

論 文

UDC 669.14.018.26 : 539.4.014.11 : 548.232

軟鋼板の n 値におよぼす材質的要因*

増井 浩昭**・河原田 実**・武智 弘***

Metallurgical Factors Affecting the Work Hardening Exponents of Low Carbon Rimmed Steel Sheets

Hiroaki MASUI, Minoru KAWAHARADA, and Hiroshi TAKECHI

Synopsis:

Metallurgical factors affecting the work hardening exponents (n -values) of low carbon rimmed steels were studied. The following results have been obtained;

(1) In the tension test, the amount of work per unit volume which was done on the specimen to the maximum load showed 8.3 ± 0.4 kg/mm² in the low carbon rimmed steel samples, while those of the sample containing 0.1 wt% of phosphorus showed about 9.2 kg/mm².

(2) Theoretical equations concerning n -value, and σ_0 and K (which were obtained in a relationship $\sigma = \sigma_0 + K \cdot \epsilon$ near the maximum load) were obtained considering (1), and agreed well with the experimental results.

(3) Effects of grain diameter on n -value shown by the next equation, was obtained by using (1) and (2).

$$n = 10 / (10 + \sigma_i + 1.3d^{-1/2})$$

where d (mm) is average grain diameter and σ_i (kg/mm²) is intrinsic strength.

(4) The true effect of the content of a chemical element on n -value, eliminating the effect of grain size, was determined by using (1) and (2).

Mn: the effect is related to manganese content in solid solution.

N: the effect is dependent on manganese content.

C.: the effect is saturated above about 0.03 wt%.

S: the effect is far smaller than those of carbon, nitrogen and manganese.

O: the effect is negligible.

(5) Singularity of n -values of the samples containing phosphorus above about 0.05 wt% was found and explained well by using (1).

(Received July 30, 1971)

1. 緒 言

軟鋼板の伸び、張出し特性を材質的な観点から調べる際に、各種の軟鋼の応力-歪の関係を比較、検討することは重要であると考えられる。その理由は、伸び、張出し特性を最も大きく支配するのは、外力に対して材料がどの程度均一に変形しうるかという量であり、それを最も簡単に表わすのは I 軸引張試験における均一伸びだからである。

この均一伸びは、応力-歪曲線を $\sigma = C\epsilon^n$ で表わすならば、その n の値 (加工硬化指数: n 値) で近似される。

軟鋼板の n 値を支配する材質的要因 (化学成分、結晶粒度) については、いくつかの研究^{1)~6)}が行なわれているが、それらは必ずしも統一的な解釈がなされているとはいえない面がある。また、従来の研究^{1)~6)}において

は、 n 値を支配する材質的要因について結晶粒径を介しての化学成分の間接的効果と、いわゆる化学成分の直接的効果とを分離することがむずかしく、このことも問題を複雑化させる一つの原因となつていられる。

さて、

$$n = (\epsilon/\sigma) \cdot (d\sigma/d\epsilon) \quad (\sigma: \text{応力}, \epsilon: \text{歪})$$

という形で表わされる n 値と、材質的要因とを直接に結びつけることは冶金学的なイメージとして容易にわき難いものがある。

そこで、商用軟鋼板の成分元素のうちで一般に、伸び、張出し特性に対して悪影響を与えられられる C、

* 昭和45年4月本会講演大会にて発表

昭和46年7月30日受付

** 新日本製鉄(株)八幡製鉄所技術研究所

*** 新日本製鉄(株)君津製鉄所 工博

N, S, Mn, O, P を中心とした比較的単純な化学成分系からなる 40 余の鋼種を溶製して実験を行ない, n 値を支配する材質的要因について整理することを試みた.

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

供試材は昭和電工製の電解鉄を基材として, 100 kg Baltzer 型真空溶解炉で溶製した. 供試材は大きく分け

て, 純鉄 (電解鉄) 成分系およびリムド鋼成分系に分けられるが, これらのベース材に C, N, S, Mn, O, P などを主として単純添加した.

供試材の化学分析値を Table 1 に示す.

2.2 実験方法

2.2.1 試料の調整および試験方法

100 kg Baltzer 型真空溶解炉から 50 kg 鑄型に分割注入を行ない, 50 kg の鋼塊を作つた.

Table 1. Chemical analysis of samples.

Sample		Chemical analysis (wt%)								
		C	Mn	S	P	Si	Cu	sol. N	insol. N	O
Pure iron base+C	1	0.004	0.01	0.007	0.003	0.013	0.002	0.0026	Tr.	0.005
	2	0.011	0.01	0.007	0.003	0.013	0.003	0.0022	Tr.	0.008
	3	0.016	0.01	0.006	0.003	0.017	0.002	0.0022	Tr.	0.004
	4	0.022	0.01	0.006	0.005	0.015	0.002	0.0018	Tr.	0.004
	5	0.023	0.01	0.007	0.003	0.013	0.002	0.0022	Tr.	0.006
	6	0.030	0.01	0.006	0.003	0.015	0.002	0.0017	Tr.	0.004
	7	0.051	0.01	0.006	0.005	0.018	0.003	0.0018	Tr.	0.008
	8	0.074	0.01	0.006	0.003	0.015	0.003	0.0017	Tr.	0.004
Pure iron base+N	1	0.002	0.01	0.006	0.003	0.013	0.004	0.0114	Tr.	0.017
	2	0.002	0.28	0.006	0.003	0.013	0.003	0.0108	0.0006	0.014
	3	0.003	0.46	0.007	0.003	0.012	0.003	0.0112	Tr.	0.018
Pure iron base+Mn	1	0.003	0.01	0.006	0.003	0.013	0.004	0.0027	Tr.	0.012
	2	0.002	0.15	0.006	0.003	0.012	0.003	0.0022	0.0007	0.013
	3	0.002	0.32	0.005	0.003	0.013	0.003	0.0022	Tr.	0.012
	4	0.002	0.54	0.007	0.003	0.013	0.003	0.0023	0.0004	0.015
Pure iron base+O	1	0.003	0.01	0.006	0.004	0.012	0.004	0.0028	0.0014	0.010
	2	0.003	0.01	0.007	0.004	0.012	0.004	0.0027	0.0008	0.021
	3	0.003	0.01	0.007	0.005	0.013	0.006	0.0031	0.0012	0.046
	4	0.003	0.01	0.007	0.005	0.012	0.004	0.0030	0.0010	0.048
	5	0.003	0.01	0.007	0.003	0.013	0.005	0.0030	0.0010	0.063
Pure iron base+P	1	0.005	0.01	0.008	0.004	0.010	0.004	0.0020	Tr.	0.005
	2	0.006	0.01	0.006	0.023	0.010	0.004	0.0018	Tr.	0.004
	3	0.005	0.01	0.007	0.050	0.010	0.006	0.0024	Tr.	0.004
	4	0.005	0.01	0.007	0.106	0.015	0.005	0.0017	0.0002	0.004
Low carbon rimmed steel base+O	1	0.005	0.30	0.028	0.006	0.015	0.050	0.0026	Tr.	0.010
	2	0.006	0.31	0.025	0.004	0.015	0.050	0.0026	Tr.	0.010
	3	0.004	0.31	0.026	0.004	0.015	0.047	0.0028	0.0014	0.016
	4	0.006	0.31	0.026	0.004	0.015	0.047	0.0032	Tr.	0.017
	5	0.006	0.29	0.026	0.004	0.010	0.045	0.0033	0.0006	0.030
	6	0.005	0.30	0.026	0.004	0.017	0.050	0.0031	0.0006	0.033
	7	0.008	0.28	0.029	0.005	0.010	0.040	0.0030	0.0010	0.041
	8	0.007	0.29	0.029	0.005	0.012	0.040	0.0030	0.0011	0.045
Low carbon rimmed steel base+S	1	0.034	0.33	0.007	0.008	0.011	0.030	0.0033	Tr.	0.004
	2	0.038	0.32	0.012	0.008	0.015	0.030	0.0026	Tr.	0.006
	3	0.035	0.31	0.026	0.008	0.016	0.030	0.0031	0.0004	0.005
	4	0.041	0.32	0.045	0.008	0.010	0.030	0.0026	Tr.	0.006
	5	0.040	0.30	0.100	0.010	0.015	0.030	0.0033	0.0004	0.004
Low carbon rimmed steel base+P	1	0.035	0.32	0.023	0.001	0.015	0.050	0.0041	Tr.	0.008
	2	0.039	0.35	0.022	0.012	0.016	0.050	0.0045	Tr.	0.009
	3	0.038	0.35	0.025	0.044	0.013	0.050	0.0039	Tr.	0.009
	4	0.041	0.34	0.023	0.105	0.018	0.056	0.0042	Tr.	0.010
Low carbon rimmed steel A		0.022	0.32	0.021	0.010	0.013	0.046	0.0028	0.0002	0.032

