

© 1988 ISIJ

論 文

Nb, V 含有鋼の高温延性におよぼす炭窒化物
と初析フェライトの影響

中 田 等*・安 中 弘 行*

Influence of Carbo-Nitride and Proeutectoid Ferrite on
Hot Ductility of Nb, V Containing Steel

Hitoshi NAKATA and Hiroyuki YASUNAKA

Synopsis :

Surface crack which occurs in unbending process during continuous casting, was investigated by hot tensile test mainly at 750°C in relation to Nb, V carbo-nitride and proeutectoid ferrite in Nb, V containing steels.

Amount of dynamically precipitating carbo-nitride has close relation to the value of load integration which was newly introduced parameter.

Surface crack sensitivity grows higher as the parameter becomes larger because more Nb, V carbo-nitrides precipitate at grain boundary and intercrystalline, which leads to the increase of total amount of precipitates.

Thin Proeutectoid Ferrite around austenite grain boundaries was observed when deformation was introduced at 750°C, and the ferrite also increased crack sensitivity.

To avoid surface cracks in continuous casting, reducing the number and zone length of unbending points is effective because load integration value decreases. Furthermore, surface crack sensitivity can also be improved when the temperature at unbending is higher than 950°C because the amount of Nb, V carbo-nitride becomes less and ferrite precipitation does not occur.

Key words : continuous casting ; unbending ; surface crack ; carbo-nitride ; proeutectoid ferrite ; hot tensile test.

1. 緒 言

近年省エネルギー、省工程などコストダウンを図るため連続鋳造、熱間圧延の直結化技術を確立することが重要な項目の一つとなっている。この技術を確立するためには、連続鋳造段階で無欠陥鋳片を製造することが必要である。特に表面割れは後工程で重大欠陥となる可能性が高く、表面割れを防止することが重要となる。

表面割れは主として連鋳鋳片の矯正過程で生じ、各鋼種に特有な脆化温度域で歪み速度が小さい場合に割れ感受性が高くなることが知られている¹⁾。従来、矯正方法は内部割れ防止の観点より矯正回数を増し、凝固シェルの1回あたりの歪み速度を低くする方法が採用されていた。しかし、最近になつて表面割れに関してはこの矯正方法は有利ではないことが知られるようになったが²⁾、割れ発生におよぼす矯正方法の影響についてはこれまでに十分解明されてはいない。

そこで本研究では、表面割れにおよぼす矯正回数、矯正ゾーン長の影響を明らかにするため、高温引張試験機と加工フォーマスターを用い、表面割れ感受性の高いNb, V含有鋼の高温延性と析出物および初析フェライトの関係について調査した結果を報告する。

2. 実 験 方 法

引張試験片は厚み 230 mm、幅 1770 mm のスラブ実鋳片表層下 20 mm の位置からデンドライトに垂直方向に採取した。Table 1 に供試鋼の組成を示す。引張試験片のサイズは平行部の直径 8 mm、長さ 160 mm であり、この試験片を容量 10 t の引張試験機に装着して試験を

Table 1. Chemical composition of steel investigated (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Al	V	Nb	N
0.10	0.27	1.56	0.002	0.002	0.027	0.06	0.035	40 ppm

昭和 62 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 10 月 23 日受付 (Received Oct. 23, 1987)

* (株)神戸製鋼所 材料研究所 (Materials Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakino-hama-cho Chuo-ku Kobe 651)

行つた。本装置はプログラムコントロールにより試験片の温度、歪み量、荷重の制御が可能である。温度は試験片に溶着させた Pt-Pt/Rh 熱電対により測定し、設定された熱履歴どおりプログラム制御をおこなう。荷重は引張試験機上部に設置されたロードセルにより検知され、プログラム設定により熱サイクルと同時に試験片に引張り、および圧縮の荷重を与え、荷重応力制御または歪み制御をおこなうことが可能である。また試験片は真空または不活性ガス雰囲気下の加熱冷却が可能な雰囲気調整用チャンバー内に装着されている。

試験片は室温から $10^{\circ}\text{C}/\text{s}$ の昇温速度で 1300°C まで加熱し、10 min 保持し、溶体化処理を行つた後、 $5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ の冷却速度で試験温度まで冷却し、2 min 保持した後各種試験を行つた。試験温度については本鋼種で最も延性値（絞り値）が低くなる 750°C での試験を主として行つた。

加工条件を Table 2 に示す。延性におよぼす矯正回数の影響を調査するために 3 段引張りから 9 段引張りの試験を行い、さらに矯正ゾーン長の影響を調査するために Table 2 中に示す 1 回の保持時間 B を 50 s と一定にして、加工時間 A を 1~100 s まで変化させた試験（歪み速度 $\dot{\epsilon}=2\times 10^{-2}\sim 2.2\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ ）および加工時間 A

