

(164) 炭素鋼の機械的性質におよぼす Nb ならびに V の影響

神戸製鋼所, 中央研究所

No. 64326

鈴木 章・金田次雄・新名英司・梶 晴男

Effect of Nb and V on the Mechanical Properties of Plain Carbon Steels.

Akira SUZUKI, Tsugio KANEDA,

Eiji NIINA and Haruo KAJI.

I. 緒言

鋼に Nb を添加するといろいろな有利な性質が得られることはここ数年内外の大きな注目を集めている。Nb は V, Ti, Zr などと同様に C および N に対する親和力が非常に強く, Nb 添加が鋼におよぼす影響は Nb の炭化物または窒化物によるものとされている。炭素鋼においては Nb の効果はその細粒化作用に帰せられているが, 必ずしも細粒化作用で説明できない現象も認められる。この点を検討するため本研究では Nb とこれの類似元素である V が炭素鋼の機械的性質におよぼす影響を, 従来より詳細に調査した。

II. 供試材

100 KVA 塩基性高周波炉 (マグネシヤライニング) を用いて電気炉精製鋼を融解し, これに ferro-Mn および ferro-Si を加えて脱酸した後, Nb, V および Al をそれぞれ ferro-Nb (62%Nb), ferro-V (50%V) および Al 単体の形で単独添加し, 押湯付 100kg 丸型鋳型に注入して供試鋼塊を溶製した。各鋼塊は 1/2 トンエアハンマーによつて 30mm φ (シャルピー衝撃試験), 25mm φ (引張試験), 20mm φ (疲労試験) および 15mm φ (クリープラプチャー試験) に鍛伸し諸試験に供した。Table 1 に 880°C 焼ナラシ処理をほどこした各供試材の化学成分を示す。チャージ No.6 は比較材である。

III. 試験方法

Nb および V による鋼の機械的性質改善は, これらの元素の炭化物または窒化物による細粒化作用と析出硬化作用とによつてもたらされるが, これら 2 つの作用はともに熱処理条件と密接に関連している。また低炭素鋼は普通焼ナラシまたは焼ナマシ状態で使用されるが, 通常のオーステナイト化温度では Nb 化合物が固溶せず, Nb の効果が十分発揮されないと考えられるので, 本研究ではオーステナイト化温度を 880°C から最高 1200°C までとし, 焼ナラシまたは焼ナマシ処理をほどこした後, 機械的性質 (引張試験, シャルピー衝撃試験, 疲労試験, 歪時効性試験, クリープラプチャー試験) と顕微鏡組織 (オーステナイトおよびフェライト粒度) を調査した。

IV. 試験結果ならびに考察

1. オーステナイト結晶粒度

Fig. 1 に一端焼入法によるオーステナイト結晶粒度測定結果を示す。Nb はオーステナイトの粗大化を有効に防止し, Nb 鋼の粗大化温度は Al 鋼よりおよそ 80°C 高くなることが認められた。V 鋼の粗大化温度は Al 鋼より低い, 粗大化温度以上でのオーステナイト結晶粒は Al 鋼より微細である。L. A. ERASMUS は軟鋼における AIN と VN の溶解度積を求めて次式を得ているので, これを本研究の Al 鋼および V 鋼に適用して AIN

$$Al + N \rightleftharpoons AlN \quad \log K_s = -6180/T + 0.725$$

$$V + N \rightleftharpoons VN \quad \log K_s = -6900/T + 2.35$$

および VN の溶けこみ温度を計算すると, V 鋼における VN の溶けこみ温度は 1000°C 付近であり, Al 鋼では AIN の溶けこみ温度は 1100°C 付近である。V 鋼と Al 鋼のオーステナイト粒成長曲線は, それぞれ VN と AIN の溶けこみ温度から予想されるものと一致している。Nb 鋼において  $N_{insol.}$  は 0.0014% であり,  $N_{insol.}$  がすべて NbN であるとすれば NbN としての Nb は全 Nb 量の 23% となり残りを NbC であるとすれば, NbC は量的に NbN の 3 倍以上存在することになるので, Nb 鋼の grain refiner はおそらく NbC であろう。