これを 1250°C×1 hr 加熱後、仕上温度 900°C で熱延を行ない、板厚 2.7 mm とする。ただし、リムド鋼 A だけは 1100°C, 1200°C, 1300°C および 1350°C でおのおの 1 hr 加熱後に同様の熱延を行なつた。

この熱延板を長さ 200 mm に剪断し、これを HCl 酸洗後、圧下率 70% で冷延し、冷延板の最終板厚を 0.8 mm とした。

冷延板の圧延方向に長さ 180 mm×幅 35 mm の試料の板取りを行なつた。

この試料を加熱速度 100°C/hr で、750°C×4 hr の再結晶焼鈍を行なつたのちに炉冷した。焼鈍は乾水素雰囲気で行なわれたが、焼鈍中に試料と雰囲気との反応をなるべく防止するために、試料は約 20 枚を一つにして板厚 0.2 mm の極薄軟鋼板で包んで焼鈍した。

ところで、上記の通常の処理とは別に、純鉄成分系+C材ではC量が異なる試料間の粒径の変動を非常に小さくするためにつぎの整粒処理を施した試料も作つた。

熱延板(板厚 5.5 mm) $\xrightarrow{64\%冷延}$ 冷延板(2 mm) $\xrightarrow{710^\circ\text{C}\times 4\text{ hr}}$ $\xrightarrow{60\%冷延}$ 冷延板(0.8 mm) $\xrightarrow{750^\circ\text{C}\times 4\text{ hr}}$ 炉冷

これらの通常の処理(以下:通常処理)あるいは整粒処理を施した試料から JIS 5号引張試験片を製作した。

引張試験は最大能力 5 t のインストロン引張試験機により、室温で、引張速度 20 mm/min で行なつた。

2.2.2 測定項目および測定方法

(1) 応力-歪曲線と諸特性値

引張試験の荷重-伸び率曲線から応力-歪曲線をもとめ

た。荷重-伸び率曲線の最大荷重点近傍の応力-歪曲線からつぎの(1)式および(2)式にあてはまるような σ_0 , K および n の値をもとめた。

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot \epsilon \dots\dots\dots (1)$$

$$n = (\epsilon/\sigma) \cdot (d\sigma/d\epsilon) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 σ は応力、 ϵ は歪である。

(2) 最大荷重点までの塑性変形仕事量

荷重-伸び率曲線において、伸びの開始点から最大荷重点までの総面積を測定し、これを引張試験片の標点間距離区間の体積で割ることにより、引張の際の最大荷重点までの単位体積当たりの塑性変形仕事量をもとめた。

(3) 粒径

焼鈍した試料の断面で倍率 100 の光学顕微鏡写真を撮影し、その写真について 40 mm 平方内の粒数を測定することにより、結晶粒度および平均結晶粒径(以下:粒径)をもとめた。

3. 実験結果および考察

3.1 最大荷重点までの塑性変形仕事量

Fig. 1 は最大荷重点までの単位体積あたりの塑性変形仕事量である。Pの含有量の高い試料を除いては、いずれも 8.3 kg/mm² 前後の値を (8.3±0.4 kg/mm²) 示しており、化学成分および粒径が異なつても、さほど大きな変化を示していないことがわかる。

3.2 n 値と諸定数との関係

軟鋼板の n 値は(2)式で表わされる。

本実験鋼種について、おのおの化学成分元素の含有量

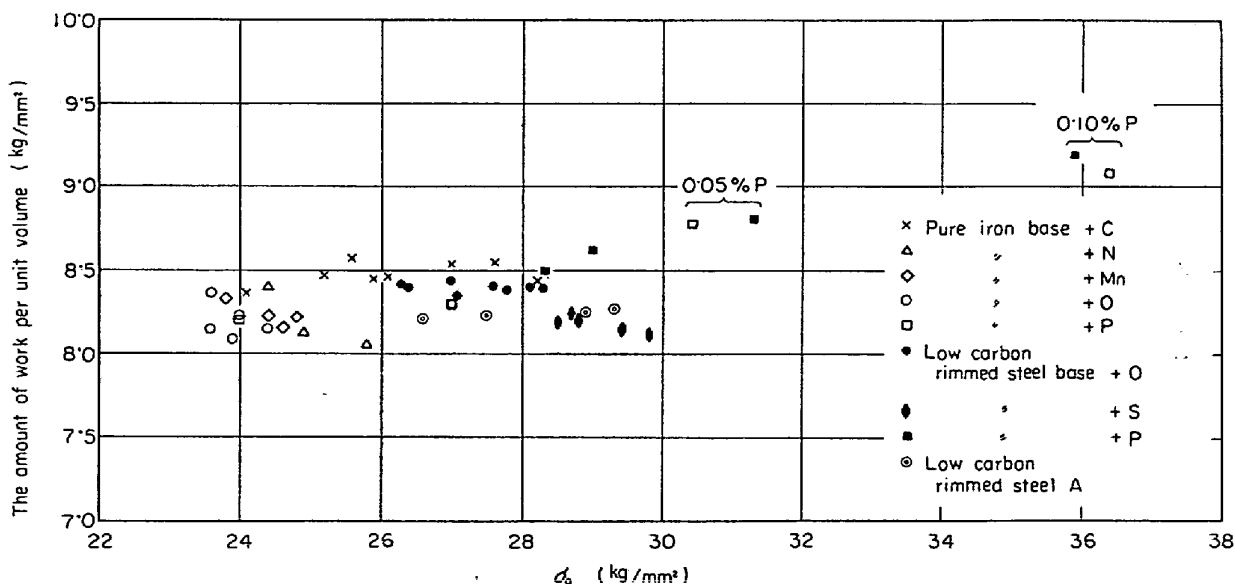


Fig. 1. Relation between the amount of work per unit volume which is done on the specimen to the maximum load, and σ_0 which is obtained in a relationship $\sigma = \sigma_0 + K\epsilon$ in true strain range near the maximum load in the tension test.