を 50 s と一定にして保持時間 B を 5~300 s に変化させた試験を主として行い A, B 両者を同時に変化させた試験も一部行つた。

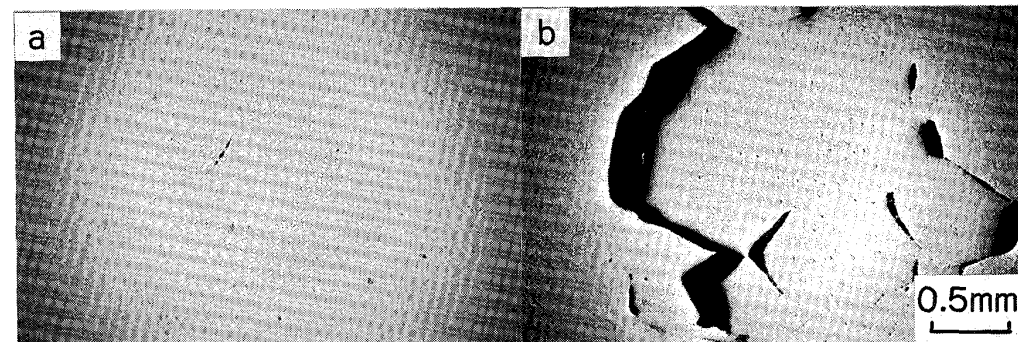
割れの発生程度は試験片中央部縦断面の 25 倍の写真を撮影し、その視野の面積 S_0 に存在する割れ部分の面積 S から $S/S_0\times 100(\%)$ で定義し、この割れの面積率で評価を行つた。

加工中に析出する Nb(CN), V(CN) およびフェライトについては、同様の熱履歴、および加工条件で加工フォーマスターを用いて試験した後、試験片に水をかけることによつて急冷し、組織、析出物を凍結させた状態で調査を行つた。ただし、加工フォーマスターの場合試験片形状が引張試験片と比べて異なり、付加歪み量を一定にするため全体の加工量は 2.7 mm にしている。これはゲージ長さが引張試験片の場合 15 mm であるのに対し加工フォーマスターの試験片の場合は 13.5 mm であるためである。初析フェライトについては光学顕微鏡による観察、炭窒化物となつている Nb, V の量については抽出残渣を採取することにより決定し、析出状態は抽出レプリカにより観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 延性状態と析出物量の関係

Photo. 1 に 3 段引張りりと 9 段引張りの引張試験片内部の割れ発生状態の差を示す。両者は共に 1 回の加工時間は 50 s、試験時間は 900 s、引張量は 3 mm である。Photo. 1 から 9 段引張りの場合は 3 段の場合に比較して割れ発生程度が大きくなつていことがわかる。またこの割れはオーステナイト粒界に沿つている。この場合両者とも平均の歪み速度は $2.2\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ であるが、1 回の変形に要する歪み速度は、3 段引張りの場合 1.33×10^{-3} 、9 段引張りの場合は $4.4\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ で前者の歪み速度は後者の歪み速度の 3 倍になつている。



a ; Number of deformation : 3, A : 50s, B : 250s b ; Number of deformation : 9, A : 50s, B : 50s.

Photo. 1. Influence of condition of deformation on state of crack growth tested in the pattern shown in Table 2 at 750°C .

Photo. 1 の結果は、この温度領域の脆化が歪み速度が小さくなるほど著しくなるという従来の報告¹⁾と一致することを示している。

歪み速度が Nb(CN), V(CN) の析出物量におよぼす影響を Fig. 1 に示す。試験片に与えた加工量は 2.7 mm と一定であり、連続的な圧縮を与えている。横軸には歪み速度、縦軸には炭窒化物となつている Nb の量を示しており、試験片より抽出残渣をとることにより求めた。

Fig. 1 より歪み速度が小さいほど析出物量が増大することがわかる。これらの析出物は旧オーステナイト粒界、および粒内に析出し、延性を低下させる原因となる。すなわち歪み量が一定で多段引張りを行った場合1回の加工に要する歪み速度が大きいほど割れ感受性は低減されると考えられる。

いつばう Nb(CN), V(CN) は動的析出することが知られている³⁾。この動的析出量がどのようなパラメーターで一義的に決定できるかを調査するためにまず加工時間との関係を調査した。結果を Fig. 2 に示す。1回の加工時間が 50 s と一定の場合でも析出物量は 0.005~0.027% の広範囲にばらついており、1回の加工時間が同じで保持時間が短い場合は析出物量は少なく、保持時間が長い場合は析出物量は多い。以上の結果から析出

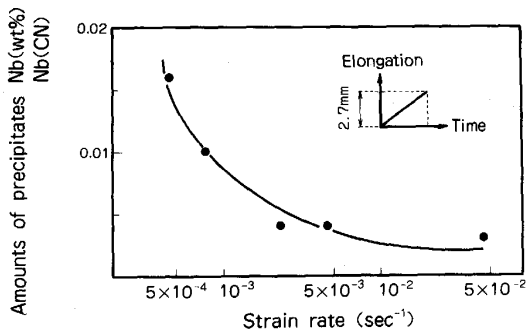


Fig. 1. Relation between strain rate and amounts of niobium precipitates.

