

含 Cu オーステナイトステンレス鋼のプレス成形性について*

川島 節雄**・結束 良一**
金子 智**・原田 憲二***

The Press Formability of Austenitic Stainless Steel Containing Copper

Setsuo KAWASHIMA, Ryōichi KESSOKU,
Satoru KANEKO, and Kenji HARADA

Synopsis:

The effects of Cr, Ni, and C contents on the press formability and mechanical properties of austenitic stainless steels containing Cu were investigated.

The main results obtained are as follows.

(1) The addition of Cu to austenitic stainless steels results in low work hardening, good drawability, and good corrosion resistance to acid environments.

(2) The press formability of 13~18% Cr-5~9% Ni-2% Cu steels is strongly affected by the degree of austenite stability, and the optimum composition for the deep drawability and that for the stretch formability do not coincide with each other.

The more unstable the austenite when formed, the better the deep drawability in the range of containing no martensite as annealed. The stretch formability, however, becomes the maximum when the austenite is a little unstable.

(3) Delayed cracking of deep drawn cups does not occur at C content up to about 0.03%.

(4) 16%Cr-7%Ni-2%Cu (low-C) steel has excellent press formability.

1. 緒 言

オーステナイトステンレス鋼の機械的性質におよぼす成分の影響については、BLOOM¹⁾の詳細な研究をはじめ多くの報告があるが、プレス成形性を含めたものは清水²⁾の研究の他は比較的少ない。特に、Cuを含むステンレス鋼について、成分の影響を機械的性質とプレス成形性の両面より取扱った報告は少ない。

18-8系ステンレス鋼の金属組織は一般に準安定オーステナイトであり、冷間加工によつてオーステナイトの一部がマルテンサイトになる³⁾。この加工誘起マルテンサイトは機械的性質をはじめプレス成形性に大きな影響をおよぼす。

Cuはオーステナイト生成元素であり、加工硬化を押える効果が大いといわれているが⁴⁾、プレス成形性を改善する働きもある。耐食性の面では、活性溶解を抑制する元素として有効であり、実用鋼種としてMoと複合

添加したものが知られている。

そこで、18-8系ステンレス鋼の機械的性質およびプレス成形性におよぼすCuの影響を確認するとともに、Ni, Cr およびCの影響について調査し、あわせて、耐食性についても検討した。

2. 供試材および実験方法

供試材は4グループに分れており、第1グループは、SUS304タイプでCu=0~2%の4試料、第2グループは、Cu=2% (一定) でCr=13~17%, Ni=6~9%の20試料、第3グループは、第2グループのC量を低下させた13試料、第4グループは、耐食性を対象とした、17%Cr-7%NiでCu=0~3%の4試料の合計41試料である。これらの化学成分はTable 1に示すが、いずれも高周波炉で溶製した5kg偏平鋼塊を熱間および冷間圧延で厚さ1mmの板にして、1050°Cで溶体化処理し酸洗をほどこしたものである。

* 昭和50年10月、51年10月本会講演大会にて発表 昭和51年9月1日受付 (Received Sep. 1, 1976)