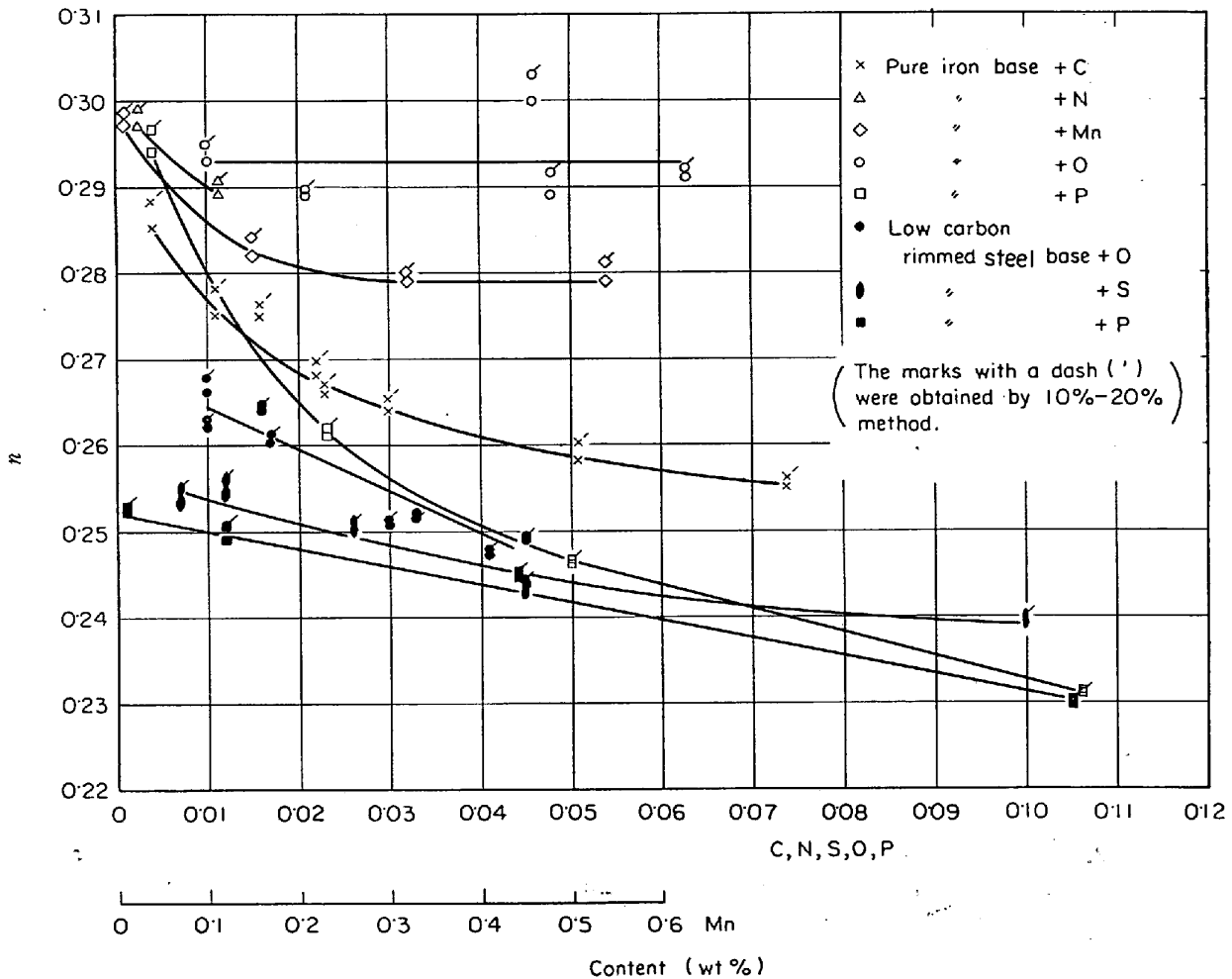


Fig. 2. Relation between n -values and contents of C, N, S, Mn, O and P in the low carbon steels.

と n 値との関係を Fig. 2 に示す。なお、通常行なわれているような伸び率 10%, 20% の荷重から求められた n 値も参考として Fig. 2 に示しておいた。

両者はあまり大きな差はないが、後者の n 値の方がやや高目に出ている傾向が認められる。

ところで、軟鋼板の場合、最大荷重点近傍のかなり広い歪の領域において、(1) 式の関係が成立する。ここで、 σ_0 はその軟鋼の強度水準、 K は加工硬化率を表わす材料定数と考えられる。

n と σ_0 との関係を Fig. 3 に、 K と σ_0 との関係を Fig. 4 に、さらに $K \cdot n$ と σ_0 との関係を Fig. 5 に示す。

ところで、3.1 でもとめた最大荷重点までの単位体積当たりの塑性変形仕事量を E とすると、 E は近似的につぎのように表わされる。

$$E = \int_0^n \sigma d\epsilon \dots\dots\dots (3)$$

(1) 式を考慮すると、近似的につぎの関係が得られ

る。

$$E = \int_0^n (\sigma_0 + K \cdot \epsilon) d\epsilon = \sigma_0 n + (Kn^2)/2 \dots\dots\dots (4)$$

一方、(1) 式と (2) 式とからつぎの (5) 式がもともてる。

$$\sigma_0 = K(1-n) \dots\dots\dots (5)$$

(4) 式と (5) 式とからつぎの (6) 式、(7) 式および (8) 式がもともてる。

$$n = 1 + (E/\sigma_0) - \{1 + (E/\sigma_0)^2\}^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

$$K = E + \{E^2 + \sigma_0^2\}^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

$$K \cdot n = E - \sigma_0 + \{E^2 + \sigma_0^2\}^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、P の含有量の高い ($P > 0.04\%$) 試料を除いた全実験試料の最大荷重点までの単位体積当たりの塑性変形仕事量の平均値をもとめると 8.3 kg/mm^2 となる。

そこで、(6) 式、(7) 式および (8) 式の E の値に 8.3 kg/mm^2 を入れて計算すると、おのおの Fig. 3, Fig. 4 および Fig. 5 の実線で示されるような関係になった。

