

(3) 工具摩耗は硬い析出粒子を多量に含み、切削抵抗の変動の大きい時効材において著しい。また両熱処理材とも横すくい角が小さくなると工具摩耗は少なくなり、本鋼のような難切削材を超硬工具で削る場合には、負の横すくい角の採用が工具寿命に対して効果的である。

終わりに本実験に関してご援助をいただいた金属材料技術研究所依田、吉田、小池の各氏に深謝いたします。

文 献

- 1) 例えば竹山: 精密機械, 24 (1958), p. 586
- 2) V. F. ZACKAY: "High strength materials" (1964), p. 239 (Wiley)
- 3) 嗟峨, 宮川: 材料, 14 (1965), p. 549
- 4) 例えば切削加工専門委員会報告, 精密機械, 24 (1958), p. 371
- 5) 竹山: 機械試験所報告, 31 (1959), p. 28
- 6) 奥島: 金属材料の加工性講習会資料 (1963), p. 56
- 7) F. W. WILSON: "Machining with carbides and oxides" (1962), p. 62 (McGraw-Hill)

669.14-41.5:539.388.2
:539.4.016.2

(183) 応力-歪曲線の変化の要因およびその加工硬化指数におよぼす影響について

(鋼板の応力-歪曲線に関する考察-I)

川崎製鉄千葉製鉄所

工博 神崎 文暁・中川吉左衛門

○佐々木 徹・野原 清彦

Factors Affecting on the Stress-Strain Curve of Steel Sheet

(Studies on the stress-strain curve of steel sheet - I)

Dr. Fumiaki KANZAKI, Kichizaemon NAKAGAWA

Tohru SASAKI and Kiyohiko NOHARA

1. 緒 言

鋼板を一軸応力下で塑性変形させた場合の加工硬化状況を示す試験値として従来より加工硬化指数 (strain hardening exponent) n を用いてきた。これは周知のように鋼板の塑性カーブが $\sigma = c\epsilon^n$ (1) (σ : 真応力, ϵ : 真歪, c および n : 定数) で近似されると仮定し定数 n でその加工硬化状況を表示しようとするものである。この n を材料特性の1つとして評価するさいにはその値が材料の塑性カーブの変化に応じてどのように変化するか、また塑性カーブを (1) 式で近似することの妥当性など十分に吟味しておく必要がある。以上の点を検討するさいに種々の鋼板の塑性カーブについて $\log \epsilon$ vs $\log \sigma$ の関係をプロットしてみるのが早道で、それはこれで得られた曲線の勾配の大小が直接 n の大小を表わし、その直線からのずれが近似性を示しているからである。直線からのずれが大きい場合には通常の n の計算法 $n^{(nominal)} = (\log \sigma_1 - \log \sigma_2) / (\log \epsilon_1 - \log \epsilon_2)$ (2) の妥当性がうすくなる。このようにして求めた $n^{(nominal)}$

が調質圧延率の増大により減少することはよく知られているところであるが¹⁾²⁾本研究では塑性カーブや $n^{(nominal)}$ に変化を与える要因について考察および実験を行ない、(第1報)塑性カーブのさらにより近似式と考えられる $\sigma - \beta = c'(\epsilon - \alpha)^{n'}$ (3) による近似法の検討および調質圧延、歪時効などによる α , β , c' , n' の変化を調べた。(第2報)

2. 塑性カーブの移動による変化

まずはじめに塑性カーブが厳密に (1) 式に従うものと仮定しこれを歪軸 (ϵ 軸) および応力軸 (σ 軸) に対し平行移動した場合に $\log \epsilon$ vs. $\log \sigma$ の関係およびその勾配 $n^{(nominal)}$ がどのように変化するかを調べた。歪軸に対する平行移動 (数式的には (3) 式の α の変化) は塑性カーブの予歪による変化に類似し (引張予歪の場合は完全に平行移動で説明できるが調質圧延に関しては速断できない) 応力軸に対する平行移動 (数式的には (3) 式の β の変化) は塑性カーブの歪時効による変化に類似していると考えられるからである。Fig. 1 に塑性カーブを歪軸方向に平行移動した場合すなわち (3) 式で $\beta = 0$ とし、 c' , n' を固定し α のみを変化させたときの $\log \epsilon$ vs. $\log \sigma$ の関係を示す。この図からわかるように $\mu = 0$ すなわち $\alpha = 0$ ($\alpha = \ln(1 + \mu)$) のときのみ完全な直線となる。 μ が正 $\rightarrow 0 \rightarrow$ 負と変化するにしたがつて塑性カーブは焼鈍状態 \rightarrow 予歪付与の変化に対応する。Fig. 1 の各曲線の勾配 $n^{(nominal)}$ の μ (すなわち α) およ

