

討30 高純度フェライト系ステンレス鋼の張り出し成形性におよぼす 微量元素の影響

日新製鋼(株)周南研究所 ○宮楠克久 植松美博
星野和夫

1. 緒言

近年, C, Nの低減, Ti, Nbの添加などにより, 成形用フェライト(α)系ステンレス鋼が開発されてきている。これらの鋼は, 深絞り性に注目して, おもに塑性ひずみ比(γ 値)の向上を図ったものである。しかしながら, α 系ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼にくらべて, 加工硬化指数(n 値)が低く, 張り出し成形性に劣るという欠点を有している。一方で, 実際のプレス成形においては, 張り出し成形は深絞り成形とともに重要な成形要素であり, その向上は α 系ステンレス鋼の成形性改善に関して大きな課題である。本報告では, α 系ステンレス鋼の張り出し成形性改善の目的から, 特に n 値におよぼす各種微量元素の影響について検討した結果を述べるとともに, その他の成形性および検討結果をもとに開発した商用鋼の特性についても述べる。

2. 供試材および実験方法

Table 1.に供試材の化学成分を示す。供試材は, 不純物元素を低減した高純度 13 wt% Cr 鋼を基本成分とし, 侵入型固溶元素である C, N および置換型固溶元素である Si, Mn, P, Cr, Ti, Al を変化させた。なお, 置換型固溶元素の影響を検討した供試材では, C, N の影響を除くため, 微量の Ti を添加している。

Table 1. Chemical compositions (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	N	so[Al]
base	0.0019	0.04	0.05	0.005	0.003	13.05	0.08	0.0036	0.01
range	0.0019	0.03	0.05	0.003	0.001	11.31	tr	0.0018	tr
	0.0488	1.51	1.48	0.099	0.008	16.86	1.57	0.0194	0.79

これらの鋼は, 真空溶解にて 30 kg 鋼塊とし, 30 mm 厚に鍛造後, 熱間圧延により 3.6 mm とした。この熱延板に 1173 K で 60 s の焼鈍を施した後, 2 回冷延および 2 回焼鈍を行ない 0.8 mm の板とした。中間焼鈍および最終焼鈍は, 1103 K で 60 s 均熱後空冷を標準とした。ただし, 結晶粒度が粒度番号で 6 ~ 8 番となるよう, 試料によっては焼鈍条件を調整した。

このようにして作製した供試材について, JIS 13 B 号試験片による引張試験, 模型成形性試験, 二次加工性(耐たて割れ性)試験を行なった。引張特性値は圧延方向に対して, 0°, 45°, 90° の 3 方向について求め, 平均を重みつきで算出した。本実験での n 値は, Hollomon の式 $\sigma = K \epsilon^n$ における指数 n であり, ひずみ速度 $6.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で, 8% - 16% の 2 点法で求めた。

3. 実験結果

3.1 n 値

Fig. 1.に 均一伸びと n 値の関係を示す。ここでいう均一伸びは, 最高荷重点までの公称伸びである。 n 値と均一伸びには良い相関があり, 均一伸びが大きくなるとともに, n 値も高くなる。

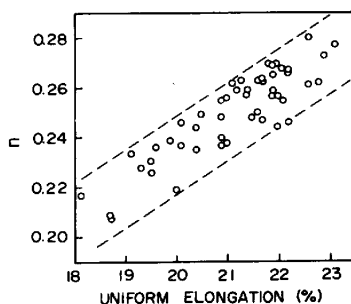


Fig. 1. Relation between strain hardening exponent and uniform elongation.

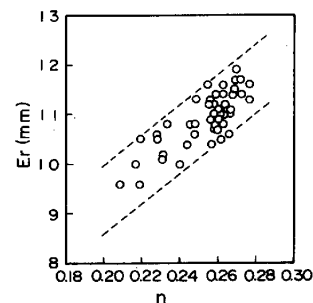


Fig. 2. Relation between Erichsen value and strain hardening exponent.