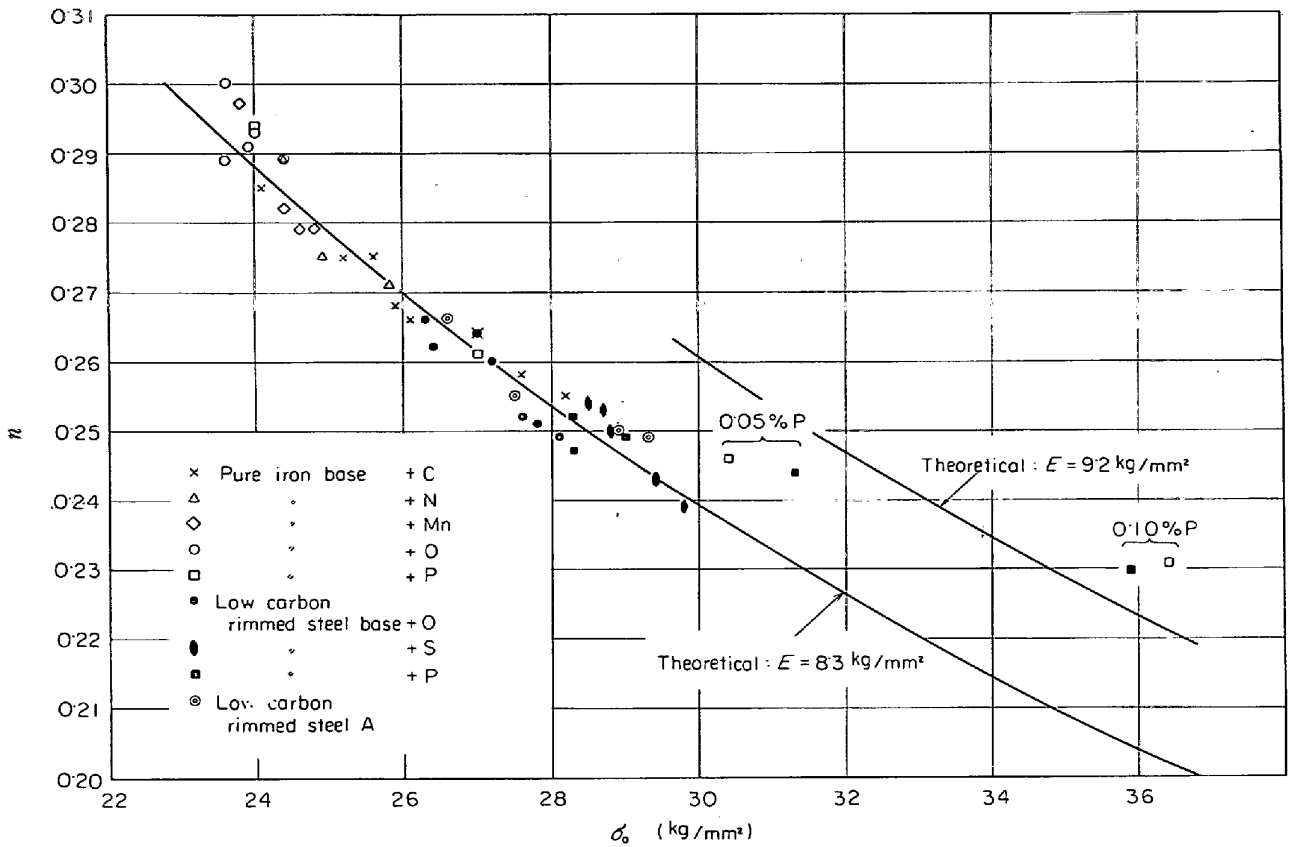


Fig. 3. Relation between n values and σ_0 which is obtained in a relationship $\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon$ in true strain range near the maximum load in the tension test. The lines are calculated using the theoretical equation (6).

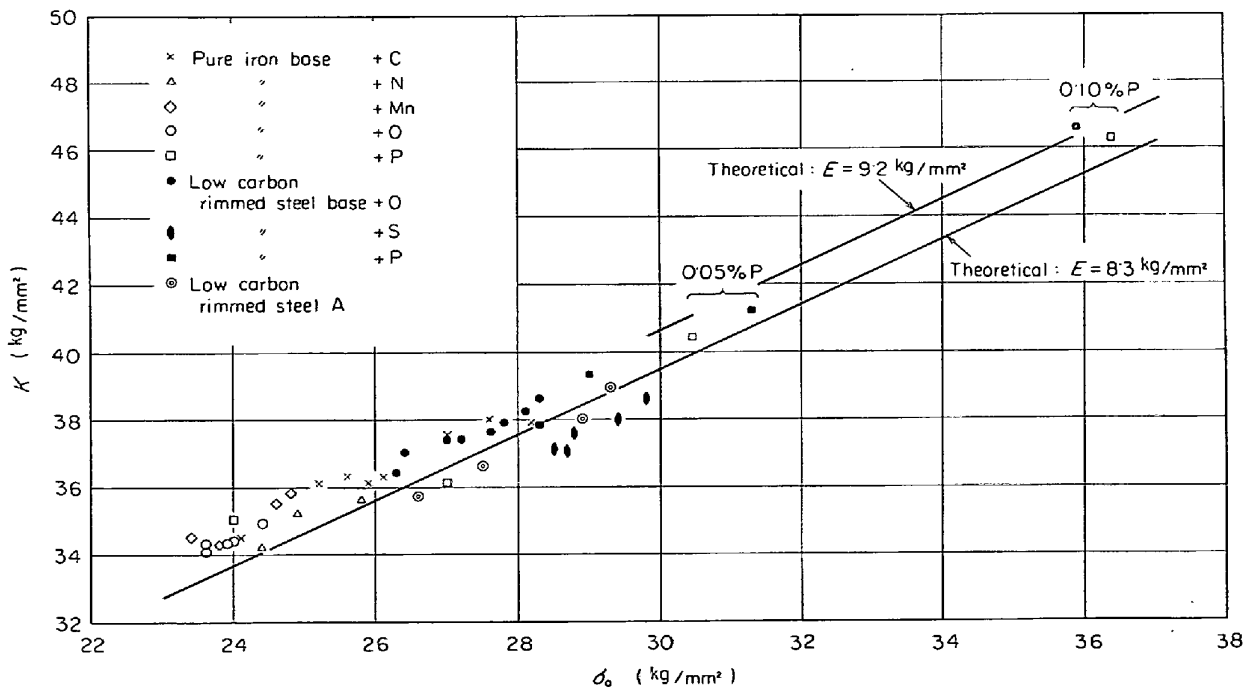


Fig. 4. Relation between K and σ_0 , which are obtained in a relationship $\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon$ in true strain range near the maximum load in the tension test. The lines are calculated using the theoretical equation (7).

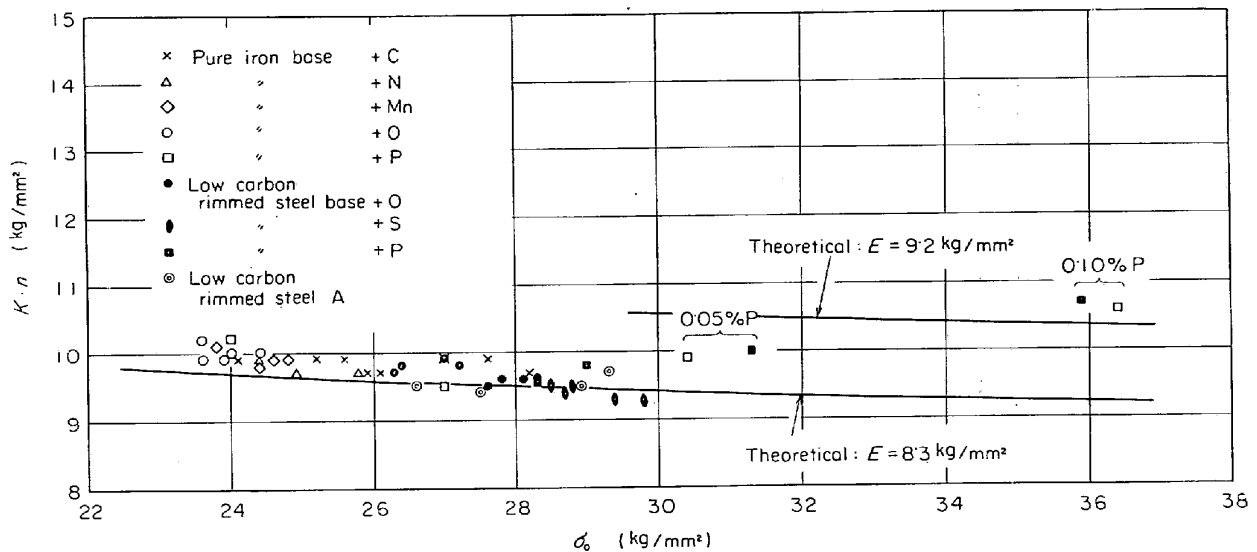


Fig. 5. Relation between $K \cdot n$ and σ_0 , which are obtained in a relationship $\sigma = \sigma_0 + K\epsilon$ in true strain range near the maximum load in the tension test. The lines are calculated using the theoretical equation (8).