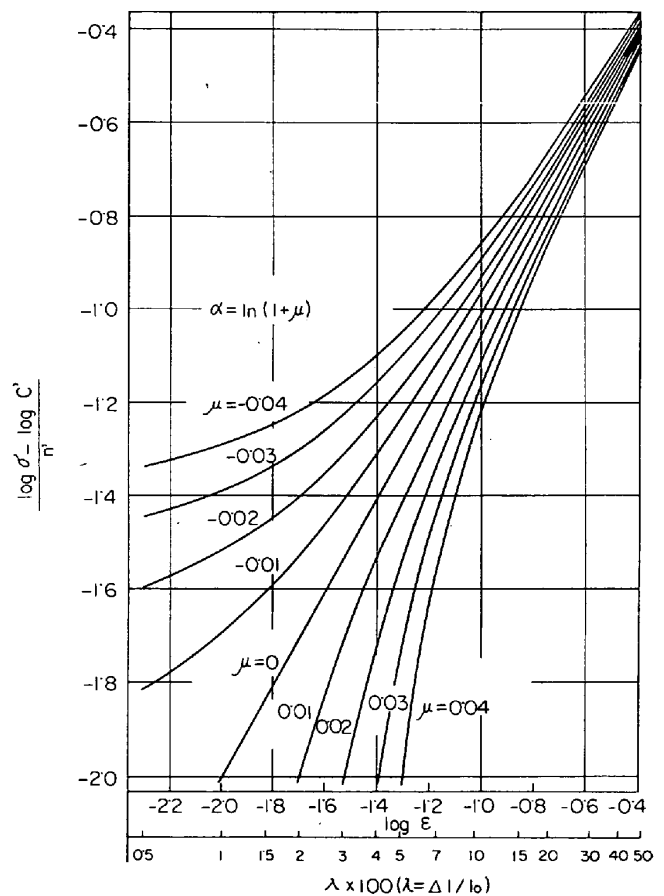


Fig. 1. Relation between $\log \epsilon$ and $\log \sigma$ when various α is set in $\sigma = c'(\epsilon - \alpha)^{n'}$.

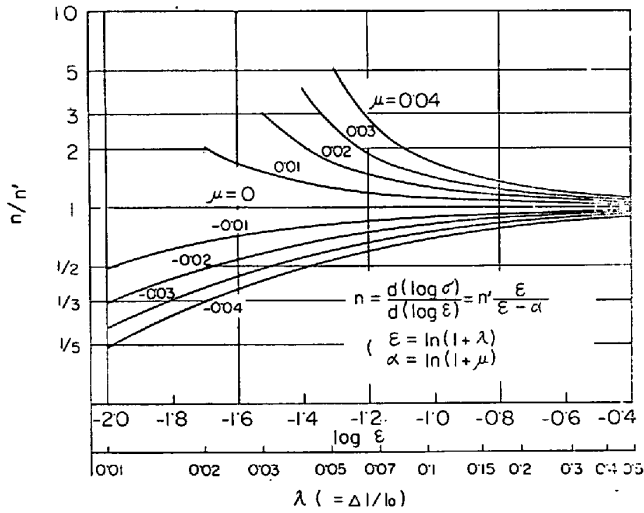


Fig. 2. Gradient of the curves in Fig. 1.