** 日本金属工業(株)相模原製造所 (Sagamihara Works, Nippon Metal Industry Co., Ltd., 1-30 Oyama-cho Sagamihara 229)

*** 日本金属工業(株)相模原製造所 工博 (Sagamihara Works, Nippon Metal Industry Co., Ltd.)

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

Group No.	Steel No.	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	N
1	1-1	0.054	0.70	1.56	8.94	18.25	—	0.26	0.046
	1-2	0.062	0.70	1.47	8.90	18.22	—	0.56	0.052
	1-3	0.057	0.68	1.51	9.06	18.23	—	1.01	0.032
	1-4	0.061	0.70	1.52	9.11	18.09	—	1.83	0.032
2	2-1	0.06	0.72	1.54	5.98	12.73	—	2.04	0.039
	2-2	0.07	0.64	1.50	5.97	13.60	—	2.01	0.043
	2-3	0.07	0.76	1.42	5.99	14.65	—	2.03	0.035
	2-4	0.07	0.73	1.32	5.98	15.66	—	2.04	0.042
	2-5	0.07	0.76	1.33	6.03	16.66	—	2.05	0.036
	2-6	0.07	0.73	1.45	6.98	12.82	—	2.05	0.032
	2-7	0.06	0.63	1.27	7.00	13.73	—	2.00	0.034
	2-8	0.06	0.74	1.34	6.99	14.72	—	2.04	0.031
	2-9	0.06	0.72	1.30	7.00	15.56	—	1.77	0.035
	2-10	0.06	0.68	1.29	7.02	16.74	—	1.76	0.037
	2-11	0.06	0.73	1.43	7.93	12.75	—	2.05	0.029
	2-12	0.06	0.73	1.30	7.99	13.74	—	2.06	0.031
	2-13	0.06	0.75	1.30	7.95	14.43	—	1.79	0.037
	2-14	0.06	0.71	1.31	7.88	15.77	—	1.79	0.038
	2-15	0.06	0.67	1.24	7.97	16.53	—	1.76	0.039
	2-16	0.06	0.72	1.31	8.77	12.82	—	1.78	0.038
	2-17	0.06	0.72	1.33	8.83	13.75	—	1.79	0.033
	2-18	0.06	0.72	1.33	8.90	14.68	—	1.81	0.042
	2-19	0.06	0.70	1.23	8.94	15.67	—	1.82	0.044
	2-20	0.06	0.62	1.19	8.94	16.72	—	1.81	0.064
3	3-1	0.032	0.62	1.15	7.11	16.61	—	2.01	0.027
	3-2	0.030	0.67	1.19	6.10	18.21	—	2.01	0.043
	3-3	0.024	0.73	1.58	6.93	15.35	0.21	2.03	0.076
	3-4	0.014	0.71	1.54	7.92	14.29	0.23	2.03	0.027
	3-5	0.032	0.69	1.21	7.16	15.36	—	2.02	0.020
	3-6	0.013	0.64	1.42	7.93	14.15	—	2.03	0.038
	3-7	0.019	0.52	1.19	7.19	15.55	0.19	1.95	0.041
	3-8	0.038	0.67	1.29	6.62	15.39	—	2.01	0.019
	3-9	0.033	0.66	1.31	6.61	15.33	—	2.01	0.021
	3-10	0.013	0.71	1.59	8.87	12.81	—	2.05	0.030
	3-11	0.032	0.64	1.40	8.09	13.33	—	2.04	0.022
	3-12	0.012	0.75	1.56	6.89	15.32	—	2.02	0.019
	3-13	0.032	0.59	1.30	6.13	15.35	—	2.02	0.030
4	4-1	0.066	0.72	0.99	7.13	17.04	—	0.03	0.047
	4-2	0.100	0.62	0.96	7.18	17.63	—	0.06	0.056
	4-3	0.056	0.63	0.92	7.18	17.21	—	1.96	0.041
	4-4	0.057	0.64	0.90	8.20	16.94	—	2.92	0.037

実験は、これらの供試材について機械的性質をはじめとしプレス成形性を判定するため、エリクセン値、C.C.V および L.D.R を求めた。なお、耐食性については、5% 硫酸沸騰液と 80% 酢酸+1% 蟻酸沸騰液を用い、前者では電気化学的測定を用い、後者では浸漬試験を実施した。実験方法の概略を Table 2 に示す。

準安定オーステナイトステンレス鋼は、加工誘起マルテンサイトの生成量によつて、その特性が大幅に異なつてくるので、歪を与えたときの磁性をパーマスコープ（フェライト測定器）で測定し、その時の指示量を指数化してマルテンサイトの代用値とした。データの解析には引張試験片に 10% の伸びを与えたときの値を磁性強度 R_{10} として用いた。

3. 実験結果

3-1 SUS304 タイプに対する Cu の影響

SUS304 タイプに Cu を添加していくと Fig. 1 に示すとおり約 1% の含有量でその特性が変つてくる。SUS 304 タイプ (steel No. 1-1) と SUS304 に Cu を約 2% 添加した試料 (steel No. 1-4) について、真歪-真応力図を比較すると Fig. 2 に示すとおり。Cu を含む材料は、各歪において、応力は低く、加工硬化性が小さい。Cu の添加によりマトリックスは軟質化し、強度は低下するが、加工誘起マルテンサイト量が少なくなるため伸びおよびエリクセン値は低下する。しかし、深絞り性を示す L.D.R は逆に向上する。

Table 2. Experimental method.