Fig. 2.に n 値とエリクセン値の関係を示す。エリクセン値は一般

に、張り出し性を評価する模型成形性試験値と考えられており、Fig. 2.に示すように n 値が高い程、エリクセン値も高い。このように、Fig. 1.および Fig. 2.の結果からも、 n 値は張り出し性の指標として有効であると考えられる。そこで、以後 n 値について、微量元素の影響を述べる。

Fig. 3.は、13 wt% Cr 鋼について、C, N 量および Ti 添加の n 値への影響を示したものである。 n 値は、Ti / (C+N) が大きくなるとともに急激に上昇し、Ti/(C+N) が約 10 で最大となり、以後 Ti/(C+N) の増加により緩やかに低下する。また、(C+N) 量が低い程、 n 値は高くなる。

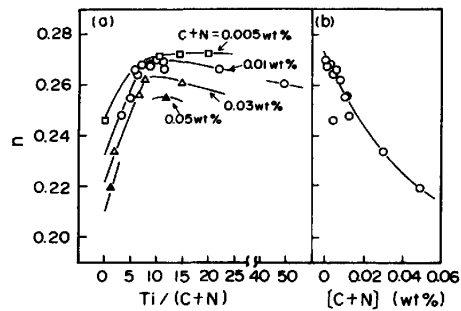


Fig.3. Dependence of strain hardening exponent on Ti/(C+N) and [C+N]=(C+N)-Ti/10 for 13wt%Cr stainless steels.

Ti 添加の効果は、C, N の固定によるマトリクス純化効果と考えられるが、 n 値が最大となる Ti/(C+N) \approx 10 は、化学量論値、約 3.7 より高い。これは S や O と結合する Ti 分の影響や、本実験の供試材作製条件では、C, N の固定に平衡論的に考えられる以上の Ti を要しているなどの原因が考えられる。

Fig. 3.(b)は、(a)の結果から未固定の C, N を、(C+N) = (C+N) - Ti/10 と見積もり、 n 値への影響を示したもので、 n 値は (C+N) の増加にともない急激に低下する。したがって、 n 値向上に対しては、C, N の低減と、適正量の Ti 添加が有効である。

Fig. 4.に 13 wt% Cr 鋼の n 値におよぼす各種置換型固溶元素の影響を示す。あわせて、Cr 量の影響も示す。供試材は、Fig. 3.の結果にもとづき、(C+N) 量および Ti 量をそれぞれ 0.01 wt%, 0.1 wt% と一定にした。 n 値は、いずれの置換型固溶元素であっても、その量の増加とともにほぼ直線的に低下する。しかしながら、その影響の程度は元素によりかなり差があり、P の影響は大きく、Mn, Al の影響は比較的小さい。また、Cr 量は低い程、 n 値に対して好ましい。

Fig. 5.は、各置換型固溶元素について、Fe との原子半径の差異を size misfit parameter $\epsilon_A = (A_E - A_{Fe}) / A_{Fe}$ (ただし、 A_E, A_{Fe} は各元素および Fe の原子半径¹⁾) として、Fig. 4.の n 値低下率 ($-\Delta n / \text{at}\%$) との関係を示したものである。各元素の n 値低下率は、 $|\epsilon_A|$ が大なる程、すなわち Fe との原子半径の差が大きい元素ほど高い。特に、 $\epsilon_A < 0$ の場合にはこの傾向が著しい。しかし、P は桁違いに $-\Delta n / \text{at}\%$ が大きく、このような寸法効果的な影響以外の要因の寄与も考えられる。

以上、 n 値への各種元素の影響を述べたが、 n 値と成分の関係について、重回帰分析を行ない次式を得ている。

$$n = 0.3274 - \{0.015\text{Si} + 0.003\text{Mn} + 0.560\text{P} + 0.004\text{Cr} + 0.050 \text{sol. Al} + 0.069(\text{Ti}) + 0.094(\text{C+N})^{1/2}\}$$

重相関係数 0.91

ただし $(\text{Ti}) = \text{Ti} - 10(\text{C+N})$
 $(\text{C+N}) = (\text{C+N}) - \text{Ti}/10$
 各成分量の単位は wt%

以上の結果から、今回検討した

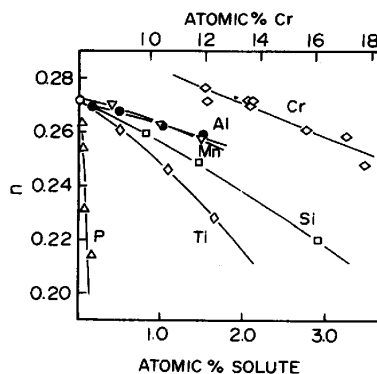


Fig. 4. Dependence of strain hardening exponent on Cr content for Fe-Cr steel and on solutes for 13 wt% Cr stainless steels.