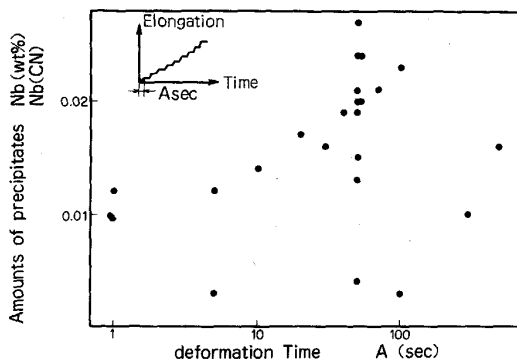


Fig. 2. Relation between deformation time (A) and amounts of niobium precipitates.

物量は単に加工時間のみに依存しないことがわかり、保持時間中にも動的析出を起こしていると考えられる。

Fig. 3 に引張試験での荷重曲線の一例を示す。Fig. 3 に示すように保持時間中にも荷重は緩和せず、この荷重で動的析出が生ずる²⁾。また試験時間が長くても、圧縮量が小さい場合は動的析出物量は少ない。以上のごとく動的析出物量は加工時間のみに依存しないことがわかる。

一般に歪みを付加すれば粒界での界面エネルギーが高くなるために核生成頻度が増大し、粒界に Nb(CN), V(CN) が不均質核生成しやすくなる。また結晶粒内に転位が導入され、この箇所にも析出が生じ、この核生成頻度は付加歪み量、すなわち荷重が増大すれば大きくなると考えられる⁴⁾。また析出物量は核生成頻度に時間をかけた量に比例すると考えられるので、動的析出物量を規定するパラメーターとして、引張試験における時間軸と荷重曲線の間で囲まれた部分の面積、すなわち荷重時間積分値を導入した。荷重時間積分値は引張量が一定の場合、歪み速度が大きく短時間の場合と歪み速度が小さく長時間の場合を比較すると後者のほうが値が大きくなる。これは後者のほうが荷重が若干小さくなるが、時間

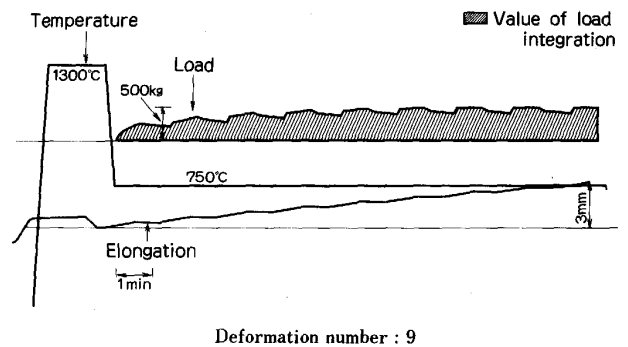


Fig. 3. Example of value of load integration.

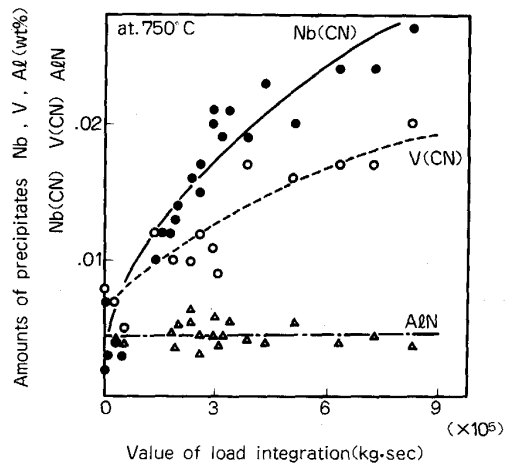
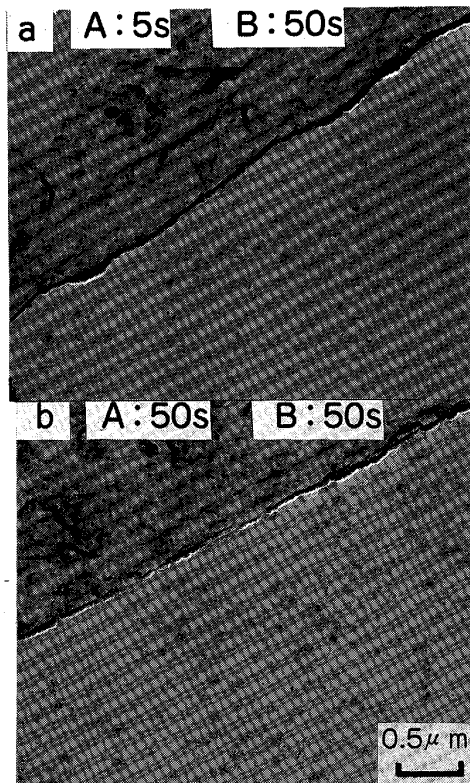


Fig. 4. Relation between value of load integration and amounts of precipitates Nb, V, Al.