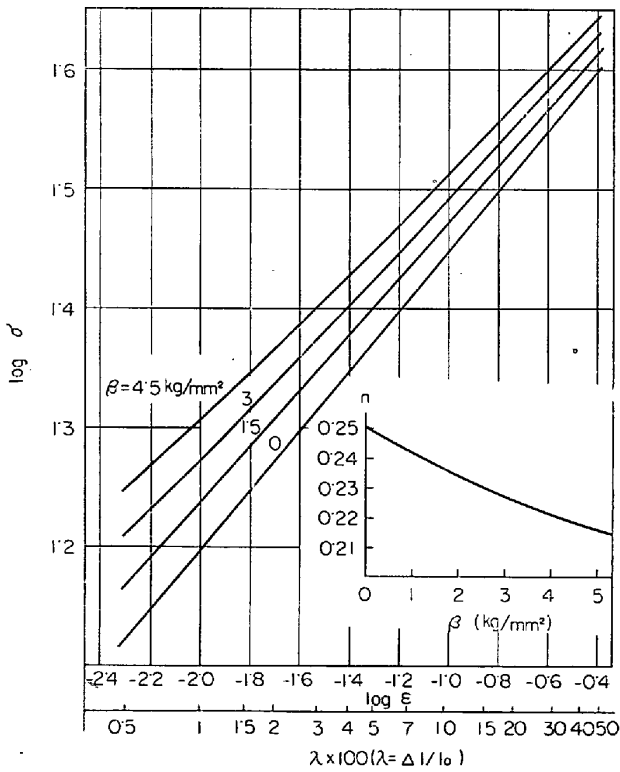


Fig. 3. Relation between $\log \epsilon$ and $\log \sigma$ when various β is set in $\sigma = \beta \cdot c' \cdot \epsilon^n$. ($c' = 50 \text{ kg/mm}^2$ $n' = 0.25$)

び λ (試料の歪量: $\Delta l/l_0$) による変化を Fig. 2 に示す。ここで注意すべきは (3) 式の n' は不変であるにもかかわらず α によつて $n^{(nominal)}$ がかなり変化していることである。すなわち試料の加工硬化性 (塑性カーブ) が全く変化しない場合でも (2) 式による従来の n 値はみかけ上変化するのである。なお塑性カーブを α 補正して表示する場合 3 つの未知数 α および n', c' に対しカーブ上の生点 (ϵ_1, σ_1), (ϵ_2, σ_2), (ϵ_3, σ_3) を与えることにより 3 元連立方程式を立てても数式的に解いて α を求めることはできずこれに対しわずかに関式解法が示されているが³⁾ Fig. 1 の各曲線の勾配を求める一般式 $d(\log \sigma) / d(\log \epsilon) = n' \cdot \epsilon / \epsilon - \alpha$ (4) を用いると塑性カーブの ϵ_1 における勾配 n_1 および ϵ_2 における勾配 n_2 を求めることにより α, n_1 を求めることができる。通常使用している n は $\log \epsilon$ vs. $\log \sigma$ のカーブの $\lambda = 0.1$ (10% 変形) および 0.2 (20% 変形) の間が直線と仮定してその勾配で表わしているがこの程度の歪領域で勾配 n が α によつてどのように変化するかを n/n' の比率および n' に具体的数値を与えた場合とについて Table 1 にその値を示す。この表から α のわずかな変化によつて n が大きく変化することがわかる。次に Fig. 3 に塑性カーブを応力軸方向に平行移動した場合すなわち (3) 式で $\alpha = 0$ とし c', n' を固定し β のみを変化させたときの $\log \epsilon$ vs. $\log \sigma$ の関係を示す。

$n^{(nominal)}$ ($\lambda = 0.1 \sim 0.2$) の値は右下図に示すようになり $\beta \rightarrow$ 大で $n \rightarrow$ 小となる。この場合も α を変化させた場合と同様塑性カーブの加工硬化性は全く変化していないのに $n^{(nominal)}$ が変化する。以上述べてきたように塑性カーブの加工硬化性が全く変化しなくても換言すれば n' が一定であつてもそれをわずかに平行移動させるだけで (α, β を変化させるだけで) $n^{(nominal)}$ はかなり変化する。すなわち通常の $n^{(nominal)}$ で加工硬化性を表示しようとする場合、みかけ上の変化も含まれてしまう可能性があることに注意すべきである。

