

垂直型連続鋳造法による軸受鋼の製造

技術報告

上 杉 年 一*

Production of High Carbon Chromium Bearing Steel by Vertical Type Continuous Caster

Toshikazu UESUGI

Synopsis :

Rolling contact fatigue life of bearing steel is improved with a decrease in oxide nonmetallic inclusions. The oxygen content of high carbon chromium bearing steel has been reduced to an average level of 5.8 ppm. This is accomplished through the combined processes of an electric arc furnace, a ladle furnace, an R-H vacuum degassing vessel and a continuous caster.

Rolling contact fatigue life of high carbon chromium bearing steel thus manufactured and tested on the thrust type machine has accordingly doubled to tripled if compared with the conventional vacuum degassed, ingot cast steel.

From an operational standpoint, the supply of extremely low oxygen steel to the caster has resulted in the elimination of such troubles as nozzle clogging and has been the main contributor to a record 10 000 tons of continuous cast high carbon chromium bearing steel from one tundish without interruptions.

It has been demonstrated in the life tests that neither sulphur nor titanium influenced life when the levels of these elements were held down to a minimum in the high carbon chromium bearing steel. Life is further extended by the cold working inherent to cold pilgered tubes. The improvement in life has been found out in the tests to double to triple that of hot worked hollow tubes.

1. 緒 言

転がり軸受の寿命（軸受の破壊まで、あるいははく離発生までの総応力くり返し数、または時間）の改善はその信頼性の向上、機器の小型軽量化、あるいは性能向上をはかる上できわめて重要である。寿命が鋼中の酸化物系介在物の減少によつて著しく改善されることはよく知られており、高炭素クロム軸受鋼は JIS でも脱ガス処理を行うことが規定されている。

酸素含有量の少ない溶鋼を作るためには、酸化反応を伴う溶解過程と還元反応主体の精錬過程を分離独立させることが必要であり、このことは生産性にとつても有利である。また、酸素を考える場合、反応容器の耐火物の材質について十分な考慮を払うとともに、造塊法としては連続鋳造機が適している。また、非金属介在物の分布の一樣性の点から垂直型連続鋳造機が最も好ましいといえる。

以上の見地から導入された電気炉 (EF)-取鍋精錬炉 (LF)-RH 脱ガス設備 (RH)-垂直型連続鋳造機 (CC) を用いて高炭素クロム軸受鋼 (SUJ2) を溶製した。以下にその製造と品質とについて述べる。

2. 製造設備と操業

2.1 EF-LF-RH

2.1.1 設備

Table 1 に電気炉, LF, RH の設備概要を示す。各設備の主な特徴点は次のとおりである。

(1) EF

最大二次電圧 (900 V) の操業に耐えられるよう、炉壁面積の 75%、天井面積の 70% に水冷パネルを用いている。

(2) LF

LF 用取鍋のスラグラインにカーボンマグネシアれんがを、その他の部分にはハイアルミナれんがを用いた。このように SiO₂ などの不安定な酸化物の含有量の少ない耐火物を用いることにより酸素含有量の低減を計った。また、取鍋内溶鋼の攪拌には、ダブルポーラス法を採用している。

Table 2 に取鍋耐火物の組成を示す。

2.1.2 操業

(1) EF

Fig. 1 に SUJ2 の操業パターンを示す。還元精錬は

昭和 60 年 7 月 19 日受付 (Received July 19, 1985)

* 山陽特殊製鋼 (株) 工博 (Sanyo Special Steel Co., Ltd., 3007 Nakashima Shikama-ku Himeji 672)

Table 1. Major particulars of EF, LF and RH.

EF	Shell diameter Transformer capacity Max. secondary current Max. secondary volt. Rated secondary volt. Electrode diameter Av. tap to tap time Charged weight	7.0 m 70 MVA 70 kA 900 V 585 V 24 inches (610 mm) 75 min 150 t
LF	Transformer capacity Max. secondary current Max. secondary volt. Rated secondary volt. Electrode diameter Operation time	12 MVA 31.5 kA 325 V 220 V 14 inches (356 mm) 30-60 min
RH	Type of vacuum pump Capacity of vacuum pump Operation time	Steam ejector 400 kg/h at 0.5 torr 20-60 min

EF: Electric furnace, LF: Ladle furnace, RH: RH-degassing

Table 2. Chemical composition of ladle bricks.