の項が大きく影響しており 750°C では保持時間内でも荷重が十分緩和しないため後者のほうが積分値が大きくなると考えられる。Fig. 3 中に荷重時間積分値に対応する量を斜線で示す。

Fig. 4 に各種試験条件における荷重時間積分値と Nb(CN), V(CN) となつている Nb, V の量, および窒素と結合している Al 量との関係を示す。Fig. 4 より動的析出量は荷重時間積分値で一義的によく整理できることがわかる。また Nb(CN), V(CN) は荷重時間積分値が増加すれば動的析出を起こし, 増大する。この傾向は特に Nb(CN) において著しく, 荷重時間積分値が 9.0×10^5 kg·s になれば加工を与えない時に比較して析出物量は 0.005% から 0.027% と約 5.5 倍となつている。本鋼種において V の含有量が Nb の含有量より多いにもかかわらず V(CN) が Nb(CN) よりも動的析出量が少ないのはオーステナイト中への V(CN) の固溶限が Nb(CN) よりも大きいためであると考えられる⁵⁾。

いつぼう AlN 量は荷重積分値が増大してもほとんど変化がないことがわかつた。このことについては明確で



Value of load integration; a: $W = 1.75 \times 10^5$ (kg·s)
b: $W = 3.0 \times 10^5$ (kg·s)

a; Number of deformation: 9, A: 5s, B: 50s
b; Number of deformation: 9, A: 50s, B: 50s

Photo. 2. Influence of condition of deformation on state of precipitates at austenite grain boundary tested in the pattern shown in Table 2.

はないが AlN の析出が早く 750°C ですでに終了しているためであると考えられる。

Photo. 2 に荷重時間積分値が大きい場合 ($W = 3 \times 10^5$ kg·s) と小さい場合 ($W = 1.75 \times 10^5$ kg·s) のオーステナイト粒界周囲の初析フェライト内の抽出レプリカを示す。荷重時間積分値が大きい場合のほうが析出物数が多くなつている。析出物の大きさは直径約 5~10 nm であり, 析出物サイズは両者共ほぼ同じである。したがって析出物は本実験での保持時間中には肥大していないことがわかつた。またこれらの析出物はエネルギー分散型 X 線分析および電子線回折の結果より Nb(CN), V(CN) であることが確認された。

Fig. 5 に Table 2 に示した各種条件で引張試験を行った場合の試験片内部の割れ発生程度と Nb(CN), V(CN) 析出物の総量との関係を示す。縦軸には試験片断面の割れの面積率を示す。析出物量が増大すると急激に

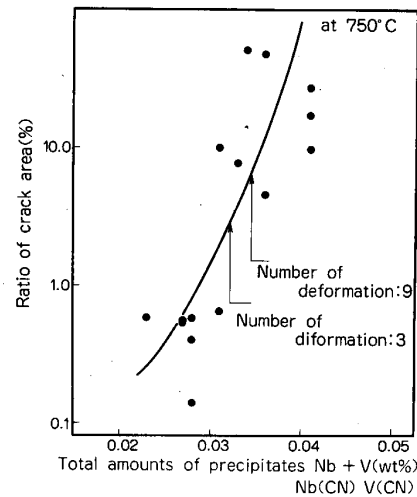


Fig. 5. Relation between total amounts of precipitates and ratio of crack area.

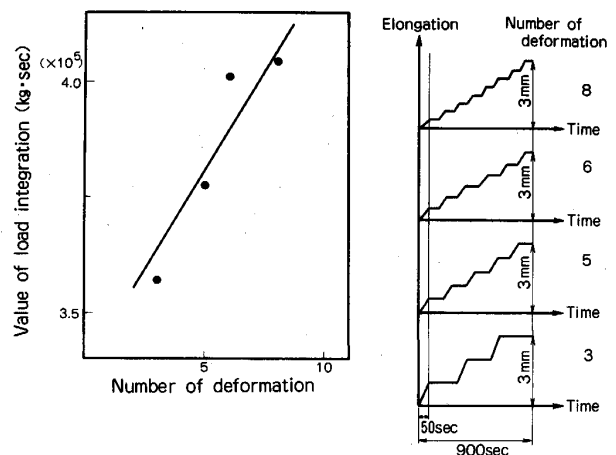


Fig. 6. Relation between number of deformation and value of load integration.

割れ発生程度が大きくなることわかる。これは析出物が粒界、粒内に数多く析出すれば、粒界析出物は応力集中の起点となつたり、これら析出物をもとにしてポイドが容易に連結し割れ感受性を高めるためであると考えられる。また粒内の析出物は粒内に分散して粒自身の強度を高めるとともに粒界への応力集中を助長するため割れ感受性を高める。以上の結果より荷重時間積分値と動的析出物量および割れ発生程度とは一義的な関係にあることがわかる。

Fig. 6 に引張回数と荷重時間積分値との関係を示す。

この場合は全体の試験時間を同じとしているため実操業においては、鑄造速度、矯正ゾーン長が同一の場合に矯正点数を変化させた時に相当し、その場合の荷重時間積分値の変化を示していることになる。同一歪み量、同一試験時間の場合引張回数が減れば1回あたりの保持時間は長くなり、この間に荷重の緩和が生じる。また歪み