3. 実用鋼板の塑性カーブ

3.1 調質圧延率による変化

試料として通常の低炭素リムド冷延鋼板 (A) およびこれを焼鈍時にオープンコイル焼鈍炉で湿水素処理をほどこし、含有炭素、窒素量をそれぞれ $0.005 \text{ wt}\%$, $0.0006 \text{ wt}\%$ 程度に下げ、結晶粒度も上記の試料にくらべかなり粗大化している冷延鋼板 (B) を用い、これらの $\log \epsilon$ vs. $\log \sigma$ の関係の調質の圧延率による変化を調べた。焼鈍状態から調質圧延率約 2.5% までの間数種変化させてそれぞれの $\log \epsilon$ vs. $\log \sigma$ をプロットした。試料 A および B の塑性カーブの調質圧延率による変

Table 1. Gradient change with α .

μ	0.04	0.03	0.02	0.01	0	-0.01	-0.02	-0.03	-0.04	
n/n'	$\lambda = 0.1$	1.699	1.450	1.262	1.117	1	0.905	0.825	0.758	0.700
	$\lambda = 0.15$	1.390	1.268	1.165	1.077	1	0.933	0.874	0.821	0.774
	$\lambda = 0.2$	1.274	1.194	1.122	1.058	1	0.948	0.900	0.857	0.817
n	$n' = 0.24$	0.347	0.312	0.284	0.260	0.240	0.223	0.208	0.195	0.183
	$n' = 0.26$	0.376	0.338	0.307	0.282	0.260	0.241	0.225	0.211	0.198
	$n' = 0.28$	0.404	0.364	0.331	0.303	0.280	0.260	0.242	0.227	0.213

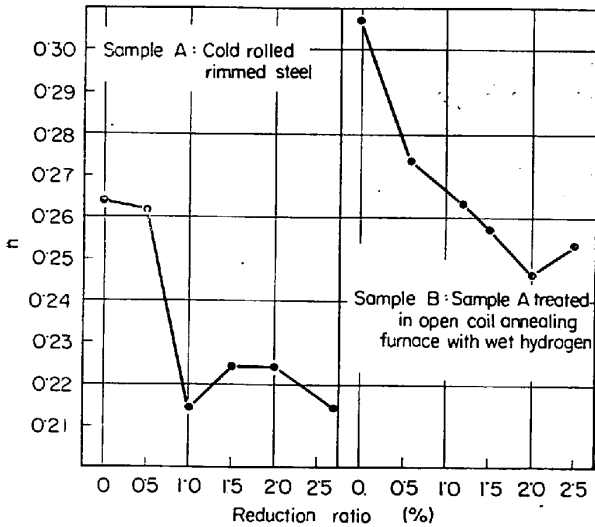


Fig. 4. Change of gradient between $\lambda=0.1$ and $\lambda=0.2$ with temper rolling reduction ratio.

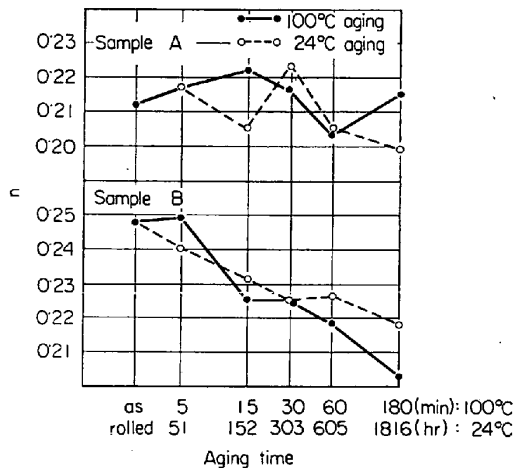


Fig. 5. Change of gradient between $\lambda=0.1$ and $\lambda=0.2$ with aging time.