	(wt%)				
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	C
Slag line	77.6	—	—	0.4	15.0
Sidewall & Bottom	—	83.0	11.6	1.1	—

次工程の LF で実施されるので電気炉内では行わず、ほぼ未脱酸状態で出鋼され、出鋼後の取鍋内の酸化性スラグは、スラグドロッガーを用いて完全除滓される。

(2) LF

LF 取鍋耐火物の組成と精錬スラグの組成は、脱酸の平衡値を決める重要な要因の一つとされている。前述のように、取鍋の耐火物にはカーボンマグネシアレンがあるいはハイアルミナなどの SiO₂ 含有量の少ない材質を用いるとともに、高塩基度スラグ下で操作している。その結果、EF-LF-RH-CC プロセスによつて製造された SUJ2 の酸素含有量は、後述するように平均 5.8 ppm で、従来の EF-RH-インゴット造塊法より約 2.5 ppm 低下した。SUJ2 溶製時の LF 終点におけるスラグ組成の一例を Table 3 に示す。このような高塩基度スラグ

Table 3. Chemical composition of LF slag in %.

(wt%)									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	T.Fe	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaF ₂	S
57.8	13.3	15.8	<0.1	4.3	0.6	<0.1	<0.1	7.8	1.1

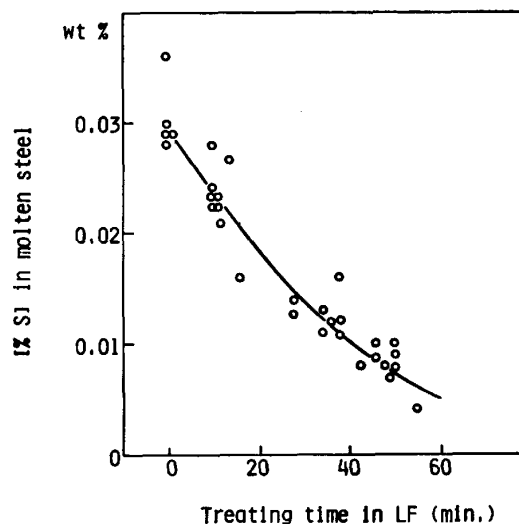


Fig. 2. Change of [%S] in LF.

を用いるとともに、LF の高い攪拌力を利用することにより、脱硫は容易になるが、実操業では切削性の見地から SUJ2 の硫黄含有量を $7\sim 15 \times 10^{-3}\%$ にコントロールしている。Fig. 2 は LF 操業における硫黄の変化例である。なお LF の操業概要は次のとおりである。

処理量: 140 t

処理時間: 30~50 min

攪拌方法: ダブルポーラス法による N₂ 攪拌スラグ塩基度: CaO/SiO₂ = 4.0~5.0

処理温度: 1520~1570°C

また、Al 脱酸は主として LF 造滓後、および次工程の RH 中に行つた。RH 処理後の Al の含有量は 0.015

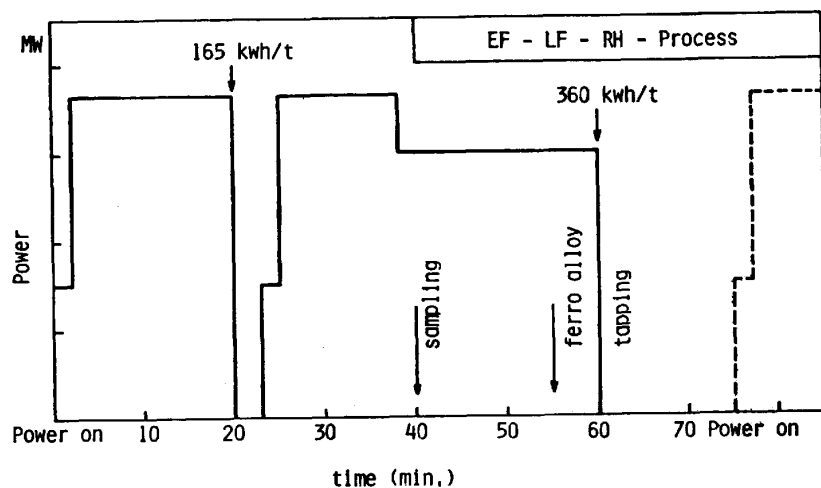


Fig. 1. Schematic power program for EF.

Table 4. Major particulars of continuous caster.

Type of machine	Vertical bloom caster
Number of strands	3
Bloom size	370×470 mm
Max. withdrawal speed	0.65 m/min