いずれも、実測値とよく対応しているといえる。

3.3 n 値と粒径との関係

実験試料の粒径 d (mm) と σ_0 との関係を図 6 に示す。

ここで A はリムド鋼 A の熱延前の加熱温度を変えることによつて焼鈍板の粒径を変化させたものであり、図中に加熱温度を示してある。 σ_0 は $d^{-1/2}$ に対して直線的な相関があり、(9) 式のように表わされる。

$$\sigma_0 = \sigma_1 + 1.3 d^{-1/2} \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 σ_1 は粒径の効果以外の強度因子であり、たとえば添加元素による固溶体硬化などと考えられる。

(5) 式を変形するとつぎの(10)式がもとまる。

$$n = K \cdot n / (\sigma_0 + K \cdot n) \dots \dots \dots (10)$$

(10) 式に(9)式を入れると、(11)式がもとまる。

$$n = K \cdot n / (K \cdot n + \sigma_1 + 1.3 d^{-1/2}) \dots \dots \dots (11)$$

ところで、Fig. 5 で示されるように $K \cdot n$ は σ_0 が変化してもほとんど変化せず、ほぼ 10 kg/mm の値をとることが明らかとなった。そこで(11)式は(12)式のようになる。

$$n = 10 / (10 + \sigma_1 + 1.3 d^{-1/2}) \dots \dots \dots (12)$$

(12) 式は軟鋼板の n 値と粒径との関係を示すものである。

3.4 n 値に対する粒径以外の効果

Fig. 6 の B は n 値に対して粒径の効果以外に、おのおのの成分元素の直接的な効果(固溶体効果など)があらわれやすい試料である。B の各試料について粒径の効果

をさし引いたおのおのの主要成分元素の直接的な効果を見るために、そのおのおのの試料において段階的に変化させた主要成分元素(たとえば、純鉄成分系 + C 材の試料では C)の含有量の増加分と、 σ_0 の増加分 $\Delta\sigma_0$ との関係を Fig. 6 からもとめた。 $\Delta\sigma_0$ のもとめかたは Fig. 7 に簡単に示される。すなわち、 σ_0 と $d^{-1/2}$ との勾配は Fig. 6 の A の $1.3 \text{ kg/mm}^2/\text{mm}^{-1/2}$ を使い、主要成分元素 X の含有量の最小の値 ($X \text{ min}\%$) の点を通る勾配 1.3 の直線と、その主要成分元素との個々の含有量 ($X_1\%$) の点との縦軸 (σ_0) の差を $\Delta\sigma_0$ とする。したがつて、(9) 式との関係から、 $\Delta\sigma_0$ は $\Delta\sigma_1$ に等しいと考えられる。

ところで、Table 1 に示されているように、たとえば純鉄成分系 + Mn の試料では O および S を若干量含有しており、実際の Mn の効果は O および S と化合するだけの Mn 量を差し引いた、いわゆる固溶 Mn 量と $\Delta\sigma_0$ との関係でもとめた方が都合がよいと考えられる。ここで固溶 Mn 量は、 $\text{Mn}\% - (55/16) \cdot \text{O}\% - (55/32) \cdot \text{S}\%$ としてもとめた。したがつて、Mn 以外の他の主要成分元素を含む試料においてもその $\Delta\sigma_0$ は、Fig. 7 の方法でもとめた値から個々の固溶 Mn 量による $\Delta\sigma_0$ 分を差し引いた値を使つた方がより正確にその主要成分元素の直接的な効果を出すことができると考えられる。

このような方法により、ある主要成分元素の直接的な効果 $\Delta\sigma_0$ をより正確にもとめ、その元素の含有量増加分 ($X_1\% - X \text{ min}\%$) との関係をもとめると Fig. 8 のようになる。ここで、Mn については含有量増加分を固溶

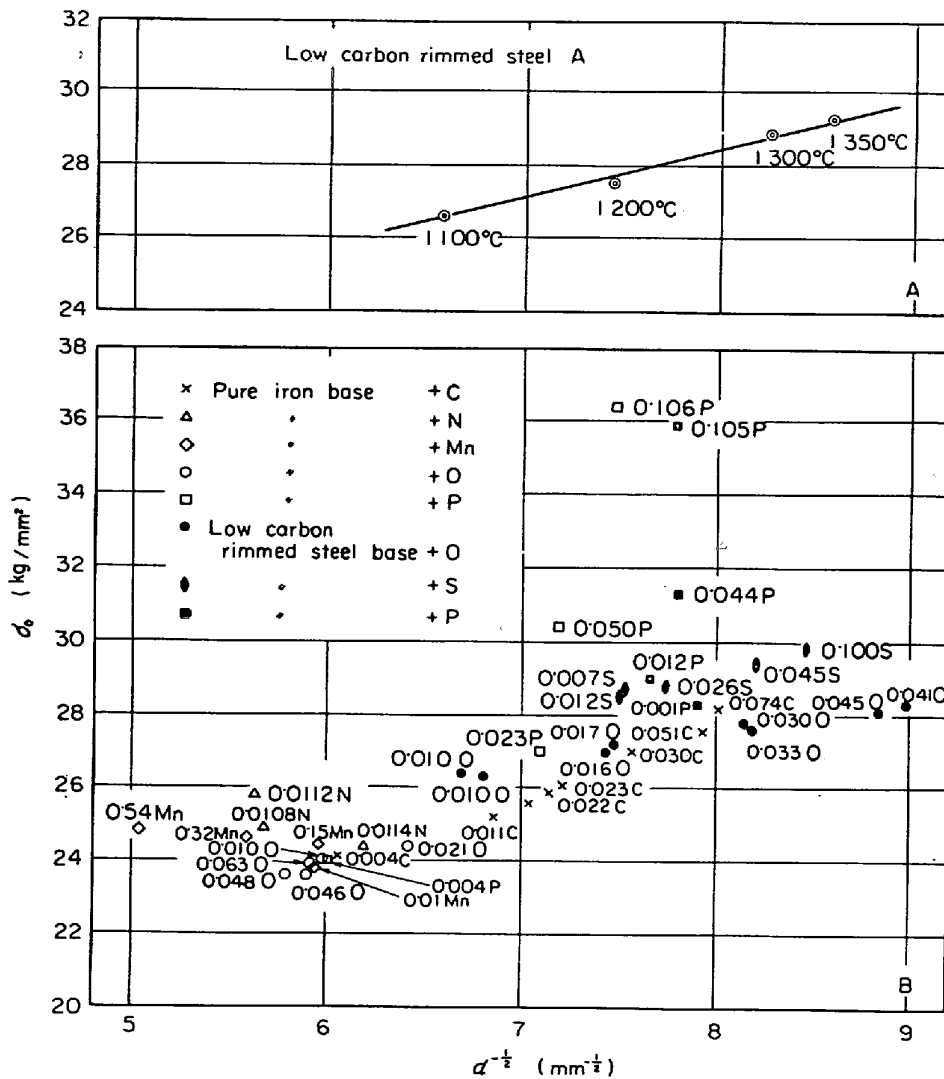


Fig. 6. Relation between σ_0 and the minus one half power of average grain diameters. The temperatures on A are those of heating before hot rolling. The figures on B are wt% contents of each chemical element.