項目	方法
引張り特性値	圧延方向と平行に採取した JIS 5 号引張り試験片
硬度	ピッカース硬度計 (荷重 10 kg)
エリクセン値	JIS A 法, ただし潤滑剤は白色ワセリン使用
C. C. V	JIS 21 型, 潤滑剤: 日本工作油製 No. 640
L. D. R	ダイス: C.C.V 用 JIS 21 型
	ポンチ: 直径 21.6 mmφ, 肩半径 4 mmR
	潤滑剤: 日本工作油製 No. 640
時効割れ	L.D.R を求めたカップを室内に 48 h 間放置して割れの有無を調べた
耐食性	アノード分極特性, 測定面積 10×10mm, 電位はカロメル電極で照合

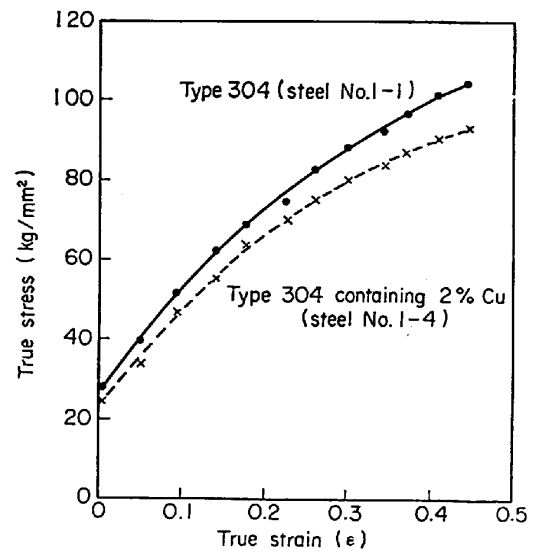


Fig. 2. True stress-true strain tensile plot of type 304 and type 304 containing 2% Cu. The true stress-true strain tensile test is a plot of the stress (σ) applied to a specimen versus the specimen strain (ϵ) for each stress level.

3.2 含 Cu オーステナイトステンレス鋼に対する Ni および Cr の影響

Ni=6~9%, Cr=13~17% の範囲内で調査しているが, 低 Ni, 低 Cr 側の一部の試料 (steel No. 2-1, 2-2, 2-6) は, 焼鈍状態でマルテンサイトが析出しており, 硬度は Hv=200 以上ある. その他は, ほぼオーステナイト組織となっており, 機械的性質におよぼす Ni および Cr の影響は次のとおりである. Fig. 3の(a), (d)に示すとおり Ni, Crとも低くなるほど, 引張強さは大きくなり, 伸びは小さくなるが, その差は, オーステナイト安定度が低くなるほど顕著になる. 逆に, オーステナイト安定度が高い 9%Ni 材の伸びに注目してみると, Cr が約 14%で最高値を示し, それ以上になると低下してくる. これらを加工誘起マルテンサイトの代用値である 10% 伸び時の磁性強度 R_{10} で整理してみると, Fig. 4に示すとおりよい相関があり; R_{10} が大きくなるほど引張強さは増大し, 伸びが減少する. $R_{10}=0\sim1$ の試料について, 20~30% 伸び時の磁性強度 ($R_{20}\sim R_{30}$) と伸びとの関係について調べたところ, 逆に磁性強度が大きくなるほど, 伸びは大きくなっている. すなわち, 伸びは加工誘起マルテンサイトが適度に発生する時に最大となる. 硬度と 0.2% 耐力は Fig. 3の(b), (c)に示すとおりであり, 素材でマルテンサイトが析出している試料を除き, Cr が高くなるほど大きくなる傾向がみられるが, Ni の影響は顕著でない.

