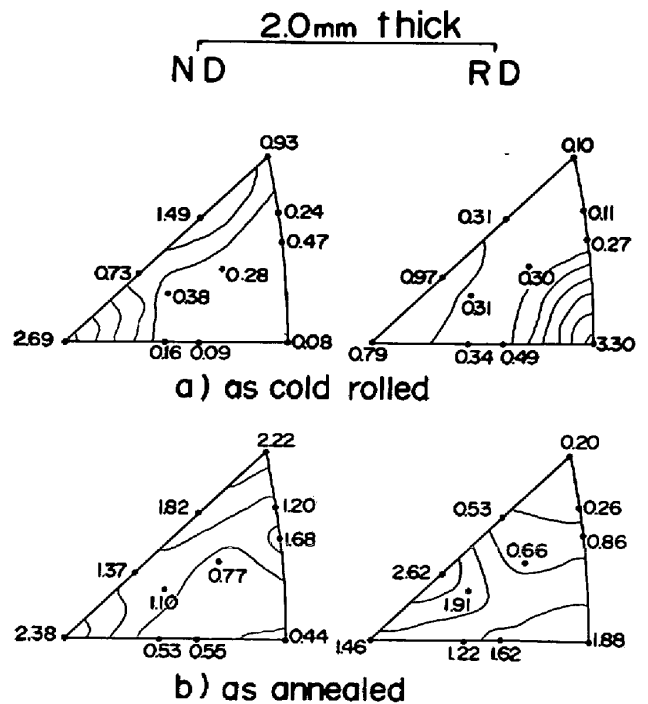


Fig. 11. Inverse pole figures of the intermediate cold rolled and annealed sheet of Al added 17%Cr stainless steel. (middle layer) (Sample No. 9)

効果を有するのに対して、Al 添加材中の Al の析出物は 1 段階冷延後の中間焼鈍では抑制効果が認められるが最

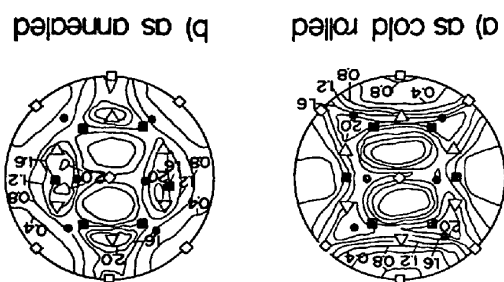


Fig. 12. (200) pole figures of the finally cold rolled and annealed sheet of Al added 17%Cr stainless steel. (middle layer) (Sample No. 9)

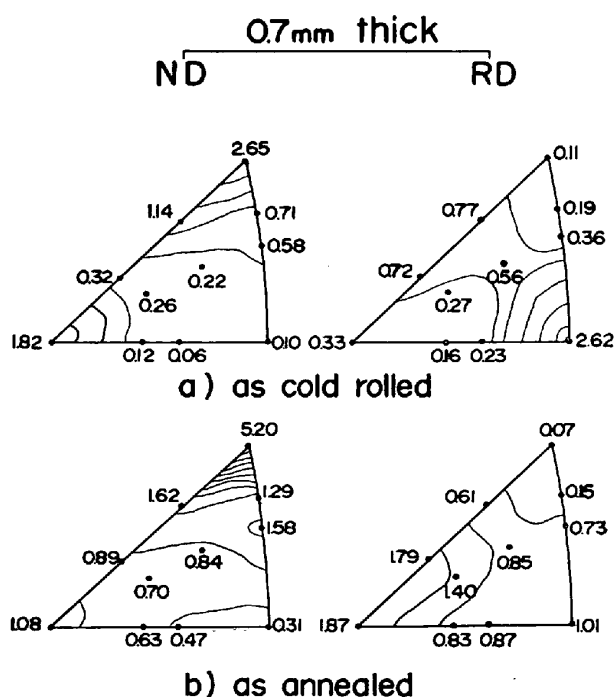


Fig. 13. Inverse pole figures of the finally cold rolled and annealed sheet of Al added 17%Cr stainless steel. (middle layer) (Sample No. 9)

終焼鈍では凝集粗大化し抑制効果を持ち得なくなつたと考えられる。これが、Ti 添加材に比べて Al 添加材の r 値が低い理由の一つと推定される。

(2) 集合組織におよぼす Al の効果

Al 添加 17%Cr ステンレス鋼 (Sample No. 10, 11, 12) の 2 段冷延材の冷延ままおよび焼鈍板の中心層の板面に平行な代表的方位の軸密度におよぼす Al/N 比の影響を Fig. 14 に示す。

冷延ままでは Al/N 比の影響は認められないが、焼鈍材では Al/N 比が高いほど {111} および {112} 方位が強くなり、{110} およびわずかであるが {001} 方位は弱くなる。Al 添加材の r 値の改善は {111} 方位の増加、