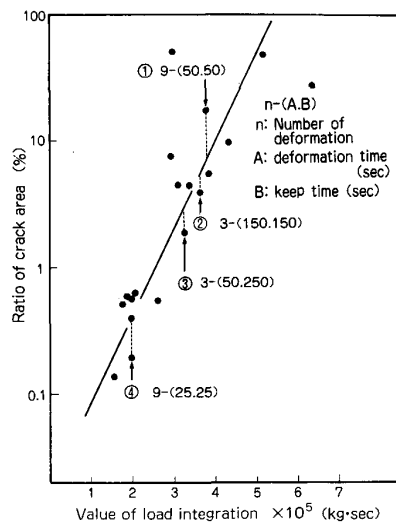
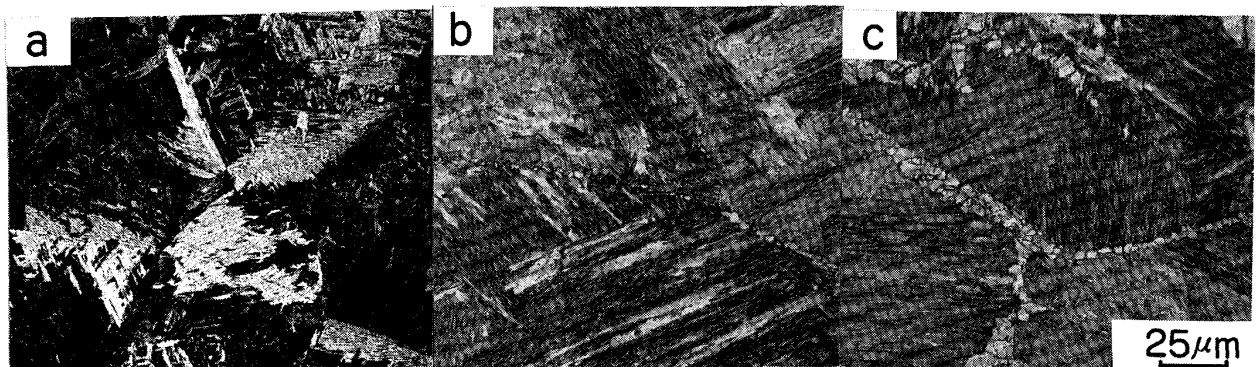


Fig. 7. Relation between value of load integration and ratio of crack area.

速度の上昇による荷重レベルの上昇はわずかであるため荷重緩和により全体の荷重時間積分値が減少する。この傾向は荷重緩和が起りやすい高温域ではより顕著になると考えられる。したがって、矯正点数が増加すれば荷重時間積分値は直線的に増大していることを示している。この結果より矯正点数が多くなるほど荷重時間積分値が増大し、Fig. 4 に示したように動的析出物量が増大する結果、割れ感受性が高くなると考えられる。よつて表面割れを防止するためには矯正点数を減少させることが有効であると考えられる。

さらに引張回数を一定にして Table 2 に示す加工時間 A および保持時間 B を変化させて調査を行った。この場合は実操業において矯正点数が同じで矯正ゾーン長が変化した場合、あるいは矯正ゾーン長が同じで鑄造速度が変化した場合に相当している。例えば鑄造速度および矯正点数が一定で矯正ゾーン長が 1/2 になつた場合、Table 2 に示す加工時間 A および保持時間 B がおのの 1/2 になると仮定した場合、同じ 9 段引張りで $A=50$ s, $B=50$ s (試験時間 900 s, 歪み速度 $\epsilon=4.4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) の場合の荷重時間積分値は $3.8 \times 10^5 \text{ kg}\cdot\text{s}$ であるのに対して、 $A=25$ s, $B=25$ s (試験時間 450 s, $\epsilon=8.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) の場合は $1.95 \times 10^5 \text{ kg}\cdot\text{s}$ となる。動的析出物量も前述のごとく、荷重時間積分値の増大とともに増加するため、割れ発生程度はおのの Fig. 7 に示すように 8% と 0.4% となると推定される。よつて矯正ゾーン長を短くして、鑄造速度を増大させることも表面割れの低減に大きな効果があると考えられる。

Fig. 7 に荷重時間積分値と割れ発生程度との関係をまとめて示す。図中には代表的な 4 点が示してあり、矯正回数が割れ発生程度に与える影響については図中①、②の比較 (1回の加工での歪み速度が変化しないと考えられる場合)、および①、③の比較 (1回の歪み速度が矯



Value of load integration; a: $W=0$ b: $W=1.75 \times 10^5 \text{ kg}\cdot\text{s}$ c: $W=4.3 \times 10^5 \text{ kg}\cdot\text{s}$
Thermal condition: R.T. $-10^\circ\text{C}/\text{s} \rightarrow 1300^\circ\text{C}$ (2 min) $-5^\circ\text{C}/\text{s} \rightarrow 750^\circ\text{C}$ (2 min) \rightarrow deformation

Photo. 3. Relation between value of load integration and morphology of ferrite at austenite grain boundary.