プレス成形性は Fig. 5 に示すとおり, 張出量性のよ

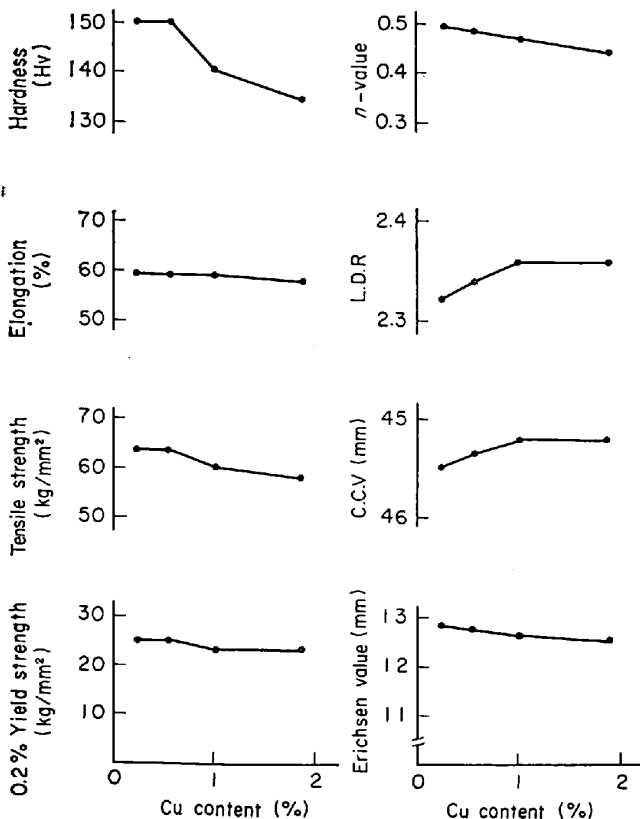


Fig. 1. Effect of Cu contents on the mechanical properties and the press formability of type 304 stainless steel (steel No. 1-1~1-4).

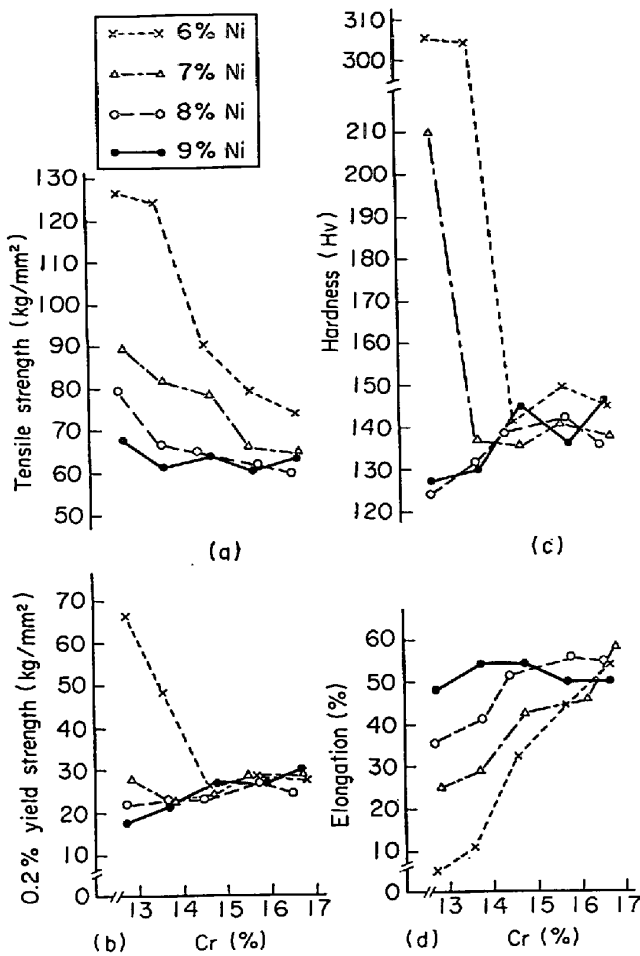


Fig. 3. Effect of Ni, Cr contents on the mechanical properties of austenitic stainless steel containing 2% Cu (steel No. 2-1~2-20).

