

チタン材厚・中板の真空クリープ矯正 (V C F) 技術

Vacuum Creep Flattening of Titanium and Titanium Alloys Plates

石 井 満 男^{*(1)}
Mitsuo ISHII安 藤 保 孝^{*(2)}
Yasutaka ANDO永 井 勲^{*(2)}
Isao NAGAI

抄 録

チタン材は室温ではスプリングバックが大きく強度が高いため矯正は一般に難しいが、焼鈍温度では焼鈍と同時に矯正が可能となるレベルまでクリープ強度が低下する。真空クリープ矯正 (V C F) 法は平坦な基盤上に被矯正材を載せ徐加熱しながら徐々に真空度を上げて被矯正材全体に大気圧を作用させ、焼鈍温度で十分均熱しながらクリープ変形を起こさせて矯正する。素材の製造過程で導入された歪の解消が十分に行われるので、内部及び表面の残留応力を完全に除去することが可能であり、平坦度はもとより二次加工時の形状戻りが極めて少ない製品の製造が可能である。1993年4月より八幡製鐵所ステンレス厚板工場で生産を開始したチタン材厚中板用のV C F設備についてその概要、矯正能力、材質制御及び実機V C F製品の平坦度実績と製品特性について概説した。

Abstract

Generally, flattening of titanium and titanium alloys plates at room temperature is difficult because of their high springback and high strength. At the annealing temperatures, however, their creep strengths decrease to the level where flattening can be accomplished simultaneously with annealing. In the vacuum creep flattening method, the materials placed on a flat base are flattened by causing creep deformation through the application of atmospheric pressure, while heating them at a slow rate and gradually increasing the degree of vacuum, and sufficient soaking at the annealing temperatures. As the strain produced in the course of the production of material is sufficiently eliminated, the residual stresses in the inside and surface of the materials can be completely removed, making it possible to manufacture such products which are high in flatness and very low in springback in secondary processing. This paper describes the vacuum creep flattening (VCF) equipment for titanium and titanium alloy plates which was put into operation in the Stainless Steel Plate Mill at Yawata Works in April 1993, including the specification and capacity of the equipment, properties control, and the flatness and characteristics of the products manufactured by the VCF equipment.

1. 緒 言

チタン及びチタン合金の厚中板はその優れた耐食性、高比強度により航空機機体、発電所復水器管板、クラッド鋼板用素材、電極材をはじめ化学プラント用に広く使用されている。いずれの場合も厚板圧延機で熱間圧延（以後、熱延と記す）後、所定の熱処理、矯正及び表面仕上げ（酸洗又は研削加工）を経て製品とされる。チタン材は、ヤング率が鉄鋼の約半分、そのためスプリングバックが大きく一般に矯正が難しく、更に、研削・切削速度を低く保つ必要があるなど、加工面での特別な配慮が必要である。したがって、平坦度の高い素材を使うことにより、(1)製品余肉の削減、(2)製品仕上げ工程及びユーザーにおける二次加工工程での生産性と歩留りの著しい向上が期待できる。

本報では1993年4月より八幡製鐵所ステンレス厚板工場で生産を開始した真空クリープ矯正（以後、V C Fと略記する）設備について

その設備概要、矯正能力、材質制御及び本装置で製造した製品の特性について述べる。

チタン材は室温ではスプリングバックが大きく、強度が高いため矯正は一般に難しい。冷間で板材を平坦になるまで矯正加工すると、平坦な形状を維持するために表面部に残留応力を導入することになるので、冷間矯正した製品の表面を更に研削したり、ケミカルミリングすると、残留応力の平衡が崩れて元の形状に戻りやすい¹⁾。しかし焼鈍温度近傍では焼鈍と同時に矯正が可能となるレベルまでクリープ強度が低下する²⁾。クリープを利用した矯正法にはクリープ矯正法と真空クリープ矯正法とがあり³⁾、前者は被矯正材の上に重錘を載せて焼鈍を行なう方法で従来新日本製鐵でも採用してきたものである。しかしこの方法は作業性、均熱温度管理、処理サイズ及び製品の平坦度の点で必ずしも満足できるものではなかった。又、場合によってはコールドレベラーによる冷間矯正を必要とした。