2. 引張試験

900~1200°C の各温度に 2 hr 保持した後焼ナラシまたは焼ナマシ処理をほどこし, 常温において引張試験 (JIS 4号 12mm φ, 引張速度は毎分 5mm) をおこなった。Fig. 2 に試験結果を示す。

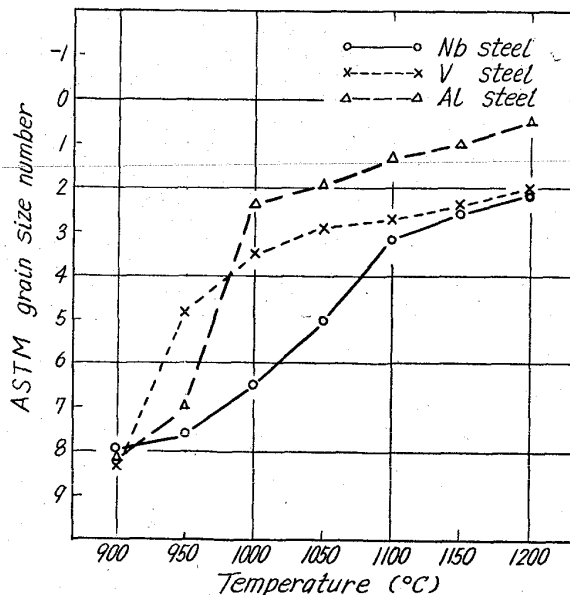


Fig. 1. Austenite grain coarsening curves.

Table 1. Chemical composition of steels tested. (%)

Steel No.	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Al	ΣN	Nsol.	Ninsol.
No.1 (Nb steel)	0.24	0.29	0.55	0.005	0.006	0.04	—	0.002	0.0076	0.0062	0.0014
No.4 (V steel)	0.25	0.27	0.54	0.005	0.006	—	0.109	0.004	0.0070	0.0022	0.0048
No.6 (Al steel)	0.24	0.33	0.59	0.006	0.006	—	—	0.022	0.0090	0.0079	0.0011

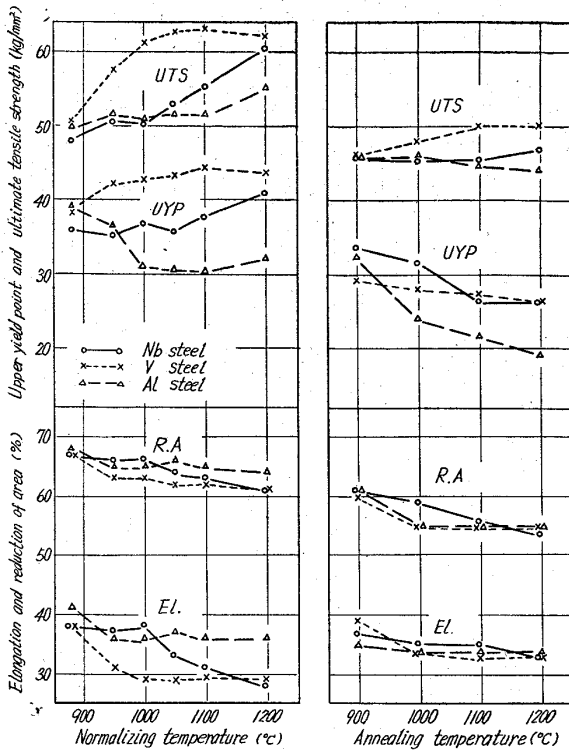


Fig. 2. Variation of tensile properties with austenitizing temperature.