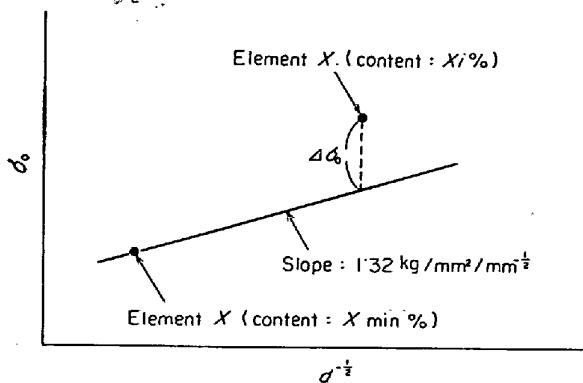


Fig. 7. Schematic representation of the way to determine $\Delta\sigma_0$ of a sample containing $X_1\%$ of element X. $X_{min}\%$ is the smallest content of element X in a series of samples in which only element X increases remarkably.

Mn 量の増加分でとつてある。

3.4.1 Mn の効果

$\Delta\sigma_0$ におよぼす固溶 Mn 量の効果は Fig. 8 に示されるように、固溶 Mn 量 0.1% 当たり $\Delta\sigma_0$ は 0.45 kg/mm² の増加となる。

3.4.2 N の効果

$\Delta\sigma_0$ におよぼす N の効果は、固溶 Mn の含有量によつて異なつてくる。

Table 1 の pure iron base+N の試料 1, 2 および 3 と pure iron base+Mn の試料 1 とを比較した結果を Fig. 9 に示す。すなわち、N の含有量増加分が 0.008% 程度でも、Mn 量が 0.01% (固溶 Mn 量: 0%), 0.28% (0.22%), 0.46% (0.39%) と変わるにつれ、 $\Delta\sigma_0$ はそれに応じて変化している。固溶 Mn 量の増加とともに固溶 N 量が増加するともいわれており、定性

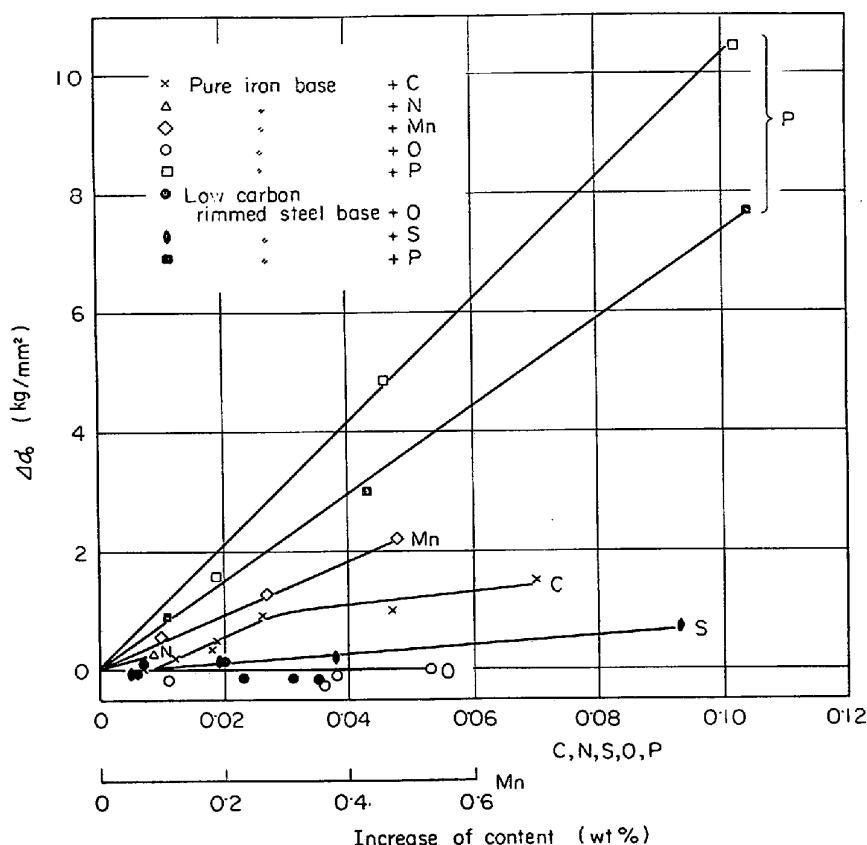


Fig. 8. Relation between increase of contents and $\Delta\sigma_0$ which is true effect of chemical elements eliminating the effect of grain size in σ_0 .

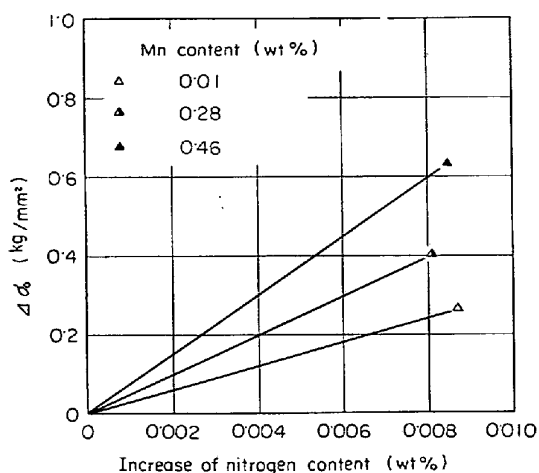


Fig. 9. Relation between increase of nitrogen content and $\Delta\sigma_0$ which is true effect of nitrogen content eliminating the effect of grain size in σ_0 on pure iron base+N samples containing various manganese contents.

的には関係がありそうである。

3.4.3 Cの効果

Cの含有量増加分と $\Delta\sigma_0$ との関係は Fig. 8 に示されるように、約 0.03% 以上では $\Delta\sigma_0$ が飽和するような傾

向がある。

ところで、 $\Delta\sigma_0$ の値がそれほど大きくないが、これはCの増加による n 値の低下の原因がおもに粒径減少による、ということを示すものであると考えられる。

そこで、この考察を確かめる目的で、つぎの実験をおこなった。

軟鋼板に前述の整粒処理をほどこすと、最終的に粒径が比較的一定にそろった焼鈍板がえられる。Table 1 の pure iron base+C の試料 1, 2, 5, 6 および 8 について整粒処理をおこない、それらについて σ_0 および n をもとめ、粒径との関係を調べた。

Fig. 10 は整粒処理材および通常処理材における $d^{-1/2}$, σ_0 および n の関係を示したものである。

Fig. 10 で示されるように、整粒処理材の $d^{-1/2}$, σ_0 および n は通常処理材のそれらと異なってくるが、整粒処理材についても、前述の理論曲線と比較的よく対応しているといえよう。

ここで、整粒処理材におけるCの直接的効果を見るために、前述の Fig. 7 に示される方法で $\Delta\sigma_0$ をもとめてみた。Fig. 11 は通常処理材と整粒処理材の $\Delta\sigma_0$ を比較したものであるが、Cの含有量増加分と $\Delta\sigma_0$ との間

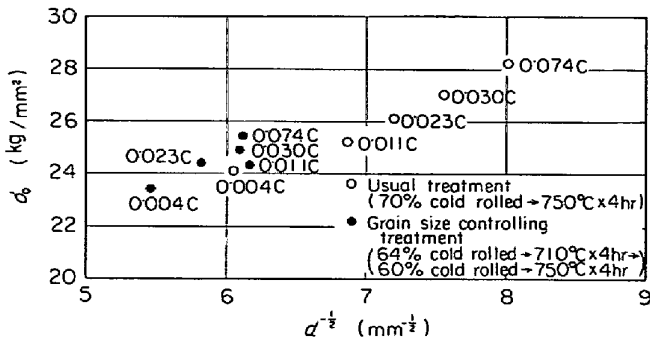


Fig. 10. (a) Relation between σ_0 and the minus one half power of average grain diameter in the usual treatment and the grain size controlling treatment on pure iron base+C samples.