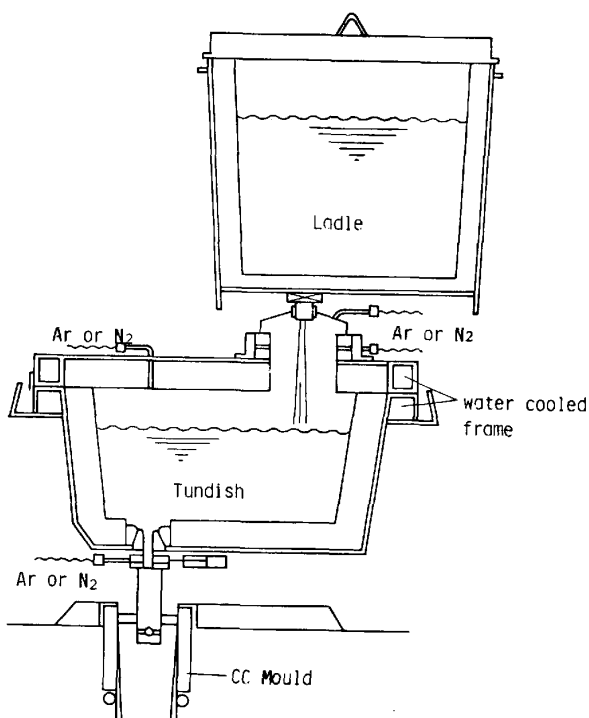
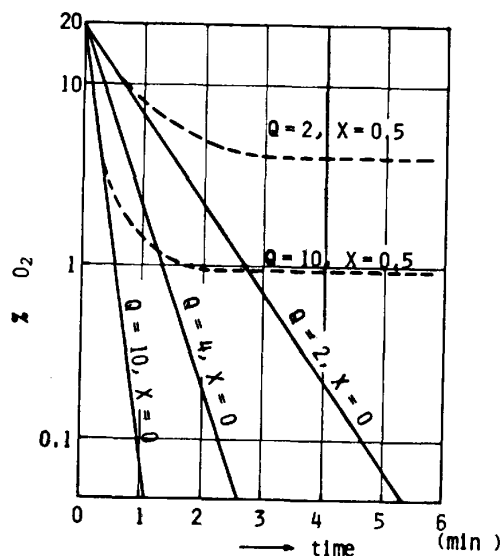


Fig. 3. Schematic drawing of tundish.



Q : Inert gas volume introduced into the tundish, Nm³/min.
 X : Air volume leaked into the tundish, Nm³/min.

Fig. 4. Change in %O₂ in tundish atmosphere calculated.

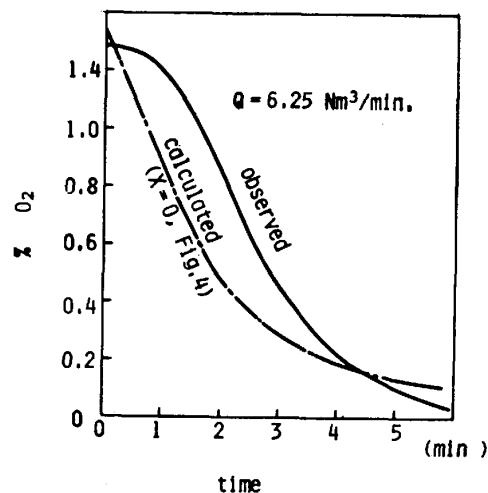


Fig. 5. Change in %O₂ in tundish atmosphere in actual operation.

%前後である。

(3) RH

LF により十分精錬された溶鋼は、20~30 minのRH脱ガス処理により、脱水素、脱窒素および化学成分の微調整を行つた後 CC に供給される。

2.2 連続鑄造

2.2.1 設備

Table 4 に連続鑄造設備の概要を示す。連続鑄造において酸化物系介在物を低減する方法として、タンディッシュ内での介在物の浮上分離と、鑄造時の溶鋼の再酸化防止の二つが主に論じられている。当連鑄機では、精錬工程で清浄な溶鋼を供給することを前提に、後者の再酸化防止技術の開発に重点をおいた。また、同様の目的から、タンディッシュの耐火物についても、SiO₂ 含有量の少ない MgO ボード等を用いている。Fig. 3 はこのために開発された水冷タンディッシュと各部の不活性ガスシール方法の概念図である。また、Fig. 4 は侵入空気量 (X)、不活性ガス導入量 (Q) とタンディッシュ内酸素濃度の関係を式(1)から求めたもので、この結果タンディッシュ内酸素濃度 <0.1% を保つためには、タンディッシュで使用される不活性ガス (N₂ or Ar) 量を極力少なくするためにも侵入空気量がほぼ 0 でなければならず、タンディッシュ本体とタンディッシュカバーは完全密閉が要求される。このため Fig. 3 のような水冷タンディッシュとタンディッシュ各部の不活性ガスシール方法を開発した。Fig. 5 はこのタンディッシュを用いて行つた実操業時の溶鋼注入開始直前のタンディッシュ内酸素濃度変化の一例で、侵入空気: X=0 の計算値とほぼ一致しており、鑄造の全期間を通じて 0.1% 以下の酸素値を維持している。

Table 5. Casting practice of SUJ 2.