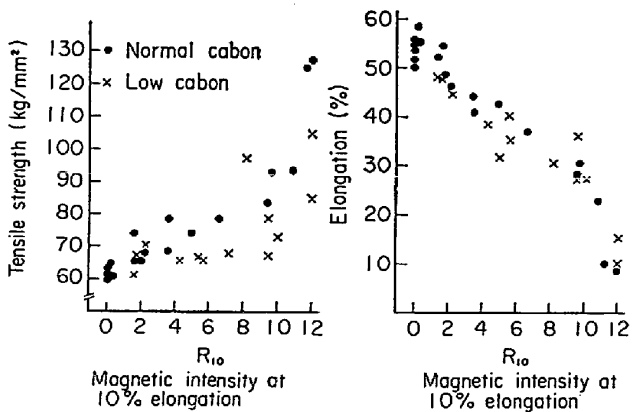
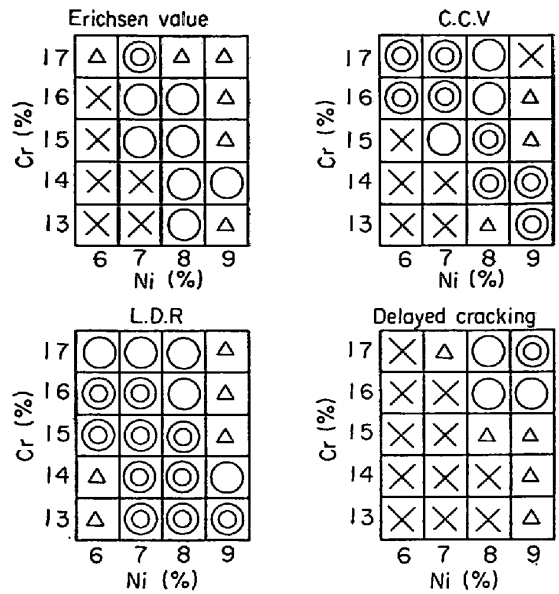


Fig. 4. Relation between magnetic intensity at 10% elongation and mechanical properties (steel No. 2-1~2-20 and 3-1~3-12).

い成分領域と深絞り性のよい成分領域とは一致しない。これについても、10% 伸び時の磁性強度 R_{10} で整理してみると Fig. 6 の関係が得られる。すなわち、エリクセン値は、オーステナイト安定度がやや不安定の $R_{10}=1$ 附近に最大値があり、 $R_{10}=8$ 以上になると急激に低下



	Erichsen value (mm)	C.C.V (mm)	L.D.R	Delayed cracking
⊙	14.0 above	44.4 below	2.45 above	No-crack
○	13.0 ~ 13.9	44.5 ~ 44.9	2.40 ~ 2.44	No-crack until L.D.R=2.4
△	12.0 ~ 12.9	45.0 ~ 45.4	2.35 ~ 2.39	Fine crack at L.D.R=2.3
×	11.9 below	45.5 above	2.34 below	Crack at L.D.R=2.3

Fig. 5. Relation between Ni, Cr contents and the press formability of austenitic stainless steel containing 2% Cu. (steel No. 2-1~2-20).

する。これに反し、L.D.R は素材でマルテンサイトが析出している試料を除き、 R_{10} が大きくなるほどよくなる。C.C.V はほぼ両者の中間値を示している。なお、時効割れはプレス成形性がよい成分領域では、その感受性が高く実用的でない。

3.3 含 Cu オーステナイトステンレス鋼の低 C 材

準安定オーステナイトステンレス鋼は時効割れ感受性が高い。時効割れのメカニズムについては多くの説⁶⁾があり、すべての場合を十分に説明できる定説はないが、C+N 量を低下させることにより時効割れ感受性を著しく軽減させることができる⁶⁾⁷⁾。しかし、著者らの研究⁸⁾によると C 量のみ低下させてもその効果が認められた。そこで、時効割れが起らず、プレス成形性の優れた材料を研究するため、含 Cu オーステナイトステンレス鋼の低 C 材について調査した。

Fig. 4 および Fig. 6 に示すとおり、低 C 材も普通 C 材と同様の傾向があり、磁性強度 R_{10} が大きくなると、伸びとエリクセン値が低下し、引張強さと L.D.R が高くなる。時効割れは C=0.038% 材 (steel No. 4-8) にわずかに発生したが、それ以外の C=0.032% 以下の試