一方、真空クリープ矯正法は、Boeing社によりチタン材の内部及

^{*(1)} 技術開発本部 鉄鋼研究所 ステンレス・チタン研究部
主任研究員

^{*(2)} 八幡製鐵所 条鋼・ステンレス厚板部 掛長

び表面の残留応力を開放するために、開発されたものである¹⁾。この方法では平坦な基盤上に被矯正材を載せ、徐加熱しながら徐々に真空度を上げて被矯正材全体に大気圧を作用させ、焼鈍温度で十分均熱しながらクリープ変形を起こさせて矯正する。そのため素材の製造過程で導入された歪を解消し内部及び表面の残留応力を完全に除去することが可能であり、平坦度はもとより二次加工時の形状戻りが極めて少ない製品が製造できる。更に、低真空度ではあるが減圧状態で処理するため、従来より酸化や他の夾雑物による汚染が少ないという利点を有している。このような優れた面を持つため米国の有力チタン材展伸メーカーはVCFを保有しているが、その矯正能力の詳細や材質制御に関する報告は極めて少ない^{1,2)}。

2. VCF設備概要

1993年4月、八幡製鐵所ステンレス厚板工場にVCF設備が完成し操業を開始した。設備の主な仕様を表1、操業中の設備外観を写真1、構造略図を図1に示す。有効炉床面積3 620mm×11 110mmは世界最大級の処理能力である。本設備の最大の特徴は、各々±0.1mmの精度で機械加工仕上げした低熱膨張率、高耐圧縮強度のfused silicaの耐火物ベッド(platen)を採用して平坦度精度を確保している点にある。操業はバッチ処理で行ない、処理ごとにplaten上に被矯正材料(チタン材料)、watersheet(使い捨ての0.5mm厚の純チタン薄板)、熱電対、パーミキュライト、ナイロンシートを取り付けて操業する(図1参照)。

VCF処理は熱処理(焼鈍)を兼ねて行なうので素材品種、サイズ(板厚、幅、長さ)、矯正前形状及び目標品質(機械的性質とミクロ組織)にあわせて均熱温度と時間を決定する。図2に純チタン材の代表的なヒートパターンを示す。又、均熱中の炉内真空度は25～60 mmHg(3 325～7 980Pa)に保って操業する。

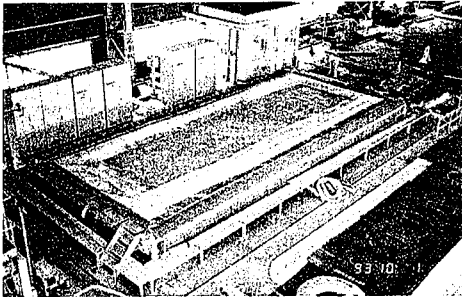


写真1 VCF操業中の設備外観

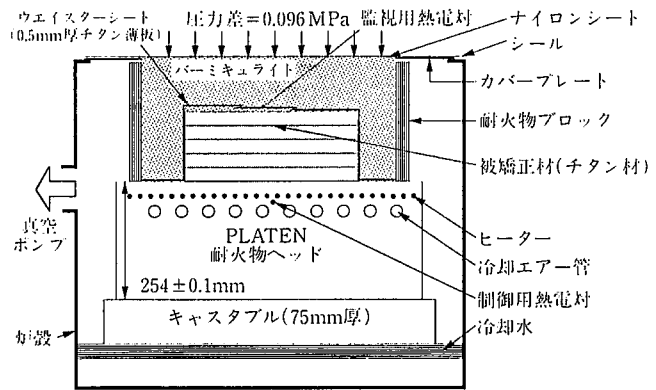


図1 VCFの断面構造略図

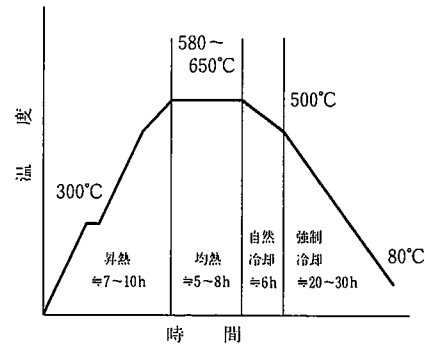


図2 VCF処理の代表的ヒートパターン(純チタン)