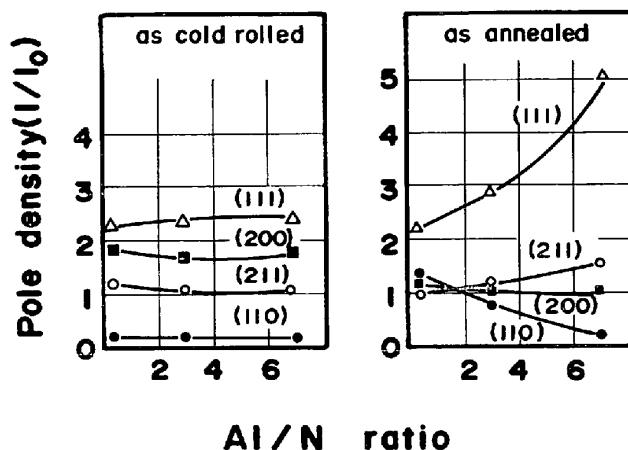


Fig. 14. Relations between Al/N ratio and pole density of the finally cold rolled and annealed sheets of Al added 17%Cr stainless steel. (Sample No. 10, 11, 12)

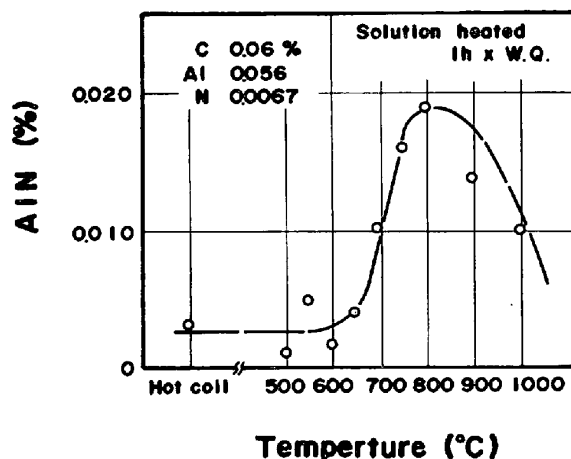


Fig. 15. Effect of annealing temperature on the AlN precipitation of Al added 17%Cr stainless steel. (Sample No. 13)

また r_{45° のとくに大きな改善は {112} 方位の増加によるものと考えてよいであろう。

Al 添加 17%Cr ステンレス鋼 (Sample No. 13) の熱延板中の AlN の析出挙動を Fig. 15 に示す。析出のピークは 800°C 付近にあり、これは BEEGHLLY⁵⁾が炭素鋼で得た結果とよく一致している。熱延板焼鈍条件として 815°C × 2h を用いており、AlN は熱延板焼鈍時にほとんど析出すると考えられる。最近、Al キルド鋼も AlN の析出条件を整えてやれば従来考えられていた「途中析出型」でなく、Ti などと同じく「前析出型」として作用する場があることが指摘されており⁶⁾、本実験においても後者として作用している可能性がある。AlN は冷延集合組織ではなく、再結晶集合組織に微細析出物として影響を与えていると考えられる。

Al 添加材 (Sample No. 14) の熱延板焼鈍の L 断面組織を SUS430 (Sample No. 15) と比較して Photo. 1

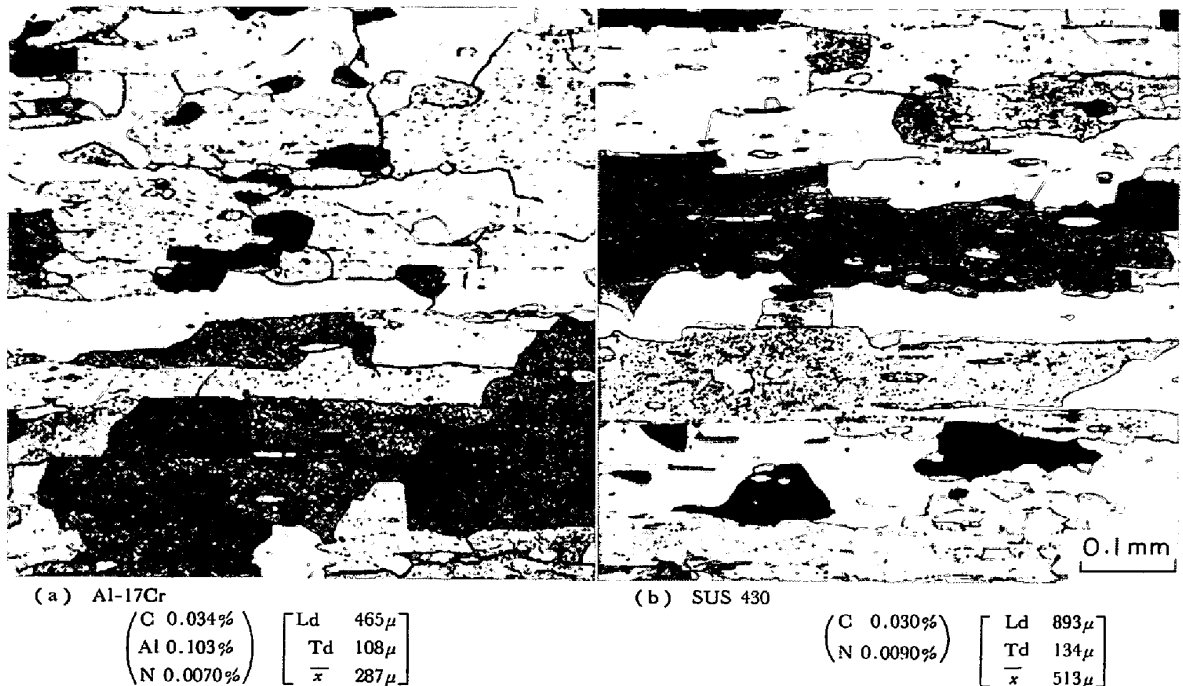


Photo. 1. Optical microstructure of hot rolled sheet of 17%Cr and Al added 17%Cr stainless steel. (Sample No. 14, 15)