正点数が 1/3 になれば 3 倍になると考えられる場合) で与えられる。また矯正ゾーン長の影響については①, ④の比較で与えられる。

3.2 各種加工条件と動的析出フェライト

Photo. 3 に荷重時間積分値とオーステナイト粒界の初析フェライトの析出状態の関係について示す。試験温度は 750°C で平衡状態図では A_3 変態点以下である。荷重時間積分値が 0 の場合、すなわち加工を与えない場合ではオーステナイト粒界にフェライトは析出していないことがわかり、加工を与えることによつてはじめてオーステナイトが認められる。このことは従来から報告されているように⁶⁾、 A_3 点の温度で変形させることによつて変態が促進されたものであると考えられる。Photo. 3 からわかるように荷重時間積分値が 1.75×10^5 kg·s と小さい場合、フェライトの析出へ認められるものの粒界に細かく分断した形で析出している。いつぼう荷重時間積分値が 4.3×10^5 kg·s と大きい場合フェライトは粒界に薄く連結した形状で析出しており、このような場合に応力集中が粒界に生じやすく、割れ感受性が高

くなる⁷⁾。

よつて組織の面からも荷重時間積分値が大きくなるとオーステナイト粒界にフェライトが薄く析出し、動的析出物量の増大とともに割れ感受性を高めると考えられる。

3.3 温度と析出物量および初析フェライトの関係

Fig. 8 に温度と Nb(CN), V(CN) 析出量の関係を示す。加工条件は一定であり、この場合 9 段加工で 1 回の加工時間および保持時間も 50 s である。温度が高くなるにしたがつて Nb(CN), V(CN) の析出物量は減少することがわかる。Nb(CN) は 950°C 以上になると急激に減少し、V(CN) については 900°C 以上ではほとんど析出していない。これはオーステナイト中への V(CN) の固溶限の方が Nb(CN) の固溶限より大きいためであると考えられる。

Photo. 4 には温度と初析フェライトの関係について示す。加工条件は Fig. 8 と同様 9 段加工で 1 回の加工時間、保持時間はともに 50 s である。780°C ではフェライトは粒界に薄く析出しているのに対し、820°C では

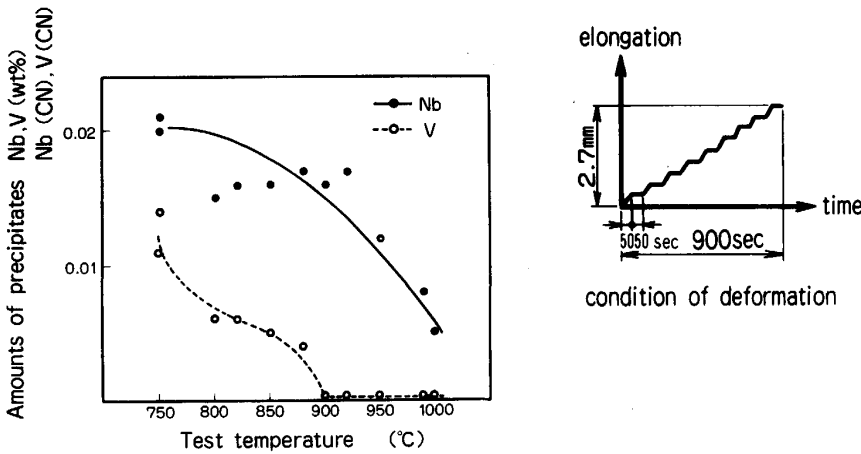
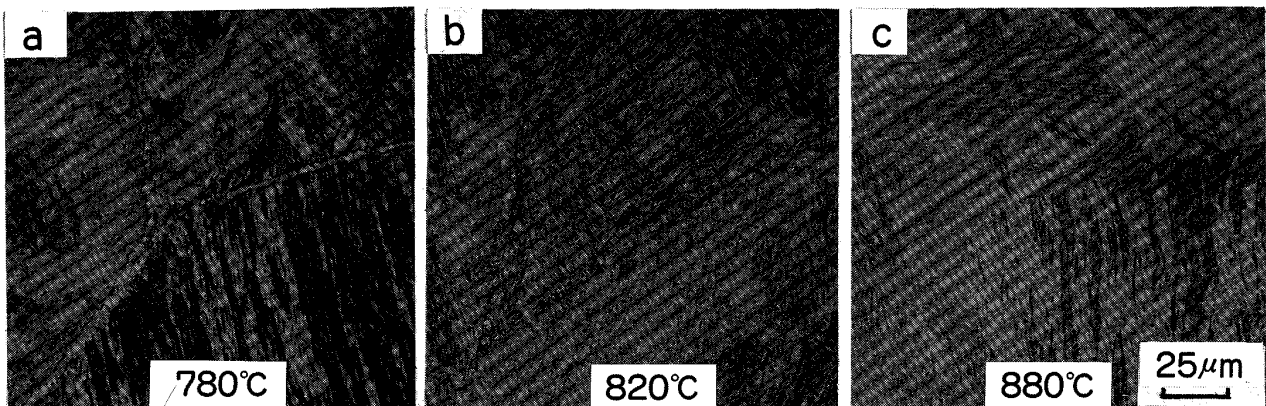


Fig. 8. Relation between test temperature and amounts of niobium and vanadium precipitates.



Number of deformation : 9, A : 50s, B : 50s

Thermal condition : R.T. \rightarrow 10°C/s \rightarrow 1 300°C (2 min) \rightarrow -5°C/s \rightarrow test temperature (2 min) \rightarrow deformation

Photo. 4. Relation between test temperature and morphology of proeutectoid ferrite at austenite grain boundary tested in the pattern in Table 2.