3. VCF設備の矯正能力検討

3.1 クリープ矯正モデル

クリープ変形時の歪速度 $\dot{\epsilon}$ は応力 σ 及び試験時間 t の関数として(1)式で表わされる。

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n t^m \quad (1)$$

一次クリープのquasi-steady state域³⁾及び定常クリープ域では、 $m=0$ で、いわゆるNorton則になる。これを更に、見かけの活性化エネルギー Q を用いて、次式で表わす。

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n, A = B\exp(-Q/RT) \quad (2)$$

ここで、 A, n は材料定数である。

クリープ変形としては、一次クリープのquasi-steady state域及び定常クリープ域を対象とする。次に、たわみの発生した厚板の曲げ戻し変形を次のように単純化する。すなわち、一辺が無限に長い

表1 VCF設備の主な仕様

項目	仕様
設備主仕様	稼働年月日
	基本設計
	全体設計製作
	有効炉床面積
	加熱方式
	処理可能温度
	炉内真空度
処理能力	温度・ヒートパターン制御
	品種
	処理可能サイズ
	矯正後の製品平坦度

矩形平板が大気圧による等分布荷重 q による曲げモーメントを受けて変形すると考える(図3参照)。そして中央面のたわみ W をもって矯正可能限界高さ h と考えることにする¹⁾。

多軸定常クリープの場合、(2)式は相当応力 σ_e 、相当歪速度 $\dot{\epsilon}_e$ に対してそのまま成立する。Odqvist と Hult⁵⁾によれば、図3の場合に対して Norton の式は(3)式となる。

$$\dot{\epsilon}_x = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^{(n+1)} A \sigma_x^n \dots\dots\dots(3)$$

平板の曲げ変形において中央面から z の距離における曲げ歪 ϵ_x は微小たわみを前提として曲率 k 及び z 方向の板のたわみ W の関数として(4)式で表される。

$$\epsilon_x = zk = -z \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} = -z W'' \dots\dots\dots(4)$$

これを時間で微分して(3)式に代入すれば平板内部の板厚方向の応力分布が求まる。

$$\sigma_x = A \left(\frac{1}{n}\right) \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{\left(1+\frac{1}{n}\right)} k^{\left(\frac{1}{n}\right)} z^{\left(\frac{1}{n}\right)} \dots\dots\dots(5)$$

したがって、単位長さ当たりのモーメント M と平板中央面の曲率速度 $\dot{k}$ の関係は次式で表される。

$$M = 2A \left(\frac{1}{n}\right) \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{\left(1+\frac{1}{n}\right)} k^{\left(\frac{1}{n}\right)} \left(\frac{h}{2}\right)^{\left(2+\frac{1}{n}\right)} \left(2+\frac{1}{n}\right)^{-1} \dots\dots\dots(6)$$

両端単純支持の長さが L の平板に均一分布荷重 q が働く場合を考えると M は次式で与えられる。

$$M = \frac{q}{2}(LX - X^2) \dots\dots\dots(7)$$

式(6)、(7)より

$$\dot{W}'' = -A(3) \left(\frac{n+1}{2}\right) \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n \left(\frac{1}{h^{2n+1}}\right) \left(\frac{qL^2}{2}\right)^n \left(\frac{X}{L} - \frac{X^2}{L^2}\right)^n \dots\dots\dots(8)$$

(8)式をべき級数近似した後、 x で二回積分してたわみ速度 $\dot{W}$ を求める。これに材料定数 A, n 、平板のサイズ及び荷重条件を代入すればたわみ量 W の時間経過を計算できる。

3.2 クリープデータ

(1)矯正能力推定の基礎となるクリープデータを以下の条件で求めた。

VCFでは、熱延ままの素材に対し焼鈍と矯正を同時に行ない、要求製品特性を与える必要がある。そこでクリープ試験の素材は熱延まま材を使用し、通常JISクリープ試験法等で定められている負荷開始前に行なう24±4時間の均熱を省略した。定常クリープは三次クリープが観察されるまでは特定できないが、長時間のクリープ特性を調査することが目的ではないので最大900時間で試験を中断した。JIS1種、2種、3種、Ti-6Al-4Vの熱延まま材(板厚11~32mm)の板厚中央部より圧延方向に平行に丸棒試験片を採取しクリープ歪試験を実施した。