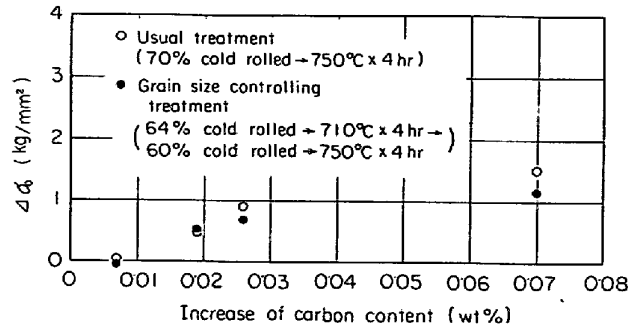


Fig. 11. Relation between increase of carbon content, and $\Delta\sigma_0$ which is true effect of carbon content eliminating the effect of grain size in σ_0 on pure iron base+C samples in the usual treatment and the grain size controlling treatment.

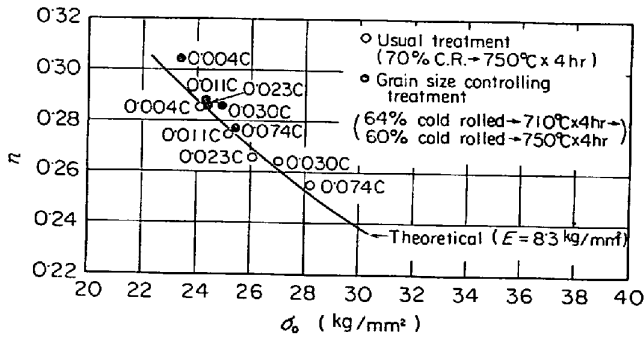


Fig. 10. (b) Relation between n and σ_0 in the usual treatment and the grain size controlling treatment on pure iron base+C samples.

には一応の再現性が認められる。0.074% C 材の通常処理材と整粒処理材の焼鈍板の光学顕微鏡写真を Photo. 1 に示す。

通常処理材と整粒処理材の破断伸びを Fig. 12 に示すが一応 n 値との対応が認められる。

3.4.4 Oの効果

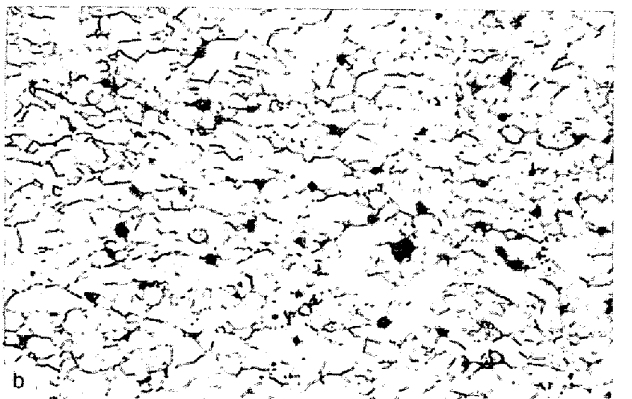
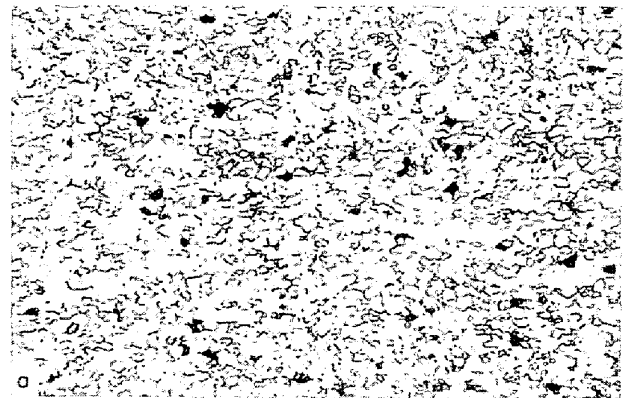
Fig. 2 で示されるように、軟鋼板の n 値への O 量の効果は純鉄成分系とリムド鋼成分系とで著しく異なり、前者は O 量が増加しても n 値はほとんど変化しないが、後者は O 量の増加とともに n 値は顕著に低下する。

ところが、この傾向がほとんど粒径を介しての効果であることは Fig. 8 で示されるとおりである。

これは、O のフェライトへの固溶量がほとんどなく、ほとんどが酸化物として存在することから考えて当然であると考えられる。

3.4.5 Sの効果

Fig. 8 で示されるように、S の $\Delta\sigma_0$ への効果は小さい。これも、S のフェライトへの常温での固溶限が非常に小さいことから当然であると考えられる。



(a) usual treatment (70% cold rolled → 750°C x 4 hr) ×100(3/5)
(b) grain size controlling treatment (64% cold rolled → 710°C x 4 hr → 60% cold rolled → 750°C x 4 hr)

Photo. 1. Microstructures of the pure iron base+0.074% C sample in the usual treatment and the grain size controlling treatment.

3.4.6 Pの効果

Fig. 8 で示されるように、 $\Delta\sigma_0$ への P の効果は非常に大きく、純鉄成分系では P 0.01% 当たり $\Delta\sigma_0$ は約 1 kg/mm² の増加となる。

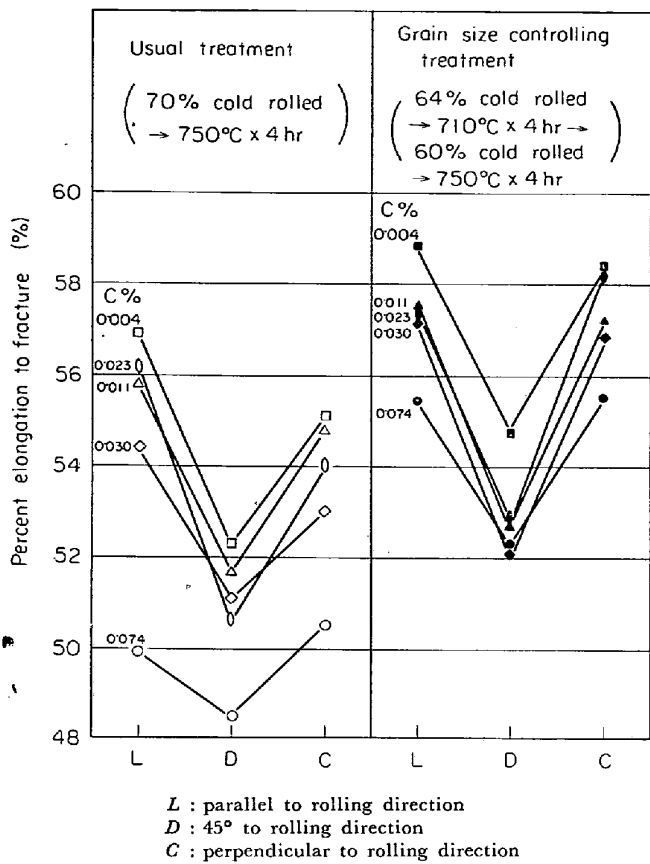


Fig. 12. The percent elongations to fracture in the usual treatment and the grain size controlling treatment on pure iron base + C samples.