焼ナラシ状態の降伏点では、Al 鋼が 1000°C まで急激に低下するのに対し、Nb 鋼は 1050°C までほぼ一定で 1100°C 以上で増加しており、V 鋼は 950°C で急激に増加しこれ以上ではほぼ一定になっている。このため 1000°C 以上では Al 鋼の降伏点に比して V 鋼で約 12 kg/mm<sup>2</sup> 以上、Nb 鋼で 5 kg/mm<sup>2</sup> 以上高くなっている。焼ナラシ状態の降伏点は 900°C では V 鋼がやや低く Nb 鋼と Al 鋼とは差がないが、焼ナラシ温度の上昇とともに降伏点が低下する傾向は Nb 鋼、V 鋼とも Al 鋼に比してかなり小さい。

鉄鋼の降伏応力は Hall-Petch の関係式で表わされる。σ\*は熱的に活性化された Peierls-Nabarro 応力の

$$\sigma = \sigma^*(T, \dot{\epsilon}) + \sigma_{\mu}(\text{st.}) + kd^{-1/2} \dots \dots \dots (1)$$

克服を表わし、試験温度  $T$  と歪速度  $\dot{\epsilon}$  に依存する。σ<sub>μ</sub> は温度依存性のない成分で固溶 C+N 量、析出物などに関係し、せん断弾性係数 μ に比例する。k は降伏応力を平均フェライト粒直径の平方根の逆数 ( $d^{-1/2}$ ) に対してプロットして得られる直線の勾配であり、その意味はまだ明らかにされていない。Fig. 3 は焼ナラシ処理材の下降伏点とフェライト粒度 ( $d^{-1/2}$ ) との関係を示すものである。Al 鋼は Hall-Petch の式にしたがうが、Nb 鋼および V 鋼では臨界点 P より大きいフェライト粒 (すなわち焼ナラシ温度の高いところ) では Hall-Petch の関係より上方へずれている。この現象は (1) 式において σ<sub>μ</sub> が増加したことを意味する。なぜならば本研究では引張試験温度および引張速度は一定であるから σ\* は一定であり、k もオーステナイト化温度の変化によって大きく変化するとは考えられないからである。Nb および V が σ<sub>μ</sub> を増加する機構は次のように考えられる。オーステナイトに固溶した Nb および V は、 $\gamma \rightarrow \alpha$  変態時に

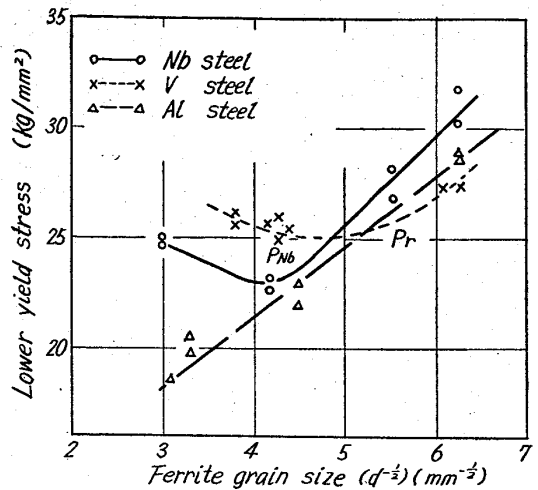


Fig. 3. Variation of lower yield stress with  $d^{-1/2}$  for annealed materials.