に示すが、これから Al 添加材は結晶粒がより微細化されていることがわかる。Photo. 1 に \bar{x} として示した値は、結晶粒をランダムに 100 個取り出して、圧延方向の結晶粒の長さの平均を L_d 、板厚方向のそれを T_d とし $\bar{x} = (L_d + T_d) / 2$ を表わしている。速水ら¹⁰⁾は冷延前の結晶粒度が微細なほど最終焼鈍板で板面に平行な {111} 方位が多くなることを示しており、Al 添加による r 値改善効果として、この効果も副次的に作用している可能性がある。

高橋ら¹¹⁾はリムド鋼の {111} 方位は固溶 N が多いと発達が制限されることを報告しているが、Al による固溶 N の低減効果も作用する可能性は考えられる。しかし、17%Cr 鋼で固溶 N の実験的検討は困難である。

以上、Al 添加による r 値改善の効果として

- (i) AlN の微細析出
- (ii) 熱延板焼鈍組織の微細化
- (iii) AlN 析出にともなう固溶 N 減少によるマトリックスの純化

などの因子が作用する可能性が考えられる。今後、微細析出物の影響について、とくに Ti の析出物との挙動の差について電顕組織で検討する必要がある。

3.3 加工曲げ特性

3.3.1 加工曲げ性におよぼす成分元素の影響

(1) C の影響

真空溶解で Al と N をそれぞれ 0.1% と 0.01% と一定にし、C 量を変えた試料 (C = 0.006~0.093%) を

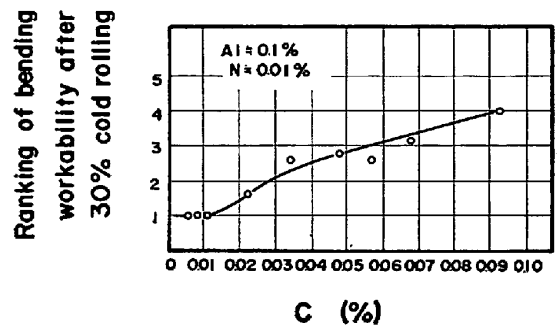


Fig. 16. Effect of C content on the bending workability after 30% cold rolling of Al added 17%Cr stainless steel.

用いて、加工曲げ性におよぼす C の影響を検討した。結果を Fig. 16 に示す。これから Al = 0.1% と N = 0.01% では C ≤ 0.04% であれば加工曲げ性は合格する。

(2) Al の影響

真空溶解で C と N をそれぞれ 0.05% と 0.01% と一定にし、Al 量を変えた試料 (Al = 0.003~0.320%) を用いて、加工曲げ性におよぼす Al の影響を検討した結果を Fig. 17 に示す。これから C = 0.05% と N = 0.01% では Al ≤ 0.1% であれば加工曲げ性は合格する。Al による加工曲げ性の劣化は 0.2% 以上ではゆるやかに固溶 Al による劣化は小さいようである。

(3) N の影響

真空溶解で C と Al をそれぞれ 0.05% と 0.1% と一定にし、N 量を変えた試料 (N = 0.0043~0.0187%) を

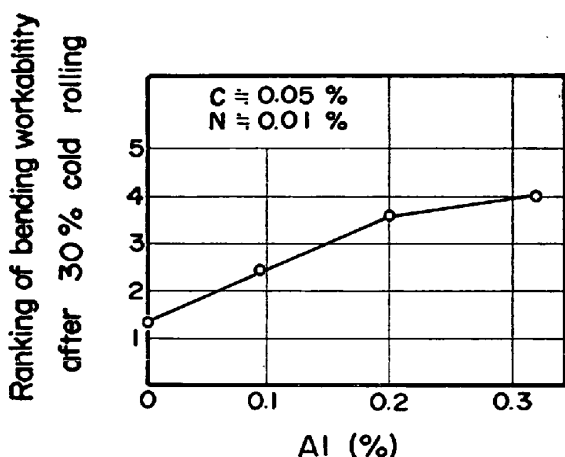


Fig. 17. Effect of Al content on the bending workability after 30% cold rolling of Al added 17%Cr stainless steel.

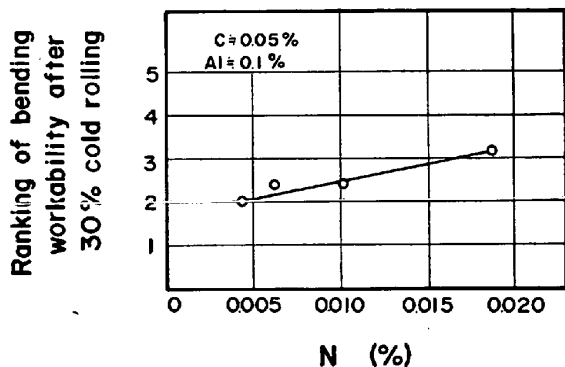


Fig. 18. Effect of N content on the bending workability after 30% cold rolling of Al added 17%Cr stainless steel.