粒界に細かく分断している。いつぼう 880°C では加工を与えているにもかかわらずフェライトの析出は認められない。この鋼種の A₃ 変態点は平衡状態図より約 870°C であり、加工を与えることによりフェライトの析出温度は、平衡状態図より求められる A₃ 変態点まで上昇すると考えられる。

よつて鑄片矯正時の温度を 950°C 以上にすれば、Nb (CN), V (CN) の動的析出量も少なく、さらにオーステナイト粒界周囲にフェライトも動的析出せず割れ発生防止に有効であると考えられる。

3.4 750°C で加工を与えた時の炭窒化物の析出挙動

加工を与えた時の炭窒化物の析出に関して若干の考察を加える。今単位面積、単位時間あたりの炭窒化物の核生成頻度を I とする。 I は試験中に試験片に作用する応力あるいは歪みにより変化し、これらの値が大きくなれば I も大きくなる。本試験の場合、荷重時間積分値を試験時間で割った平均荷重はほぼ一定であるので簡単のために I は一定であると仮定する。 t を試験時間、 Δt を試験時間を n 個に微小分割したものと考えると、 Δt 時間での析出物数 Δn は次式で与えられる。

$$\Delta n \propto I \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots (1)$$

荷重時間積分値は (1) 式の右辺を積分した量に相当すると考えられ析出物数と非常に関係が深いことがわかる。

いつぼう析出物の成長速度は Ostwald の Ripening の理論により (2) 式で与えられる⁸⁾⁹⁾。

$$r_t^2 = r_0^2 + K \cdot t' \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで r_t は時間 t' での粒子半径、 r_0 は析出時の粒子半径、 K は定数である。

時間 $t - \Delta t$ から t までに析出する析出物数は $I \cdot \Delta t$ で、これらの析出物の試験時間終了までの粒成長に要する時間は Δt で与えられる。よつてこの間の析出物量 ΔP は

核生成頻度と成長速度を考慮して (3) 式で与えられる。

$$\Delta P \propto I \cdot \Delta t \cdot (r_0^2 + K \cdot \Delta t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

同様に加工開始時 $t=0$ から Δt までに生じた $I \cdot \Delta t$ 個の析出物は成長時間が t であるからこの間の析出物量は (4) 式で与えられる。

$$\Delta P \propto I \cdot \Delta t \cdot (r_0^2 + K t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

よつて核生成頻度と成長速度の両方を考えた場合の全体の析出物量は (5) 式のようになる。

$$\begin{aligned} P &\propto I \cdot \Delta t (r_0^2 + K t) \\ &+ I \cdot \Delta t \{ r_0^2 + K (t - \Delta t) \} \\ &\vdots \\ &+ I \cdot \Delta t \{ r_0^2 + K (2 \Delta t) \} \\ &+ I \cdot \Delta t \{ r_0^2 + K \cdot \Delta t \} \\ &= r_0^2 I \cdot t + K \cdot I (\Delta t)^2 \cdot \frac{1}{2} n(n+1) \end{aligned}$$

ただし

$$n = \frac{t}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで Δt を 0 に近づけると析出物量 P は (6) 式で与えられる。

$$P \propto r_0^2 I \cdot t + \frac{1}{2} K \cdot I \cdot t^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式の右辺の第一項目は核生成によつて生じた析出物量に対応し、第二項目は粒子の成長に対応する析出物量である。定数 K の値は静的な成長の場合と動的な成長の場合とで値が異なり、WEISS ら¹⁰⁾ によれば前者の場合 $3.8 \times 10^{-2} \text{ nm}^3/\text{s}$ であり、後者の場合は $140 \text{ nm}^3/\text{s}$ となり、動的成長の場合のほうが大きくなると報告して

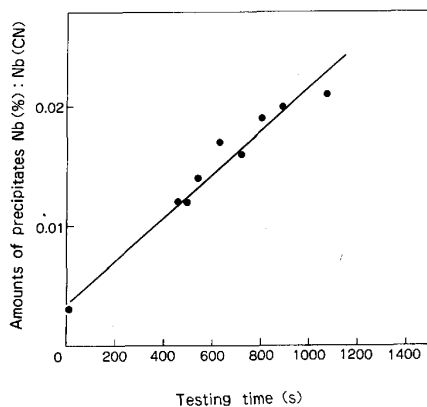


Fig. 9. Relation between amounts of niobium carbide-nitride precipitates and testing time.

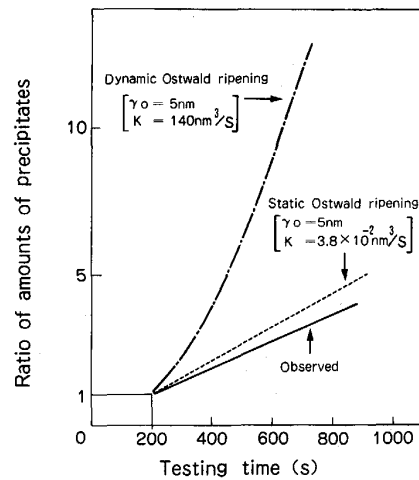


Fig. 10. The dependence of amounts of precipitates on time during dynamic coarsening compared with the expected dependence for static coarsening and observed value.