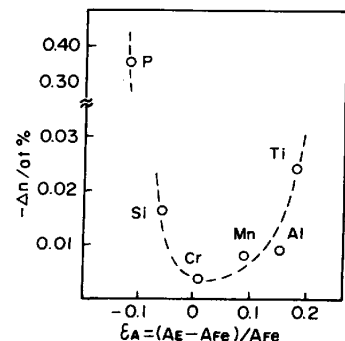


Fig.5. Relation between $(-\Delta n / \text{at}\%)$ and size misfit parameter, ϵ_A .

化学成分範囲では、 n 値は化学成分によってほぼ一意的に定まる。また、13Cr-Ti系では、不純物元素の低減により0.27程度の n 値が得られる。

3.2 強度と n 値

各種元素量の増加は、一方で固溶強化による強度の上昇をもたらす。

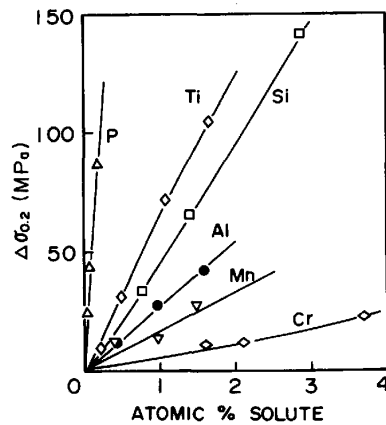


Fig. 6. Effect of solutes on 0.2% proof stress.

Fig. 6. (c), Fig. 4.と同様の供試材について、固

溶元素量と0.2%耐力上昇分との関係を示す。各元素の耐力への影響は、 n 値の場合とおおむね同様であり、直線的に耐力を上昇させる。

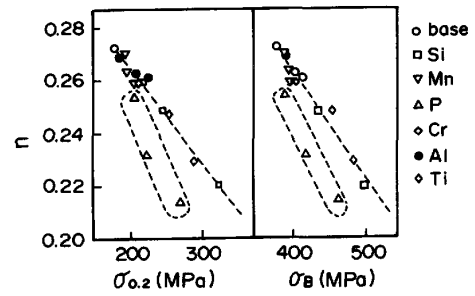


Fig. 7. Dependence of n on 0.2% proof stress and tensile stress of 13wt% Cr stainless steels.

Fig. 7.は、0.2%耐力および引張り強さと n 値との関係を示したものである。ここで、Pを除いた他の元素は、ほぼ1本の直線上にプロットされる。すなわち、Fig. 4, 6の結果からも推察されるように、強度上昇と n 値低下は表裏一体の挙動であり、Pを除けば元素の種類にかかわらず、強度の上昇に見合った n 値の低下を生ずる。

3.3 $\bar{\gamma}$ 値とコニカルカップ値

張り出し性と同様に深絞り性が重要であることは言うまでもない。

Fig. 8.は、 $Ti/(C+N)$ と $\bar{\gamma}$ 値の関係を示したものである。Ti添加により $\bar{\gamma}$ 値が向上することは良く知られている。Fig. 8.の結果においても、Ti無添加では1.0~1.3程度の $\bar{\gamma}$ 値が、 $Ti/(C+N)$ が10では1.5~1.9と上昇し、 $Ti/(C+N)$ が大きくなるとともに $\bar{\gamma}$ 値も高くなる。しかし、 $Ti/(C+N)$ が10倍以上では、 $\bar{\gamma}$ 値の向上

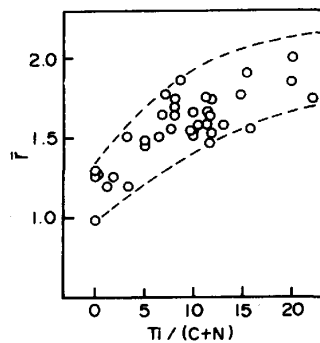


Fig. 8. Dependence of average plastic strain ratio on $Ti/(C+N)$.

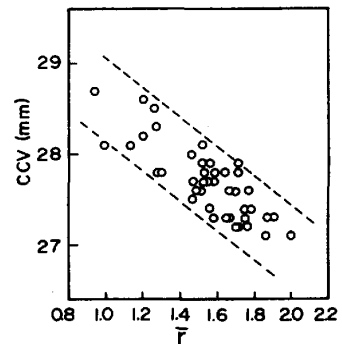


Fig. 9. Relation between CCV and average plastic strain ratio.