を用いて、加工曲げ性におよぼすNの影響を検討した結果を Fig. 18 に示す。これから $C=0.05\%$ と $Al=0.1\%$ ٪では $N \leq 0.01$ ٪であれば加工曲げ性は合格する。

その他、Si, Mn, P, S および Ni の影響を検討したが、Siは加工曲げ性を大きく劣化させ、他は実用鋼の成分変動の範囲では加工曲げ性にあまり影響しないことがわかった。

(4) (Al+C+N) の影響

$C=0.050\sim 0.088\%$ 、 $N=0.0086\sim 0.0274\%$ 、と $Al=0.004\sim 0.080\%$ の真空溶解材と一部現場製造材を含めて、加工曲げ性におよぼす (Al+C+N) 量の影響を検討した結果を Fig. 19 に示す。これからN量のレベルによつて加工曲げ性への影響が異なることがわかる。析出 AlN 量と加工曲げ性の関係を求めてみると、Fig. 20 のような相関関係が認められる。これから加工曲げ性を劣化させるのはおもに析出した AlN と考え、Fig. 19 の Nレベルで層別されたデータを、 AlN として析出したAl量を

(i) N過剰の場合 $\{N \geq (14/27) \times Al\}$

.....Al as $AlN=Al\%$

(ii) Al " $\{N \leq (14/27) \times Al\}$

.....Al as $AlN=(27/14) \times N\%$

.....(1)

で表わして、Al as AlN 、固溶N、固溶 Al およびC ٪

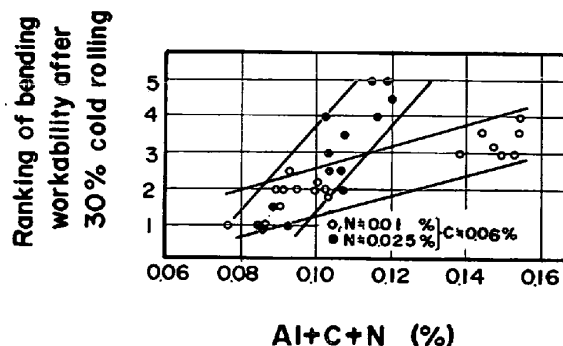


Fig. 19. Effect of Al+C+N content on the bending workability after 30% cold rolling of Al added 17%Cr stainless steel.

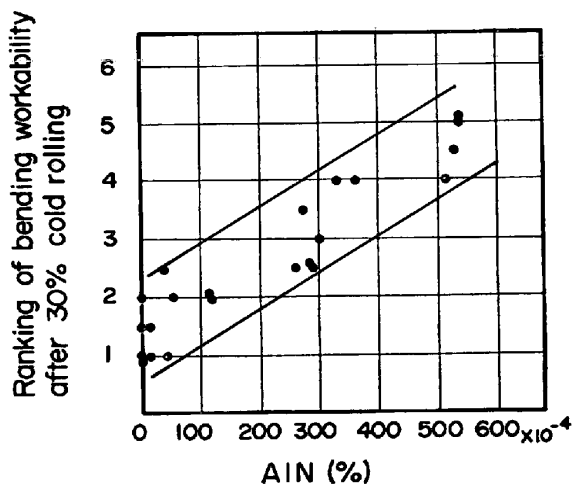


Fig. 20. Effect of AlN on the bending workability after 30% cold rolling of Al added 17%Cr stainless steel.

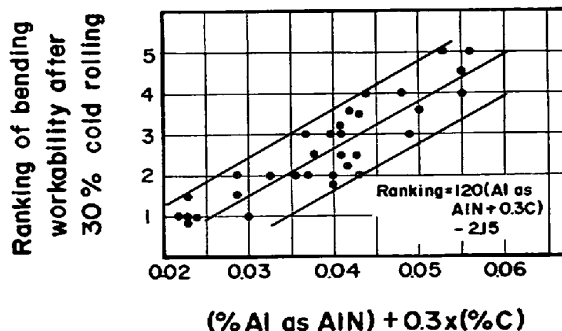


Fig. 21. Effect of C and Al as precipitated AlN on the bending workability of Al added 17%Cr stainless steel after 30% cold rolling.

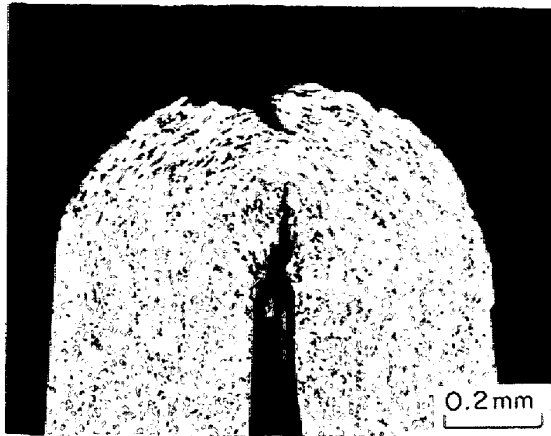


Photo. 2. Optical micrograph of the fractured part in the bend specimen of Al added 17%Cr stainless steel after 30% cold rolling. (Sample No. 16)