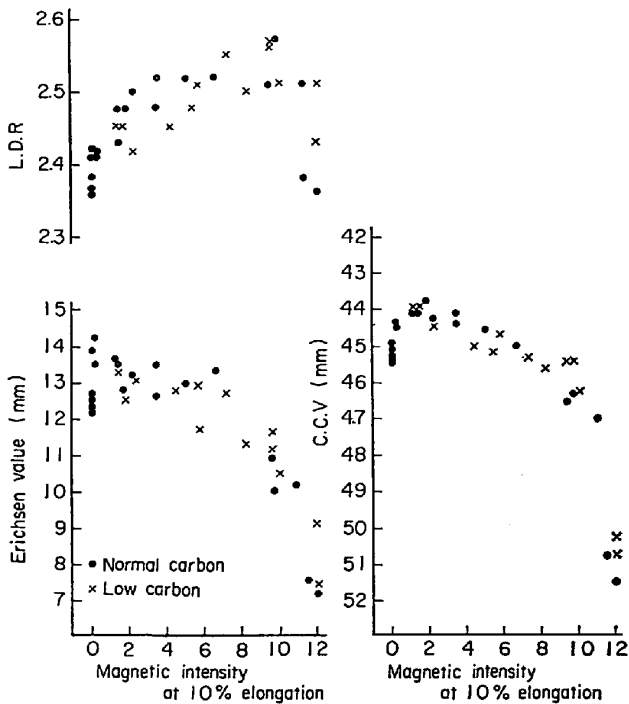


Fig. 6. Relation between magnetic intensity at 10% elongation and the press formability. (steel No. 2-1~2-20 and 3-1~3-12)

Table 3. Chemical composition of 16%Cr-7%Ni-2%Cu (low-C) steel (wt %).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	[N]
0.018	0.61	1.26	0.027	0.009	6.99	15.96	0.20	1.99	0.038

料には認められなかった。

Fig. 6より, R_{10} を 3~8 になるように成分を決めてやると張出し性を犠牲にすることなく, 深絞り性を向上させることが可能である。プレス成形性は製造履歴によって異なることがあるので, 実用鋼種になり得る成分を決め, 連続鍛造スラブから製造実験をおこなった。

化学成分は Table 3 に示すとおり 16%Cr-7%Ni-2%Cu の低Cであり, 耐食性を考慮して Mo を 0.2% 添加している。製造上は特に問題なく冷延製品ができた。圧下率と機械的性質の関係を Fig. 7 に示す。

板厚 1 mm の仕上板の真歪-真応力図を Fig. 8 に示すが, 加工硬化性は $\epsilon=1$ 程度までは低いが $\epsilon=2$ 以上になると非常に高くなる特徴がある。また, プレス成形性は 250 ϕ mm 角筒 ($R_p=20$ mm, $R_D=5$ mm, $R_C=50$ mm, しわ押え圧力=100 t) で比較した。ブランクは正八角形で, 潤滑方式はポリエチレン系保護膜と水溶性潤滑剤を併用しておこなった結果, SUS304 タイプの限界絞り, ブランク直辺部の長さが 620 mm であるのにくらべ, 実験材は 660 mm まで可能であり, その差は

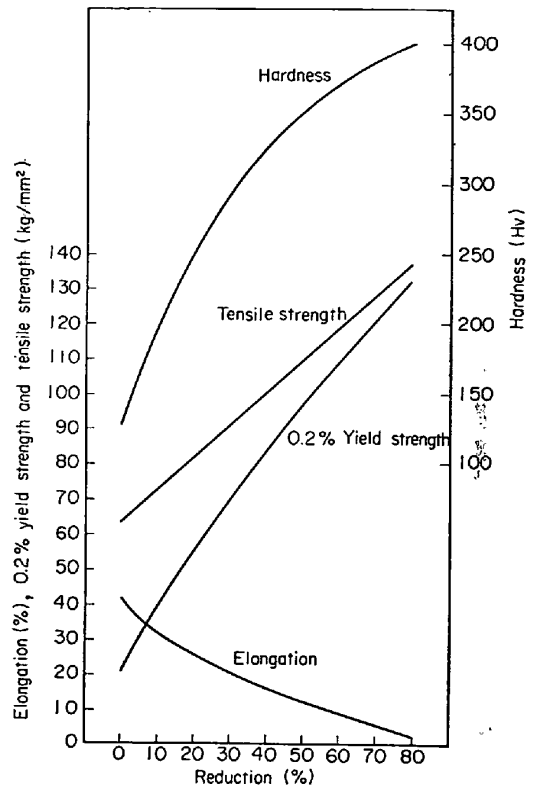


Fig. 7. Relation between reduction in thickness and mechanical properties of 16%Cr-7%Ni-2%Cu (low-C) steel.