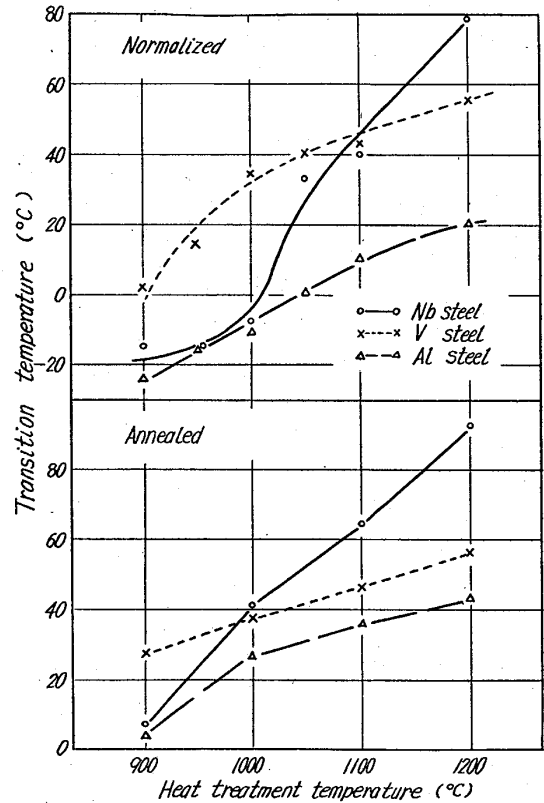


Fig. 4. Variation of charpy impact transition temperature (50% energy criterion) with heat treatment temperature.

フェライト格子と coherent な炭化物または窒化物として析出するか、またはフェライト中に固溶して C, N と強力な化学的相互作用を有する cluster (pre-precipitation) となるため、転位運動に対して重大な障害となり σ<sub>μ</sub> を増加せしめる。

3. シャルピー衝撃試験

各供試材とも 900~1200°C の種々なる温度に 2 hr 保持した後焼ナラシまたは焼ナラシ処理をおこない、JIS 4号シャルピー衝撃試験片を作製した。衝撃遷移温

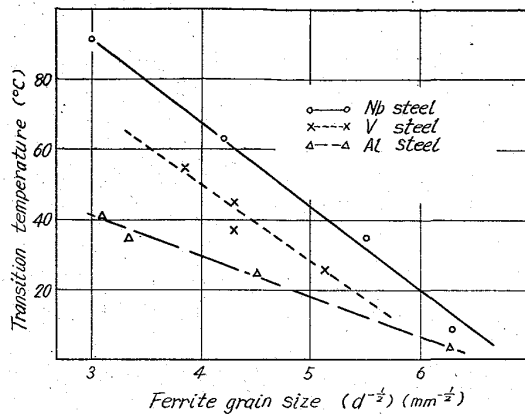


Fig. 5. Variation of Charpy impact transition temperature (50% energy criterion) with  $d^{-1/2}$  for annealed materials.

度曲線は  $-80 \sim +150^\circ\text{C}$  の間で求めた。Fig. 4 に衝撃遷移温度 (50% エネルギー) と熱処理温度との関係を示す。遷移温度に熱処理温度の上昇とともに上昇するがこの傾向は焼ナラシ処理の方がやや大きい。焼ナラシ状態の遷移温度をみると、V鋼はすべての焼ナラシ温度において Al 鋼より  $20 \sim 40^\circ\text{C}$  だけ高温側にあるが、Nb 鋼は  $1050^\circ\text{C}$  から急激に上昇している。焼ナマシ状態では V 鋼の遷移温度は  $900^\circ\text{C}$  で Al 鋼より約  $25^\circ\text{C}$  高く  $1000^\circ\text{C}$  以上では差が小さくなっているのに対し、Nb 鋼は  $1000^\circ\text{C}$  以下では Al 鋼とほとんど差がなく  $1100^\circ\text{C}$  以上で急激に高くなっている。Fig. 5 は焼ナマシ材の遷移温度をフェライト粒度 ( $d^{-1/2}$ ) に対してプロットしたものである。Petch によれば遷移温度  $T_c$  は次式で表わ

$$mT_c = \sigma_\mu(\text{st.}) + C_1 - C_2d^{-1/2}$$

される。  $C_1$  および  $C_2$  は定数であり、  $m$  は (1) 式において温度依存性の成分  $\sigma^*$  の温度係数である。前項でのべたごとく、フェライト中の微細析出物となつた Nb および V は  $\sigma_\mu$  を増加させるので遷移温度を上昇せしめる。また Nb 鋼および V 鋼の遷移温度のフェライト粒度依存性は Al 鋼より大きい、これは Nb 鋼、V 鋼の組織に認められる数百～数千 Å の析出物が転位の発生源となり、  $m$  (降伏点の温度依存性) を小さくするためと考えられる。