を独立変数として、重回帰を求めると

$$\text{加工曲げ評点} = 118 \times (\%Al \text{ as } AlN) + 33 \times (\%C) + 15 \times \{\%N(\text{固溶})\} + 12 \times \{\%Al(\text{固溶})\} - 2.19 \dots\dots (2)$$

となり、固溶 N と固溶 Al の影響は比較的小さいのでこれを無視して

$$\text{加工曲げ評点} = 120 \times \{(\%Al \text{ as } AlN) + 0.3 \times (\%C)\} - 2.15 \dots\dots (3)$$

と近似して、Fig. 19 を $(\%Al \text{ as } AlN) + 0.3 \times (\%C)$ で整理すると、Fig. 21 のようなかなりきれいな相関関係が得られ、N レベルによる差も解消する。この結果から加工曲げ性は

$$(\%Al \text{ as } AlN) + 0.3 \times (\%C) < 0.04 \dots\dots (4)$$

を満足する成分範囲であれば、平均値的には合格のレベルになることがわかる。現場試験出鋼にあたっては、目

標成分範囲として(4)式を満足することを条件とした。

3.3.2 加工曲げ性におよぼす析出 AlN の影響

加工曲げ後の試験片 (Sample No. 16 : 加工曲げ評定 = 4) のC断面光学顕微鏡写真を Photo. 2 に示す。割れはせん断方向に入っており、破面を走査型電顕で観察すると Photo. 3 に示すように、AlN の析出物が void の中にみられ、一つ一つの dimple pattern の形が非常に小さい。割れ近傍の析出物を抽出レプリカにより電顕観察すると Photo. 4 に示すように大きさは 0.5μ 程度の板状の析出物がみられ、電子線回折の結果この析出物は六方晶 AlN と同定された。

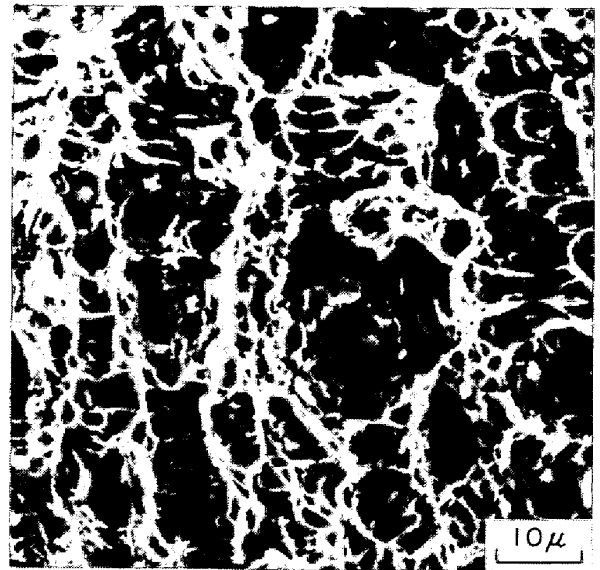
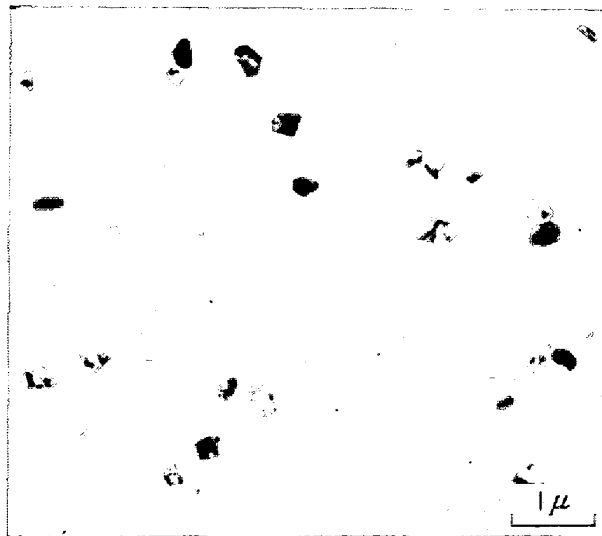
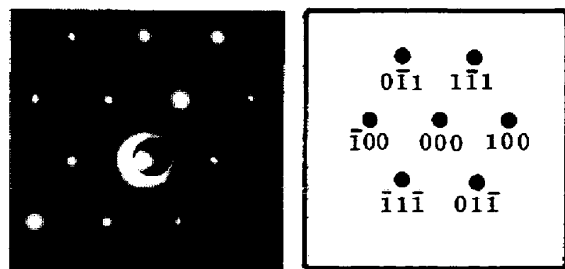


Photo. 3. Electron scanning micrograph of the fracture surface in the bend specimen of Al added 17%Cr stainless steel after 30% cold rolling. (Sample No. 16)



(a) Electron micrograph of AlN



(b) Selected area electron diffraction pattern from a precipitate (a) and its interpretation

Photo. 4. Electron micrograph of the precipitate in final-annealed sheet of Al added 17%Cr stainless steel. (Sample No. 16)