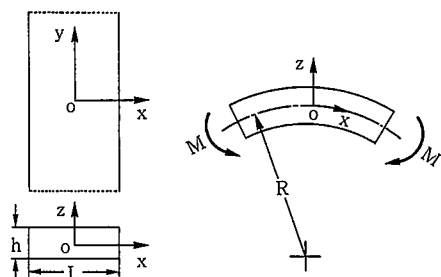


図3 曲げモーメントによる細長い長方形板の変形

(2)矯正時に発生する歪量及び歪速度の推定

矯正前のたわみ量は通常、板厚が3.7~6.2mm及び22~37mmの板に対しそれぞれ35mm/1000mm、13mm/1000mm程度であり、これらのたわみを矯正するために必要な歪 ϵ は板の最表面部で高々 1.9×10^{-3} 程度である。従ってVCFにおけるクリープ歪の程度は通常のクリープ破断歪に比べて極めて微小の歪であり、材料に何ら損傷を与えるものではない。この歪を10時間で与えるとすれば、処理中の平均歪速度は $5.3 \times 10^{-8} s^{-1}$ となる。

(3)クリープ試験時の負荷応力の決定

均一分布荷重 q が働く場合、板厚方向の位置 z での応力は次式で与えられ、 z に板厚の $1/2$ を代入して表面での最大応力を計算できる。

$$\sigma = \frac{M}{I_n} \left(\frac{1}{n}\right), I_n = 2 \int_0^{\frac{h}{2}} z^{\left(1+\frac{1}{n}\right)} dz \dots\dots\dots(9)$$

JIS1種材(長さ $L=0.2\sim 2m$ 、板厚 $h=5mm\sim 50mm$)を等分布荷重 $q=0.096MPa \cdot m$ (炉内真空度=40mmHg相当)、温度 $620^\circ C$ ($n=3.71$)で処理する場合、表面での最大応力 σ_{max} は0.9MPaから約8700MPaまで変化する。たわみ長さ L が短く板厚の大きい場合の矯正能力が評価できるように、今回の試験での負荷応力は特に4.9、9.8、19.6、39.2、78.4MPaの低い応力範囲に設定した。

表2に10時間 quasi 定常クリープについての材料定数 n, A を温度の関数として示した。

3.3 矯正能力の推定計算

初期たわみピッチ0~1000mmを持つ純チタン1種及びTi-6Al-4Vの厚中板(板厚:6, 12, 25, 37mm)について、炉内真空度=40mmHg、処理温度=620°C(純チタン1種)、760°C(Ti-6Al-4V)、処理時間=1, 2, 4, 8時間の場合について矯正可能なたわみ量 W を計算した。結果を図4(a),(b)に示す。横軸は初期たわみピッチ、縦軸は矯正可能なたわみ量 W であり、各曲線の右側は矯正可能領域、左側は矯正不可能領域を示す。板厚37mmのJIS1種材を例にとると、素材たわみ高さが18mmで処理時間を1時間としたとき、完全に矯正するには初期たわみピッチ700mmが矯正できる限界である。たわみピッチがこれより小さい場合は完全には矯正ができない。処理時間を増やして8時間にすると初期たわみピッチが約560mm以上の素材は完全に矯正できるようになる。同じくJIS1種の6mm材で素材のたわみ高さが35mmの場合、処理時間を8時間とするとピッチが約120mmより大きいたわみは矯正が可能であることを示している。

これら図に示した素材たわみの許容ピッチは、新日本製鐵ステンレス厚板工場で製造している厚中板熱延まま材のたわみ実績に比べてはるかに小さいことから、処理温度・時間をクリープデータを基に正しく設定すれば、VCFは純チタン及びTi-6Al-4Vの厚中板に対してほぼ完全な矯正能力を有するものと予測できる。

しかし、ここで得た結果は、両端単純支持の平板中央部のたわみ量を計算したに過ぎず、矯正能力を過大に評価している恐れがある。よく似た例として、連続鋳造時のスラブのバルジング変形挙動を板

表2 試験材の材料定数 (10時間 quasi 定常クリープ)

種別	n	logA [S ⁻¹ MPa ⁻ⁿ]
純チタン1種	10.57-6 127(1/T)	-2.265-7 000(1/T)
純チタン2種	14.60-10 230(1/T)	-7.813-1 325(1/T)
純チタン3種	12.75-8 635(1/T)	-5.399-3 781(1/T)
Ti-6Al-4V	5.798-3 814(1/T)	-1.565-6 483(1/T)