いる。また Nb, V 含有鋼について動的析出による微細析出物のサイズについてはこれまで多くの報告があり^{10)~12)}、約 5 nm から 10 nm の大きさである。これらの値と(6)式を用いて時間と析出物量の関係を調べた。Fig. 9 に時間と析出物量の関係を示す。また Fig. 10 に静的な粒成長と動的な粒成長が生じる場合の析出物量を(6)式を用いて計算した結果を示す。ただし r_0 の値は 5 nm を使用し、試験時間が 200 s の場合の析出物量を 1 として相対比で示してある。また図中には測定値も示してあり、試験時間が 200 s の時に新たに増加した析出物量をもとに各試験時間での析出物の増加量の比をとって示してある。Fig. 10 の結果より実測値は静的な Ostwald の成長の場合の析出物量にきわめて近く、本試験時間内では析出物の粒成長がほとんど起こらず、(6)式の第一項目の時間 t に比例した項が支配的であることを示している。さらに Photo. 2 にみられるように試験時間が 900 s と長い(b)の場合も(a)の場合の析出物と比較してサイズはほとんど変化がなく、析出物数のみが增大している傾向が認められる。これは動的析出が生じている間は析出物構成元素が析出のために使用されてしまい、拡散による粒子の肥大化が起こりにくいためと考えられる。Weiss らも動的析出が終了後はじめて粒子の肥大化が生じると報告している¹⁰⁾。

よつて本試験条件で荷重時間積分値の大きな場合は微細な動的析出物が肥大化することなく数多く生じ、割れ感受性を高めると考えられる。

実際の連続鋳造において矯正ゾーン内で析出を終了させ、さらに析出物を動的に肥大化させれば表面割れの防止にとって有効であると考えられるが、時間がかかりすぎ生産性が低くなるため実用的でない。よつて矯正点数を少なくして、1回あたりの矯正の歪み速度を上げ、矯正ゾーンを短くして矯正時間の短縮を図ることにより、荷重時間積分値を低減させることが表面割れ発生の防止に対して効果があると考えられる。

4. 結 言

Nb, V 含有鋼において、加工回数、加工時間を種々変化させて連鋳矯正方法のシミュレーション試験を行い、割れ発生程度と Nb(CN), V(CN) の析出形態、析出物

量との関係、オーステナイト粒界周囲の初析フェライトの析出状態との関係を調査した結果以下の結論を得た。

(1) 付加歪み量、1回の加工時間、全体の加工時間が同一の場合、引張回数の少ない3回のほうが9回よりも割れ発生程度が小さい。

(2) 同一歪み量を与えた場合、Nb(CN), V(CN) 析出量は歪み速度が小さいほど増加する。

(3) 炭窒化物の動的析出は加工時間の間だけ起こるのではなく、保持時間中にも荷重が十分に緩和せず、この荷重により Nb(CN), V(CN) が動的析出する。

(4) 矯正点数を減少させ、矯正ゾーン長を短くすれば、荷重時間積分値が小さくなり、析出物量も少なく、表面割れ感受性を低減することが可能であると考えられる。

(5) 温度が 950°C 以上であれば Nb(CN), V(CN) はほとんど析出せず、割れ感受性を大きく低減することが可能である。初析フェライトも 870°C 以上であれば加工を与えても析出しない。したがって矯正温度を 950°C 以上にすれば表面割れは低減できると考えられる。

(6) 荷重時間積分値が増大するほど炭窒化物析出物量が増大し、割れ感受性が高くなる。さらに、荷重時間積分値が増大すればフェライトがオーステナイト粒界に薄く連結して析出し、割れ感受性を高める。

文 献

- 1) 鈴木洋夫, 西村 哲, 今村 淳, 中村 泰: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 1180
- 2) 前原泰裕, 友野 宏, 大森靖也: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 1170
- 3) I. WEISS and J. J. JONAS: Metall. Trans. A, **10** (1979), p. 831
- 4) J. M. SILCOCK: J. Iron Steel Inst., **201** (1963), p. 409
- 5) 東田幸四郎: 第 104・105 回西山記念技術講座(日本鉄鋼協会編) (1985), p. 61
- 6) 牧 正志, 長道常昭, 阿部直樹, 田村今男: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 1367
- 7) 山中和夫, 寺崎富久長, 大谷泰夫, 小田光男, 吉原正裕: 鉄と鋼, **65** (1979), p. 1410
- 8) I. M. LIFSCHITZ and V. J. SLYOZOV: J. Phys. Chem. Solids, **19** (1963), p. 35
- 9) C. WAGNER: Zeit Electrochem., **65** (1961), p. 581
- 10) I. WEISS and J. J. JONAS: Metall. Trans. A, **11** (1980), p. 403
- 11) A. le BON, J. Rofes-VERNIS and C. ROSSARD: Met. Sci., **9** (1975), p. 36
- 12) J. IRVINE and T. N. BAKER: Met. Sci., **13** (1979), p. 228