一般に金属材料の延性破壊は、PUTTICK⁹⁾ や ROGERS¹⁰⁾ が Cu について示したように、マトリックス中に分散した第2相粒子(炭化物や介在物)から変形の進行とともに void が発生し、それら void が成長、合体することにより進むことが知られている。このような void の合体による破壊については、多くのモデルが提唱されているが、GLADMAN ら¹¹⁾は、破断ひずみ ϵ_f と各種第2相粒子の体積分率の和 $\sum f_i$ との間に

$$\epsilon_f = 1 / (\text{const.} + \sum f_i) \dots\dots\dots (5)$$

なる関係を認めている。Al 添加による加工曲げ性の劣化は、AlN 析出に伴う第2相粒子の体積分率の増加と考えられる。

Al 添加 17%Cr ステンレス鋼の加工曲げ性を改善するためには、(4)式に従って析出 AlN 量を少なくしてやるのが第1である。Fig. 22 に示すように最終温度を高めることにより、AlN 量が減少し加工曲げ性が改善されることがわかる (Sample No. 17)。1000°C で加工曲げ性が劣化しているが、これは徐冷してマルテンサイトの発生を防止すると空冷の場合よりも改善されることから、マルテンサイトの影響と考えられる。

C (0.006~0.093%), Si (0.01~1.51%), Al (0.004~0.320%) と N (0.005~0.0274%) 量を変化させた試料を用い、一部は最終焼鈍温度を 830°C より高めて結晶粒度を大きくし、破断伸びを大きく変化させ、破断伸びと加工曲げ性の関係を検討した結果を Fig. 23 に示す。この図には加工曲げ性に影響する幾つかの要因が複合して含まれているが、現象的に破断伸びを 35% 以上にすれば、加工曲げ性に合格することを示す。通常 0.05% C

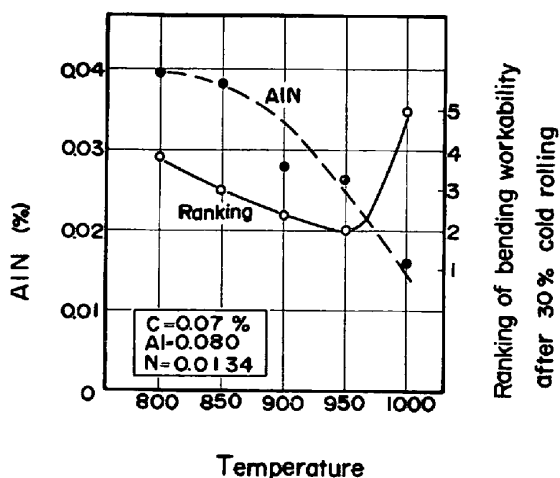


Fig. 22. Effect of final annealing temperature on the precipitated AlN and bending workability of Al added 17%Cr stainless steel after 30% cold rolling. (Sample No. 17)

程度で 17%Cr ステンレス鋼の破断伸びを 35% 以上に改善するのは困難であり、(4)式に従って加工曲げ性を改善することが現実的な対策となる。また析出 AlN 以外の元素が加工曲げ性に影響を与えたのは、破断伸びに対する変化を通してであると考えられる。

Al 添加 17%Cr ステンレス鋼 (Sample No. 18) を冷間圧延し冷延率による破断伸びと加工曲げ評点の変化を Fig. 24 に示す。SUS430 を含めて 17%Cr ステンレス鋼の特徴であるが、冷間圧延によつて急激に破断伸びは低下し 20% 以上ではほとんど 0% になってしまう。

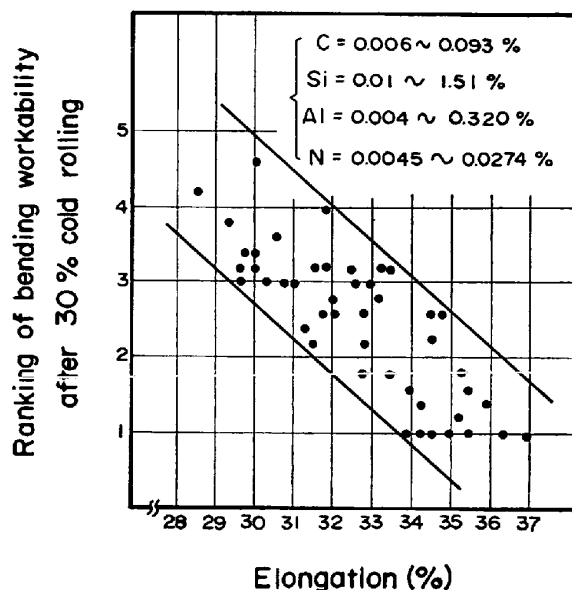


Fig. 23. Relation between bending workability after 30% cold rolling and elongation of Al added 17%Cr stainless steel.

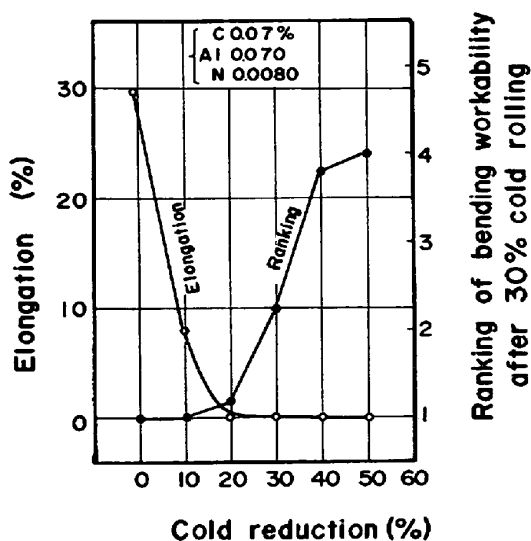


Fig. 24. Effect of cold rolling reduction on the elongation and bending workability of Al added 17%Cr stainless steel. (Sample No. 18)