#### 4. 疲労試験

各供試材とも  $1000^\circ\text{C}$  焼ナラシならびに焼ナマシ状態で小野式回転曲げ疲労試験 (平滑および切欠) を実施した。疲労限の引張強サに対する比率は Nb 鋼が焼ナラシ焼ナマシとも Al 鋼よりかなり高いが、V 鋼は焼ナラシ状態でのみ Al 鋼よりすぐれている。また Nb 鋼の切欠係数は最も小さく、ついで V 鋼、Al 鋼の順となっており、Nb は鋼の耐疲労性改善に有効であることが認められた。

#### 5. 歪時効性試験

$900 \sim 1200^\circ\text{C}$  焼ナラシ状態の Nb 鋼および Al 鋼の歪時効性を引張試験による方法 (5% 予歪後  $100^\circ\text{C}$  で加速時効処理) で調査した。Table 2 に歪時効指数が 10% になる時効時間を示す。Al 鋼の歪時効性は  $900^\circ\text{C}$  では小さく  $1000^\circ\text{C}$ 、 $1200^\circ\text{C}$  で大きくなっているが、

Table 2. Strain ageing sensitivity of Nb- and Al-steel.

Normalizing temperature ( $^\circ\text{C}$ )	Strain ageing time at $100^\circ\text{C}$ corresponding to ageing index=10% (min)	
	Nb steel	Al steel
900	2	60
1000	2	4
1200	150	2

Table 3. 1000 hr creep rupture strength at  $450^\circ\text{C}$  (extrapolated).

	Nb steel	V steel	Al steel
Normalized at $900^\circ\text{C}$	$16.6 \text{ kg/mm}^2$	$22.8 \text{ kg/mm}^2$	$14.0 \text{ kg/mm}^2$
Normalized at $1200^\circ\text{C}$	26.9 "	25.1 "	19.2 "

Nb 鋼では  $900^\circ\text{C}$ 、 $1000^\circ\text{C}$  で大きく  $1200^\circ\text{C}$  では小さくなっている。

#### 6. クリープラプチャー試験

$900^\circ\text{C}$  および  $1000^\circ\text{C}$  焼ナラシ材のクリープラプチャー試験 ( $450^\circ\text{C}$ ) をおこなつた。Table 3 に 1000 hr の破断強度 (外挿値) を示す。  $1200^\circ\text{C}$  で焼ナラシした Nb 鋼および V 鋼のラプチャー強度は Al 鋼に比して非常に高く、とくに V 鋼は  $900^\circ\text{C}$  焼ナラシでも Al 鋼より約  $9 \text{ kg/mm}^2$  高い。

### V. 結 言

本研究の目的は、少量の Nb ならびに V 添加が低炭素キルド鋼の諸性質におよぼす影響を、Al と比較しつつ調査することであつたが、次の点を確認した。

1. Nb オーステナイトならびにフェライトの grain refiner として非常に有効である。
2. Nb による鋼の強度増加は降伏点に顕著であり、熱処理温度が比較的低いときは結晶粒微細化により、 $1100^\circ\text{C}$  以上の高温熱処理では析出硬化による。
3. V の強度増加効果は主として析出硬化により、Nb より低い熱処理温度であらわれる。
4. 析出硬化によつて鋼の降伏点を上昇せしめる状態の Nb および V は、鋼の衝撃遷移温度を上昇せしめる。
5. Nb の歪時効防止効果は、焼ナラシ温度が  $1000^\circ\text{C}$  以下のときは Al より劣っている。
6. Nb および V は疲労強度ならびに高温強度に対してよい結果をもたらす。

### 文 献

- 1) W. B. MORRISON: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), Apr., (1963), p. 317~325
- 2) L. A. ERASMUS: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), Feb., (1964), p. 128~134
- 3) L. A. ERASMUS: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), Jan., (1964), p. 32~41