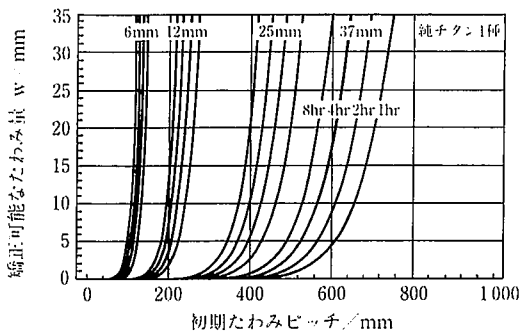


図 4(a) 純チタン1種材の矯正可能なたわみ量(計算値)
板厚: 6, 12, 25, 37mm, 炉内真空度: 40mmHg,
VCF処理温度: 620°C, 処理時間: 1, 2, 4, 8時間

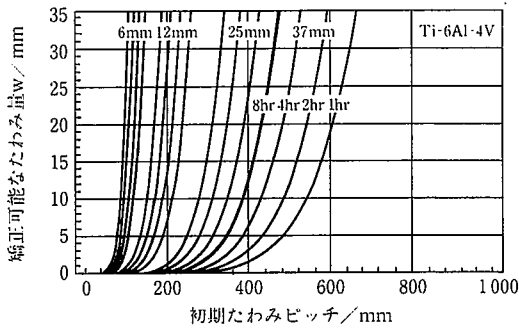


図 4(b) Ti-6Al-4Vの矯正可能なたわみ量(計算値)
板厚: 6, 12, 25, 37mm, 炉内真空度: 40mmHg,
VCF処理温度: 760°C, 処理時間: 1, 2, 4, 8時間

材のクリープ変形としてFEMで解析した例が多く報告されている⁶⁻⁹⁾。VCFについても、正確には曲がり板が時間とともに変形し支持点が外側に移動するようなモデル、すなわち移動境界モデルで計算すべきでありFEM解析も含め今後の検討課題としたい。

4. VCFにおける材質制御

前章では通常予想されるたわみであれば、焼鈍温度において8時間も処理するとほぼ完全に矯正できることを示した。しかし、VCFの作業実態を考えてみると、1バッチ当たりの処理時間が長い場合、必ずしも同一品種、同一サイズだけで処理せずに種々の品種やサイズを同時に処理する必要が出てくる。そこで品質設計上、種々の温度と時間で焼鈍した場合の特性変化(機械的性質及びミクロ組織)を把握しておくことが非常に重要となる。実機圧延機で製造したJIS1種、2種、3種及びTi-6Al-4Vの熱延板(板厚はそれぞれ21mm, 14mm, 31mm, 10mm)を、実験用電気炉を用いアルゴンガス中あるいは大気中にて、純チタンの場合は600°C~710°Cにて20分~24時間、Ti-6Al-4Vの場合は730°C~800°Cにて1時間~24時間均熱した後炉内冷却を行なった。

JIS規格、AMS規格に準じて引張試験を行ない、機械的性質をLarson-Millerパラメーター $T(20+\log t)$ で整理した。ここで T =熱処理温度(K)、 t =均熱時間(h)である。図5, 6は引張強度及び延性とLarson-Millerパラメーターの関係を示している(試験片の採取方向はTD方向)。いずれの場合もLarson-Millerパラメーターが増加するにつれて0.2%耐力、引張強さは直線的にゆるやかに低下し、伸びは向上する傾向を示す。強度とLarson-Millerパラメーターの関係は、Larson-Millerパラメーターの増加とともに、結晶粒径が増加することからHall-Petch則で説明される。なお強度、延性