加工曲げ評点も劣化するが、破断伸びの低下よりも遅れて 20% でわずかに劣化して 30% から 40% で急激に劣化する。これは破断伸びが 0% に達したのち、冷延率の増加につれて加工曲げ性を劣化させる要因が作用していると推定される。これは析出物のまわりの void の発生と考えてよいであろう。

4. 現場製造材の材質

4.1 はじめに

おもに真空溶解材を用いて実験的に Al 添加 17% Cr ステンレス鋼の材質特性を検討した結果、プレス成形性に優れ加工曲げ性も良好な成分範囲として、加工曲げ性に大きく影響する C, N および Al 量を、次の条件を満足するようにコントロールすればよいことが明らかになった。

$$(1) (\%Al \text{ as AlN}) + 0.3 \times (\%C) < 0.04$$

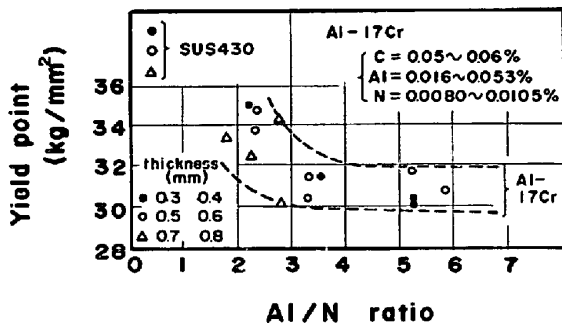


Fig. 25. Effect of Al/N ratio on the yield point of Al added 17%Cr stainless steel commercially produced.

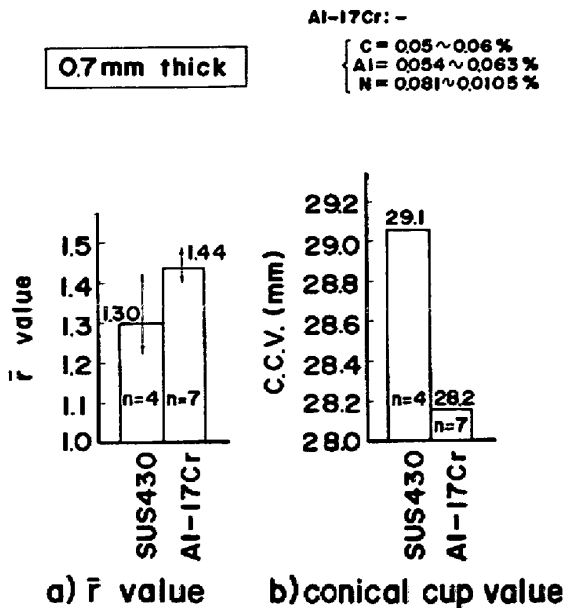


Fig. 26. Average \bar{r} and conical cup values of SUS 430 and Al added 17%Cr stainless steel commercially produced.

$$(2) (\%Al)/(\%N) \geq 6$$

この他に実用材料としての特性を考慮して、引張特性から $C \leq 0.06\%$, $N \leq 0.01\%$, $Al \leq 0.1\%$, また溶接部の粒界腐食性の劣化をさけるため $C \geq 0.04\%$, ヘゲ, プローホールなどの表面欠陥の改善効果も含めて $Al \geq 0.04\%$ の成分範囲に限定することが望ましい。以下、これらの結果に従って現場製造試験を行い確性した結果についてまとめておく。

4.2 引張特性

現場製造した Al 添加 17% Cr ステンレス鋼 ($C = 0.05 \sim 0.06\%$, $Al = 0.016 \sim 0.053\%$, $N = 0.0080 \sim 0.0105\%$) の降伏点を Al/N 比で整理し SUS430 と比

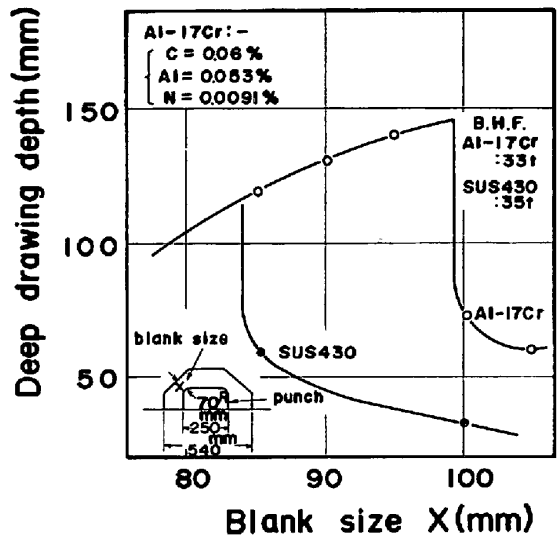


Fig. 27. Rectangular deep drawing depth of SUS 430 and Al added 17%Cr stainless steel commercially produced. (Sample No. 19)

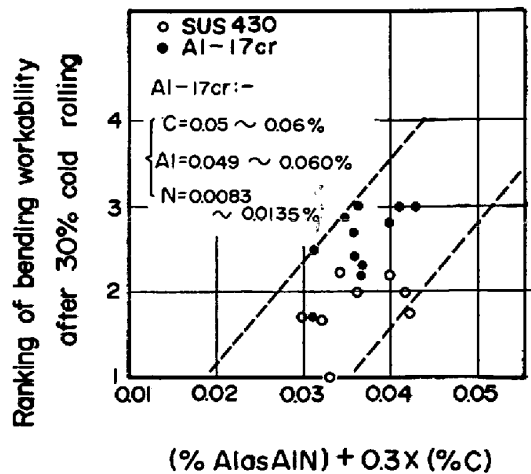


Fig. 28. Ranking of bending workability after 30% cold rolling of SUS 430 and Al added 17%Cr stainless steels commercially produced.