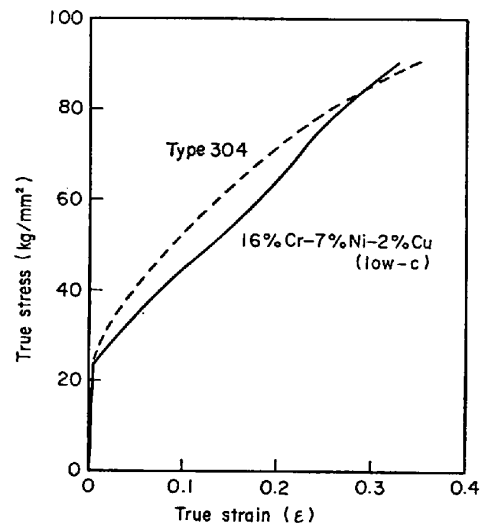


Fig. 8. True stress-true strain curve of 16%Cr-7%Ni-2%Cu (low-C) and type 304 stainless steel.

40 mm と大きい。

3.4 耐食性

17%Cr-7%Ni に Cu を 0~3% 添加した時の不動態化特性を調べるため, 5% 硫酸沸騰液中で自然電位より +0.2 v まで, アノード分極をおこない, 特性電位および電流を比較した。アノード分極曲線の代表例を Fig. 9

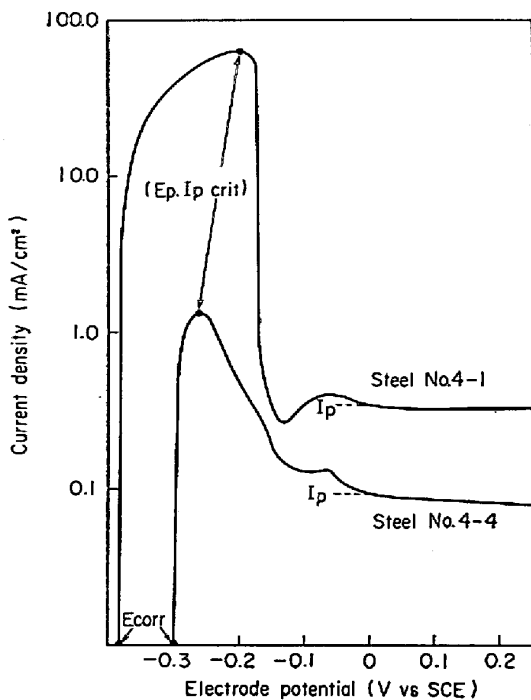


Fig. 9. Anodic polarization curves of 17%Cr-7%Ni and 17%Cr-7%Ni-Cu steels in boiling 5% sulfuric acid.

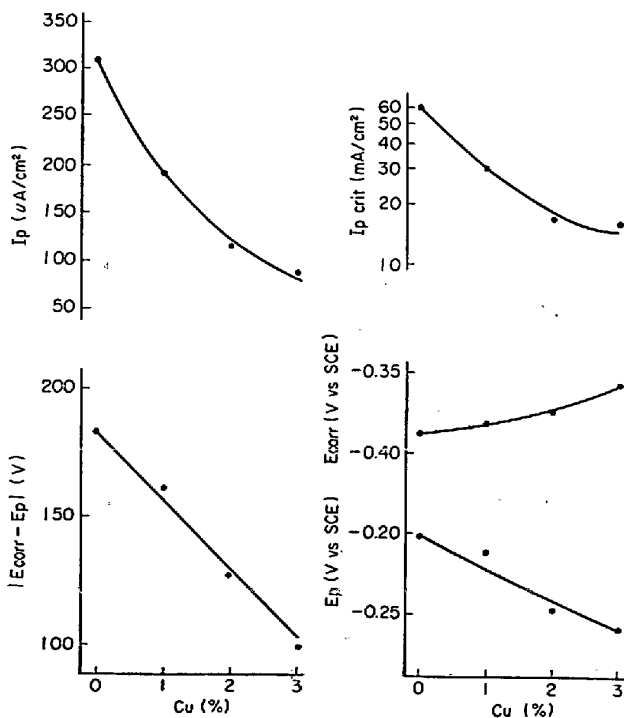


Fig. 10. Effect of Cu contents on the anodic properties of 17%Cr-7%Ni steels in boiling 5% sulfuric acid.