ところで、Fig. 3 でも示されるように、 P が約 0.04% 以上含まれると、 σ_0 と n との関係は一般の軟鋼板のそれと異なり、同じ σ_0 の値をもつ一般の軟鋼板の n 値よりもかなり高い n 値を示している。

この現象は、Fig. 1 の最大荷重点までの単位体積当たりの塑性変形仕事量が P が約 0.05% の試料で 8.8 kg/mm²、 P が約 0.1% の試料で 9.2 kg/mm² 程度の値を示していることと関係があると考えられる。そこで、(6)式、(7)式および(8)式の E に 9.2 kg/mm² を入れて、 n 、 K および $K \cdot n$ を計算した結果をおのおの Fig. 3、Fig. 4 および Fig. 5 に示したが、いずれも $P=0.1\%$ の試料の実測値とよい対応が認められた。

P は常温でもフェライトへの固溶限が約 1.2% と大きく⁸⁾、かつその固溶体硬化能も非常に大きいことも上記のような現象と関係があると推測される。

P によるこの現象は、さらに強度水準の高い鋼板の領域でも観測され、 P を 0.15~0.20% 含有して引張強度 40~50 kg/mm² class の鋼板の n 値や破断伸びは、同程度の引張強度を有する他の鋼板のそれらよりもかなり高いことを確認している。

3.5 最大荷重点までの塑性変形仕事量についての補足

引張試験において、 P : 荷重、 σ : 応力、 ϵ : 歪、 A : 断面積 とするとき、つぎの関係が成り立つ。

$$P = \sigma A \dots\dots\dots (12)$$

$$dP = \sigma dA + A d\sigma = A(-\sigma d\epsilon + d\sigma) \dots\dots\dots (13)$$

最大荷重点では $dP=0$ より(14)式がもとまる。

$$d\sigma/d\epsilon = \sigma \dots\dots\dots (14)$$

フェライト系の鉄の変形応力に対しては、粒界や不純物元素の寄与が大きく、 σ は近似的に(15)式のように表わされる。

$$\sigma = \sigma_w + \sigma_0' \dots\dots\dots (15)$$

(ここで、 σ_w : 加工硬化量、 σ_0' : 粒界などの寄与)

$d\sigma_0'/d\epsilon = 0$ と考えられるので(16)式がもとまる。

$$d\sigma/d\epsilon = d\sigma_w/d\epsilon \dots\dots\dots (16)$$

ところで、加工硬化量 σ_w は単に歪 ϵ だけの函数ではなく、 σ_0' の影響を受けるので、第1次近似として、ここでつぎのように表わす。

$$\sigma_w = M(\sigma_0') \cdot f(\epsilon) \dots\dots\dots (17)$$

さらにこれを微分するとつぎのようになる。

$$d\sigma_w/d\epsilon = M(\sigma_0') \cdot f'(\epsilon) \dots\dots\dots (18)$$

3.3 でも述べたような σ_0 と K との関係を定性的にとり入れれば、 $M(\sigma_0')$ は σ_0' の増加函数となつている。物理冶金学的に考えると、 σ_0' を増加させる粒界や不純物元素などは加工中の転位増殖率を大きくし、また転位の運動に対して障害となることなどから定性的には説明されると考えられる。

さて、(15)式~(18)式を(14)式に入れると、最大荷重点ではつぎの関係が成立する。

$$M(\sigma_0') \cdot f'(\epsilon) = M(\sigma_0') \cdot f(\epsilon) + \sigma_0' \dots\dots\dots (19)$$

(19)式を模式図的に説明するとつぎのようになる。

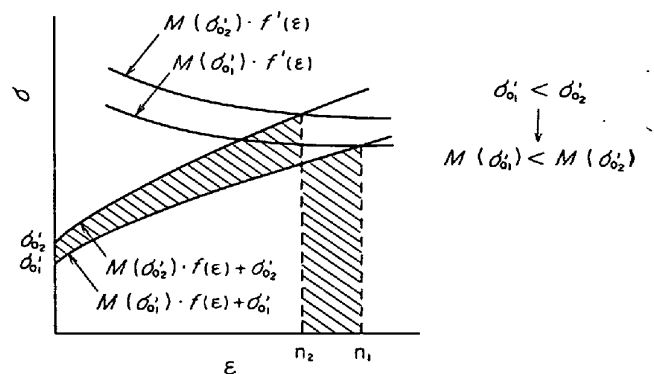


Fig. 13. Schematic representation to know why the amount of work per unit volume which is done to the maximum load, doesn't vary largely even in samples of different σ_0' .

強度水準の異なる 1, 2 の試料があつて, $\sigma_{02} < \sigma_{01}$ とする. このとき, $M(\sigma_{01}) < M(\sigma_{02})$ となる. これを図で定性的に示すと Fig. 13 のようになる. Fig. 13 のハッチした部分の面積がほぼ等しいということが 3.1 に述べたことと対応する.

4. 結 言

軟鋼板の伸び, 張出し特性をよく表わすといわれている 1 軸引張試験による加工硬化指数 n 値におよぼす材質的要因を調べた. 主として, 純鉄成分系とリムド鋼成分系とにおいて, C, N, S, Mn, O, P の含有量と n 値との関係を調べた. おもな結果はつぎのとおりである.

(1) 本実験に用いた試料においては化学成分や粒径が異なつても, 引張試験の最大荷重点までの単位体積当たりの塑性変形仕事量はあまり変わらず, ほぼ 8.3 kg/mm^2 程度である. ただし, P が高くなるとこの値は大きくなり, P を 0.1% 含有すると約 9.2 kg/mm^2 となる.

(2) n 値, 加工硬化率 K および強度水準を表わす σ_0 の間に, (1) の塑性変形仕事量の値を含んだ数式関係が導かれかつ実測値とのよい対応が認められたが, この関係から n 値におよぼす粒径の効果および C, N, S, Mn, O, P の粒径以外の直接的効果が定量的に把握された.

(3) n 値におよぼす粒径 d の効果は

$$n = 10 / (10 + \sigma_i + 1.3 d^{-1/2})$$

で表わされる. ここで σ_i は不純物成分元素による固溶体硬化などである.

(4) n 値におよぼす不純物成分元素の粒径以外の直接的効果は(2)に述べた σ_0 を介してもとめられるが, 傾向的にはつぎのようである.

Mn は, 含有される O, S と化合すべき当量を差し引いた, いわゆる固溶 Mn 量とよく対応する.

N は固溶 Mn 量によつてその効果が異なり, 固溶 Mn 量の多いほど効果は大きい.

C は約 0.03% 程度で効果が飽和する傾向がある.

S は C, N, Mn などと比べて効果が小さい.

O はほとんど効果が認められない.

(5) n 値に対する P の直接的効果は特殊であり, 同じ強度水準 σ_0 の他の軟鋼の n 値よりも高いが, これは(1)に述べた現象と対応している.

文 献

- 1) W. B. MORRISON: Trans. ASM, 59 (1966), p. 824
- 2) T. GLADMAN, B. HOLMES, and F. B. PICKERING: JISI, 208 (1970), p. 172
- 3) 松藤, 下村: 鉄と鋼, 56 (1970), p. 28
- 4) W. B. MORRISON and R. L. MILLER: Paper to be published in Proceedings of 16th Sagamore Conference, 1969, p. 614
- 5) 市山, 小泉, 吉田, 渡辺, 西海: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 1229
- 6) A. R. ROSENFELD and G. T. HAHN: Trans. ASM, 59 (1966), p. 962
- 7) J. F. ENRIETTO: Trans. Met. Soc. AIME, 224 (1962), p. 43
- 8) 今井: 鉄鋼と合金元素 (下), (1966), [誠文堂新光社]