Table 3. Mechanical properties of SUS 430 and Al added 17%Cr stainless steels commercially produced.

	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	r value				Grain size (ASTM#)	Vickers hardness	Ridging ranking	Erichsen value (mm)	CCV (mm)	Earring (%)
				L	45°	C	\bar{r}						
Al-17Cr	30.7	50.2	32.3	1.27	0.97	2.01	1.31	8.5	156	A	10.1	28.4	93
SUS430	35.0	51.5	28.5	1.18	0.70	2.20	1.20	9.0	160	A~B	9.3	28.7	85

(t = 0.7 mm)

較した結果を Fig. 25 に示すが、Al 添加による低降伏点化が認められる。安定して低降伏点化するために、Al/N は 6 以上が望ましいであろう。

4.3 r 値およびコニカルカップ値

上述の Al 添加 17%Cr ステンレス鋼の中で Al 量の高い材料 (Al=0.054~0.063%) の r 値およびコニカルカップ値を従来の SUS430 と比較して Fig. 26 に示すが、Al 添加材がいずれも優れていることがわかる。

4.4 プレス成形性

Al 添加 17%Cr ステンレス鋼 (Sample No. 19) のプレス成形性を SUS430 と比較して 250 mm 角筒絞り試験で検討した結果を Fig. 27 に示す。それぞれの製品の材質特性を Table 3 に示すが、材料強度を考慮してもつとも望ましいしわ押え圧力を検討した結果 Al 添加材は 33 t, SUS430 は 35 t を使用した。これから Al 添加材のプレス成形性が優れていることがわかる。

4.5 加工曲げ性

現場製造した Al 添加 17%Cr ステンレス鋼 (C=0.05~0.06%, Al=0.049~0.060%, N=0.0083~0.0135%) の加工曲げ性を SUS430 と比較して Fig. 28 に示す。これから今回の試験用鋼材は N 量のやや高いものも含まれており、その加工曲げ性は SUS430 に比べてやや悪いことがわかる。しかし、最近の製鋼技術の進歩により N 量の低減は可能であり現在現場製造されている Al 添加 17%Cr ステンレス鋼の加工曲げ性は改善され SUS430 と同等である。

5. ま と め

(1) Al 添加 17%Cr ステンレス鋼は $Al/N \geq 6$ および $Al \leq 0.1\%$ により、降伏点が低く、伸び、r 値、エリクセン値、コニカルカップ値および深絞り性が改善される。

(2) r 値の改善に関連して集合組織的検討を行った結果、Al/N 比の増加は冷延集合組織に影響しないが、再結晶集合組織の {111} および {112} 方位を増加し {110} および {001} 方位を減少させることがわかった。Al 添加によりとくに r_{45° が顕著に改善されるのは {112} 方位の増加で説明されるであろう。

(3) 加工曲げ性の劣化の主原因は析出した AlN であり、加工曲げ性を改善するために

$$(\%Al \text{ as } AlN) + 0.3 \times (\%C) < 0.04 \quad \text{および} \\ (\%N) \leq 0.01\%$$

とすることにより SUS430 と同等のレベルまで改善される。

(4) これらの結果に基づいて現場製造試験を行い、プレス成形性が優れ加工曲げ性の良好な Al 添加 17%Cr ステンレス鋼の現場製造条件を確立し、SUS430 (17%Cr 鋼) の品質改善を行った。

文 献

- 1) J. THOMPSON and J. L. LAMONT: Proc. Electric Fur. Conf., (1961), p. 70
- 2) A. RANDAK: 独特許, Pat. No. 1483305 (1965)
- 3) 松尾宗次, 速水哲博, 谷誠一郎: 製鉄研究, 276 (1972), p. 21
- 4) 沢谷 精, 清水邦彦, 中山 正, 三好正則: 鉄と鋼, 投稿中
- 5) H. F. BEEGLY: Anal. Chem., 21(1949), p. 12
- 6) 寺崎富久長, 金子輝夫: 「鉄鋼薄板の再結晶及び集合組織 (1)」(1974), p. 63 [鉄鋼基礎共研再結晶部会]
- 7) 速水哲博, 阿部光延, 小甲康二: 第 58 回金属学会講演概要 (1966), p. 55
- 8) 高橋政司, 岡本篤樹: 鉄と鋼, 61(1975), S142
- 9) K. E. PUTTICK: Phil. Mag, 4(1959), p. 964
- 10) H. C. ROGERS: Trans. AIME., 218(1960), p. 98
- 11) T. GLADMAN, B. HOLMS, and F. B. PICKERING: JISI, 298(1970), p. 172