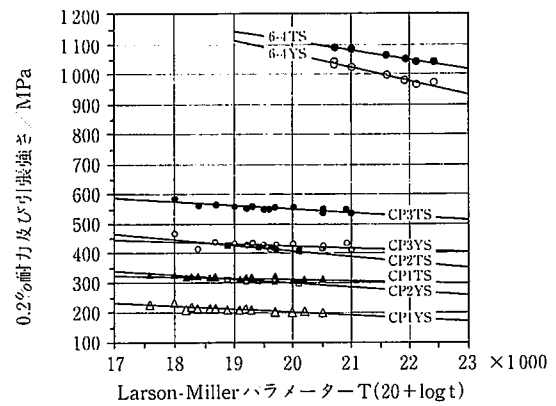


図 5 引張強度のLarson-Millerパラメーターによる整理

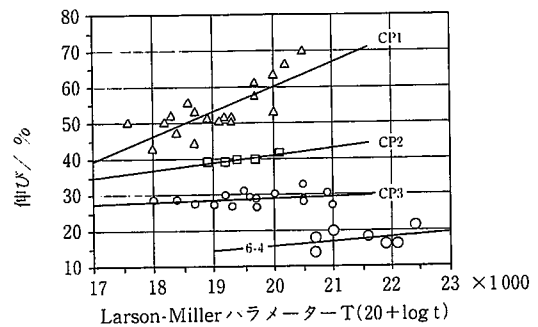


図 6 伸びのLarson-Millerパラメーターによる整理

とも通常求められる規格値を十分満足している。従って、VCFにおいてはLarson-Millerパラメーターを用いて強度、延性に関する品質設計を精度良く行うことができる。

5. 実機VCF製品の平坦度実績と製品特性

3章、4章で述べたクリープ矯正条件、熱処理条件に基づいて実機VCF処理条件(温度、均熱時間)を決め、実作業を行なった。平坦度と製品特性の例を以下に述べる。

5.1 平坦度

写真2(a), (b)は純チタン板のVCF処理前後の形状を、図7(a), (b)は処理前後での平坦度の変化を示す。厚手材では若干矯正効果は少ない目であるが、目標としていた1mm/m以下のレベルを確保し、非常に良好な平坦度を持つ純チタン厚板製品の製造が可能となった。又、Ti-6Al-4Vなどのチタン合金に対しても同様の矯正効果が確認された。

VCFの稼働により、非常に厳しい平坦度を要求される製品(電極材など)や従来は平坦度の点で製造不可能としてきた薄手広幅材などの製造が可能となり、新日本製鐵の製造可能範囲が大幅に拡大した。このような良好な平坦度を得ることができた背景には、(1)建設時に新工法を採用してPlaten面の平坦度を全面0.5mm/m以下に仕上げたこと、(2)作業面では、適正な矯正・熱処理条件の設定、幅方向、長さ方向の温度偏差を出さない作業基準を確立したこと等がある。

5.2 製品特性

純チタン1種、2種材に関して、同一の熱延板を従来の熱処理炉で処理した場合とVCFで処理した場合での機械的性質の比較を図8(a), (b)に示す。ほぼ予想通りの材質が得られており規格値も十分

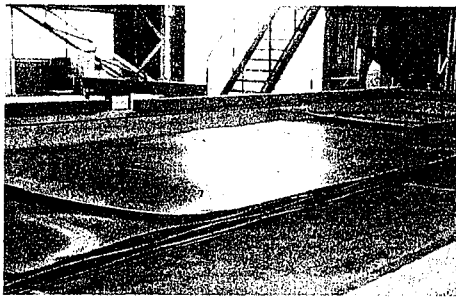


写真 2(a) VCF 処理前の熱延板の形状

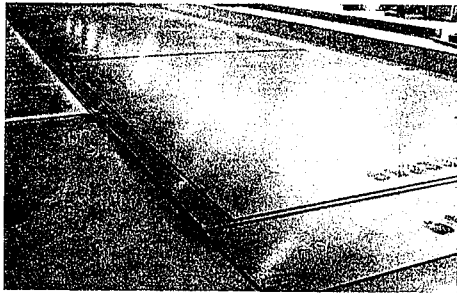


写真 2(b) VCF 処理後の熱延板の形状

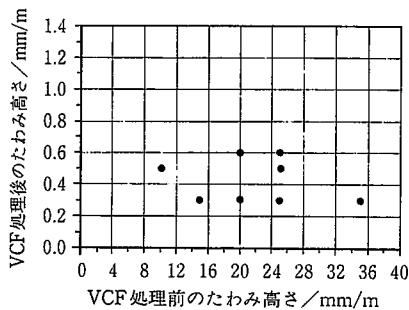


図 7(a) VCF 処理の矯正効果例(1) (純チタン1種, 2種/薄手材)