化は、試料 B については Fig. 1 に示されているような α による変化ときわめて類似した傾向を示し、試料 A では個々のカーブがかなり diffuse している。すなわち試料 A では圧延率によるカーブの変化が一様でなく、同一変形量に対応する応力も圧延率によつてかなり変動し、B にくらべると幅が大きくなっている。しかしいずれの試料でも Fig. 4 に示すように調質圧延率によつて $n^{(nominal)}$ ($\lambda=0.1 \sim 0.2$) は減少していく。以上述べたように試料 A, B では多少調質圧延感受性が異なり、B については予歪付与で説明できるような変化を示すが A では Fig. 1 のようにはならない。この原因は明らかではないが A と B ではカーバイドの存在状態、結晶粒度が異なっていることがその一因になっていると思われる。

3.2 歪時効による変化

上述の試料 A, B を約 1% の調質圧延率で圧下した後室温での自然時効および 100°C での人工時効をほどこした時の時効時間による $\log \epsilon$ vs. $\log \sigma$ の関係の変化を調べた。いずれの試料においても同一変形量に対する応力は時効条件の進行にともなつて上昇し Fig. 3 に示し

たような β による塑性カーブの変化に類似した変化を示す。Fig. 5 におのおののカーブの $n^{(nominal)}$ ($\lambda=0.1 \sim 0.2$) を求め時効によつてこれがどのように変化するかを示す。100°C および 24°C の対応する時効時間は HUNDY の式⁴⁾によつて等価になるように求めた値である。これによると試料 A では $n^{(nominal)}$ ($\lambda=0.1 \sim 0.2$) がパラッキは大きいが時効によつてはあまり変化がなく、試料 B では時効により漸減することがわかる。このように試料 A, B では調質圧延に対するのと同様、歪時効によつても塑性カーブの変化は異なつた挙動を示す。なお歪時効により生ずる窒化物、炭化物などの析出物が塑性変形によつて分解するためにみられるといわれている $\log \epsilon$ vs. $\log \sigma$ カーブ上の折れ点 (knee point)⁵⁾ は今回の実験ではみられなかつた。

4. 結 言

通常の加工硬化指数 $n^{(nominal)}$ は塑性カーブが全く変化していない場合でも、応力軸歪軸に対する平行移動によつてみかけ上変化しうる。したがつてこれに対する補正を考える必要がある。また実際の冷延鋼板について調質圧延、歪時効による塑性カーブの変化を調べたところリムド冷延鋼板およびそれをオープンコイル焼鈍炉で湿水素処理をほどこし脱炭、脱窒したものでは、後者のほうがより論理的に予測される変化に近い変化を示す。

文 献

- 1) 周藤：塑性と加工，4 (1963) 10, p. 611
- 2) 松藤，松本：塑性と加工，5 (1964) 2, p. 113
- 3) 強度データブック，(1962)，p. 249, [裳華房]
- 4) B. B. HUNDY: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 178 (1954), p. 34
- 5) Å TOSEFSSON and B. BACKSTRÖM: Iron & Steel, 39 (1966) 2, p. 43

(184) 応力-歪曲線の近似法について
(鋼板の応力-歪曲線に関する考察—II)

川崎製鉄千葉製鉄所

工博 神崎 文暁・中川吉左衛門
佐々木 徹・野原 清彦

Stress-Strain Curve Fitting of Steel Sheet
(Studies on the stress-strain curve of steel sheet—II)

Dr. Fumiaki KANZAKI, Kichizaemon NAKAGAWA,
Tohru SASAKI and Kiyohiko NOHARA

1. 緒 言

金属材料を塑性変形させた場合の応力-歪曲線 (塑性カーブ) を近似的にあらわす実験式は、これまで種々提唱されている。たとえば $\sigma = a + C\epsilon^n$ [Ludwick], $\sigma = b(\epsilon_0 + \epsilon)^n$ [Swift], $\sigma = a + b(1 - e^{-C\epsilon})$ [Vocè], $\epsilon = (\sigma/E) + \{(\sigma - \sigma_0)/F\}^{1/n}$ [Ramberg] その他があり、歪の小さい領域については $\sigma = Y \tanh(E\epsilon/Y)$ [Prager] の式がある (ここに σ : 真応力, ϵ : 真歪, $a, C, n, b, \epsilon_0, \sigma_0, Y$: const., E : 弾性係数, F : 塑性係数)¹⁾²⁾。鋼板については実際上取扱いに便利な n 乗硬化特性式 $\sigma = C\epsilon^n$ が一般に用いられ、 n を加工硬化指数と称してプレス加工性