はしだいに飽和する傾向にある。Fig. 9. (c), コニカルカップ値と $\bar{\gamma}$ 値の関係を示す。両者には良い相関がみられ $\bar{\gamma}$ 値が高くなるとともに、コニカルカップ値も向上する。

これらの結果から、良好な深絞り性を得るためには、 $Ti/(C+N)$ で10以上のTi添加が必要である。

3.4 二次加工性 (耐たて割れ性)

低C, N 17Cr-Ti鋼などの成形用 α 系ステンレス鋼では、 $\bar{\gamma}$ 値の上昇にともない厳しいプレス成形がなされるようになった。ところが一方で、一次加工として厳しい深絞り加工を受けた後の二次加工時に、絞り方向と平行に脆性的な割れ、いわゆるたて割れを生じ、問題となることがある。たて割れは、一次加工による加工脆化に起因すると考えられる。このため、 α 系ステンレス鋼の二次加工性を評価する目的で、深絞りカップを用いて拡管試験および落重試験を行なった。試験片としては、素板径76mm ϕ の円板を段絞りにより外径27mm ϕ のカップとし(絞り比3.1)、耳を落としたものを用いた。

Photo. 1. に、たて割れ破面の例として、低C, N 17Cr-Ti 鋼のたて割れ部の走査電顕写真を示す。破面はいずれもへき開破壊を呈する。

低C, N 17Cr-Ti 鋼について拡張試験を実施した結果、たて割れは圧延方向と平行な方向(0°方向)で最も生じやすく、また破面の脆性-延性遷移温度も0°方向で最も高かった。そこで、種々の13wt% Cr 鋼および低C, N 17Cr-Ti 鋼を用いて、0°方向にたて割れを生じる条件にて落重試験を実施した。Fig. 10. に、その結果の一例として、たて割れを生ずるのに要したエネルギーと温度との関係を示す。13wt% Cr 鋼は低C, N 17Cr-Ti 鋼よりも遷移温度が低く、耐たて割れ性に優れている。これは、Cr 量が低い点で、本質的に13wt% Cr 鋼は耐たて割れに対して有利であると推定されるが、不純物、集合組織、金属組織、残留応力など、さまざまな要因が考えられ今後の検討を要する。

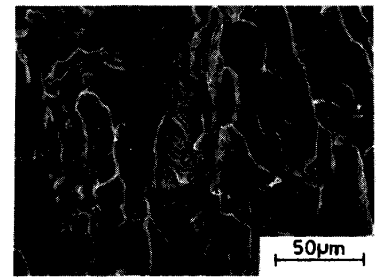


Photo. 1. Fracture surface of longitudinal crack.

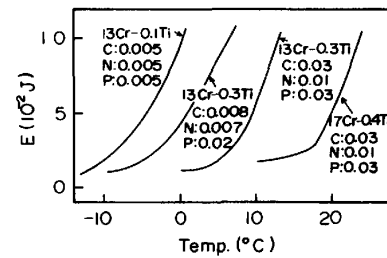


Fig. 10. Temperature dependence of energy required for longitudinal crack.

4. 商用鋼の諸特性

以上の検討結果にもとづき、不純物元素を低減した13Cr-Ti 鋼を、商用の40t電気炉-転炉-VODにて溶製し、製品化した。この商用鋼0.7mm材の諸特性をTable 2. に示す。

Table 2. Chemical composition and properties of the steel produced at shunan works.

Chemical composition (wt%)									$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	El. (%)	n	\bar{r}	Er (mm)	CCV (mm)
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	N	solAl							
0.0064	0.34	0.19	0.015	0.004	13.43	0.19	0.0064	0.05	228	418	36.0	0.266	1.90	11.8	27.2

本鋼は、従来の α 系ステンレス鋼にくらべて、高いn値およびエリクセン値を有しており、張り出し成形性に優れている。また、 \bar{r} 値が高く深絞り性も良好である。なお、耐食性に関しては述べなかったが、低C, N化およびTi添加により、13Cr 鋼でも通常の17Cr 鋼(SUS 430)と同等以上の耐食性を有することを確認している。

5. 結 言

α 系ステンレス鋼の張り出し成形性の改善を主目的に、微量元素のn値におよぼす影響およびその他の成形性について検討した。

- (1) n 値の向上には、低Cr化、極低C, N化および適正量のTi添加、その他置換型固溶元素の低減が有効であり、特に低P化の効果が大きい。また、n 値は化学成分により一意的に定まる。
- (2) \bar{r} 値は、成分的にはTi添加により向上するが、Ti/(C+N)の増加とともにその効果は飽和する傾向がある。
- (3) 実験室的検討にもとづき現場試作を行なった結果、張り出し性、深絞り性ともに優れた α 系ステンレス鋼が製造できた。

文 献

- (1) 日本金属学会編：「金属データブック」, p. 8 丸善(1974)