板厚: 3.7～6.2mm, 板幅: 1200～3200mm
処理温度: 590～650°C, 均熱時間: 5時間

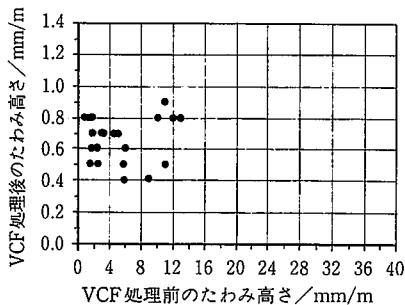


図 7(b) VCF 処理の矯正効果例(2) (純チタン1種, 2種/厚手材)

板厚: 22～37mm, 板幅: 1300～2200mm
処理温度: 600～650°C, 均熱時間: 5時間

満足している。VCF 処理材の 0.2%YS が従来熱処理材に比較して約 20MPa 低くなっているが、これは従来熱処理材が最終矯正としてコールドレベラー矯正を受けてやや加工硬化しているためである。

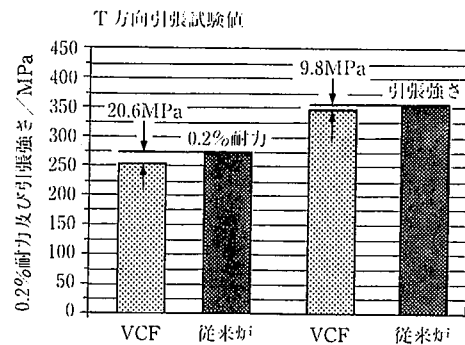


図 8(a) 純チタン1種材の材質比較 (VCF, 従来材)
板厚: 5～7mm, 成分: [O]=0.058%, [Fe]=0.036%
VCF 材: 600°C×5時間, 従来材: 670°C×20分

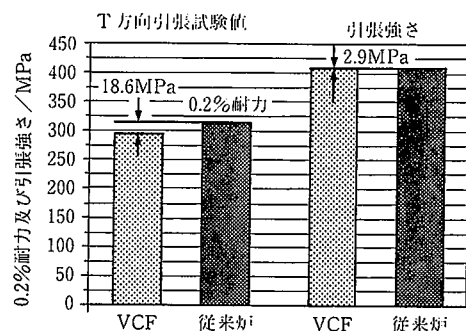


図 8(b) 純チタン2種材の材質比較 (VCF, 従来材)
板厚: 4mm, 成分: [O]=0.082%, [Fe]=0.045%
VCF 材: 650°C×5時間, 従来材: 710°C×20分

6. 結 言

チタン材厚中板の形状矯正用に、八幡製鐵所ステンレス厚板工場に設置した真空クリープ矯正設備 (VCF) の設備概要、矯正能力の推定、材質制御及び実機 VCF 製品の平坦度実績と製品特性について概説した。VCF は同時に設置した広幅ベルト研磨機及び製品への全面マーキング装置と相まって、新日本製鐵のチタン厚板製造可能範囲を大幅に拡大した。これにより平坦度厳格製品（電極材など）や薄手幅広材などを製品メニューに加えることができた。今後こうした需要家のニーズに合った商品開発、プロセス開発を進めることで需要家の期待に応えていきたい。

最後に、矯正能力推定モデルに関して京都大学工学部 井上達雄教授から貴重な助言を頂いた。ここに記して深く感謝する。

参 照 文 献

- 1) Mach Tool Blue Book. Oct.1971, 66, 61
- 2) Metals Handbook. Ninth Edition, vol.4 ASM, 1981, 763
- 3) Poirier, J.P.: Creep of crystals. Cambridge University Press, 1985, 27
- 4) 井上達雄: 私信, 1991年5月20日
- 5) Odqvist, F.K.G., Hult, J.: クリープ強さの理論. 培風館, 1967, 135
- 6) Miyazawa, K., Schwerdtfeger, K.: Ironmaking and Steelmaking. 68(1979)
- 7) 松宮 徹, 梶岡博幸, 中村 泰: 製鉄研究. (310), 402(1982)
- 8) 府川幸平, 松本弘美, 中島浩衛: 鉄と鋼. 68, 794(1982)
- 9) Yoshii, A., Kihara, S.: Proc. ICM-5. vol.II, 1123(1987)