に示す。また、自然電位 ($E_{corr.}$) 不動態化電位 (E_p), 不動態化限界電流 ($I_{p\text{ crit.}}$) および不動態電流 (I_p) におよぼす Cu の影響をまとめて Fig. 10 に示す。

すなわち、Cu の添加により、 $E_{corr.}$ は noble の方向

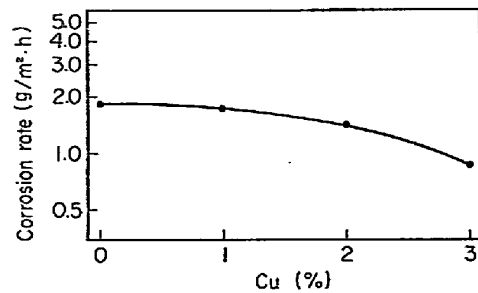


Fig. 11. Effect of Cu contents on the corrosion resistance of 17%Cr-7%Ni steels to boiling 80% acetic acid and 1% formic acid mixed solution.

に移行し、 E_p は less noble の方向に移行する。したがって、活性領域の大きさをあらわす $|E_{corr.} - E_p|$ は狭くなる。また、 $I_{p\text{ crit.}}$ および I_p も Cu の添加により減少し、不動態化しやすくなる。

有機酸に対する耐食性試験として、80% 酢酸+1% 蟻酸沸騰液により、腐食減量を求めたところ Fig. 11 に示すとおり Cu の効果がみられた。

4. 結 言

本研究により以下のことがわかった。

(1) Cu の影響

SUS304 タイプに Cu を約 1% 以上添加すると、機械的特性が変わり、エリクセン値はわずかに低下するが、L.D.R は向上する。したがって、Cu を 1~2% 添加し、Ni, Cr を調整して適度の加工誘起マルテンサイトが発生するような成分にすれば、プレス成形性の優れたステンレス鋼ができる。

(2) Ni, Cr の影響

含 Cu オーステナイトステンレス鋼においては Ni, Cr とも低くなるほど、引張強さは大きくなり、伸びは、加工誘起マルテンサイトが適度に発生するとき最大となる。

プレス成形性は張出し性のよい成分領域と深絞り性のよい成分領域とは一致しない。エリクセン値はオーステナイト安定度がやや不安定の時最大値を示し、余り不安定になると急激に低下する。これに反し、L.D.R は素材でマルテンサイトが析出しない成分範囲内で、オーステナイト安定度が不安定になるほどよくなる。C.C.V は両者の中間の値である。

(3) C の影響

不安定オーステナイトステンレス鋼であっても、C 量を 0.03% 以下にすると、時効割れ感受性は著しく低下する。含 Cu オーステナイトステンレス鋼の低 C 材についても、プレス成形性は、ほぼ、加工誘起マルテンサイ

トの生成量で決まるので、各成分を適切に組合せることにより、使用目的にあつた材料を製造することが可能である。

本研究の成果として、筆者らは、時効割れが起こらないプレス成形性の優れた低C含 Cu オーステナイトステンレス鋼の開発に成功した。

(4) 耐食性

準安定 オーステナイトステンレス鋼への Cu の添加は酸性環境に対する耐食性に有効である。

文 献

- 1) F. K. BLOOM, G. N. GOLLER and P. G. MABUS: Trans. ASM. 39 (1947), p. 843
- 2) 清水敏治, 宮本健二, 杉田賢治: 日ス技報, 8 (1968), p. 91
- 3) T. ANGEL: J. Iron Steel Inst., 177 (1954), p. 165
- 4) Steel, 153 (1963) 18, p. 52
- 5) F. W. SCHALLER, T. E. SCHMID, E. SNAPE: Sheet Metal Ind. 10 (1972), p. 621
- 6) 藤岡外喜夫, 特開昭, 49-130309
- 7) 岡祐, 木下昇, 的場伊三夫: 鉄と鋼, 62 (1976) 11, S 627
- 8) 川島節雄, 結束良一, 鈴木隆志, 原田憲二: 鉄と鋼, 62 (1976) 11, S 626