Withdrawal speed	0.35-0.60 m/min
Specific cooling water ratio	0.1 l/kg of steel
Change of level in mould	less than ± 3 mm

Table 6. Conditions for 10 000 t continuous cast.
(with one tundish)

Date	June 23 to 27, 1985
Total casting time	94.45 h
Number of heats cast	68
Tonnage of blooms	10 150 (t)
Yield of blooms (Blooms/melt)	99.6 (%)

なお、式(1)は、タンディッシュへの侵入空気量 (X) と不活性ガス導入量 (Q) とタンディッシュからの放出ガス量 ($Q+X$) の容積バランスより求めたもので、タンディッシュ内の初期酸素濃度を空気と同じく 0.2 とした。

$$C = \frac{0.2Q}{Q+X} \cdot \exp\left(-\frac{Q+X}{V} \cdot \frac{273+T}{273} \cdot t\right) + 0.2 \cdot \frac{X}{Q+X} \dots\dots\dots (1)$$

C : タンディッシュ内酸素濃度 (wt%)

t : 不活性ガス導入開始後の経過時間 (min)

V : タンディッシュ内容積 (8 m³)

T : タンディッシュ内温度 (1000°C)

Q : 不活性ガス導入量 (N m³/min)

X : 侵入空気量 (N m³/min)

2.2.2 操業

SUJ2 の casting 条件を Table 5 に示す。製鋼工程での極低酸素精錬と連続 casting 工程での完全無酸素雰囲気下での casting とにより、SUJ2 の酸素量は平均 5.8 ppm に低下するとともに後述のように酸化物系介在物も大幅に減少した。また、操業の面においても、浸漬ノズル内面への介在物の付着がほとんどなく、1 タンディッシュ当たりの連々 casting チャージ数は 68 チャージ、ブルーム量で 10 150 t の連々 casting が可能となつた。Table 6 はこれまでの最高連々 casting の実績内容である。

2.3 圧延および加工

以上の EF-LF-RH-CC 工程により製造された SUJ

2 ブルームは再加熱・ソーキング工程を経て、3 ロールプラネタリーミル (PSW) によりビレットに圧延され、圧延工場で棒鋼に圧延される。また鋼管は、上述の PSW によるビレットから圧延または押し出し法によつて製造され、さらに冷間ピルガー圧延機によつて冷間加工する場合が多い。なお適切な熱処理が各工程間で行われる。

3. CC による SUJ 2 の品質水準

3.1 供試材および調査方法

3.1.1 供試材化学成分

寿命試験を行つた供試材の化学成分を Table 7 に示す。これらをスラスト試験片に加工後、835°C×20' 加熱後油焼入し、さらに 180°C×90' 加熱後空冷した。これによつて試験片の硬さは HRC 62~63 となる。

3.1.2 酸素分析

酸素量の分析には不活性ガス融解熱伝導度測定法による酸素定量装置を用い、NBS 1094 および社内標準試料による二点較正法によつて測定した。NBS 1094 は酸素量が 4.5 ppm なのでこれ以下の測定値は外挿によつて求めた。

3.1.3 清浄度の判定

酸素含有量の低下による清浄度の改善度を調査するため JIS 法、ASTM-D 法などで判定することを検討したが、これらの方法は清浄度の差が数字として明瞭に現れにくいので、ここでは軸受鋼の清浄度の判定に適している ASTM A 295-84 の "SAM" 法を用いた。この方法では転がり寿命と大きな関連のない A 系 (硫化物)、軸受鋼中にはほとんど存在しない C 系 (珪酸塩)、および薄型の D 系 (球状酸化物) を判定対象に含めていない。SAM 法では次のようにして清浄度を判定する。

1) B 系介在物

a) 係数 1.5 以上の薄型介在物が存在する視野数を記録する。

b) 係数 1.0 以上の厚型介在物が存在する視野数を記録する。

c) 上記の視野数を合計し、合計検鏡面積 (in² 単

Table 7. Chemical composition of SUJ 2 tested.

heat	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	sol. Al	O	Remarks
A	0.97	0.21	0.40	0.011	0.011	0.04	1.41	0.01	0.07	0.0041	0.014	0.0004	Fig. 8
B	0.98	0.27	0.36	0.015	0.009	0.05	1.39	0.01	0.06	0.0035	0.017	0.0004	"
C	0.99	0.19	0.38	0.017	0.007	0.07	1.44	0.01	0.05	0.0038	0.015	0.0004	"
D	0.99	0.23	0.42	0.014	0.013	0.06	1.40	0.01	0.03	0.0045	0.022	0.0005	"
E	1.00	0.29	0.40	0.012	0.004	0.06	1.44	0.01	0.08	0.0033	0.020	0.0005	"
F	0.98	0.29	0.45	0.019	0.015	0.04	1.46	0.02	0.09	0.0025	0.015	0.0008	Fig. 9
G	0.97	0.30	0.42	0.012	0.010	0.04	1.43	0.01	0.05	0.0030	0.022	0.0011	"
H	0.98	0.22	0.35	0.007	0.001	0.04	1.42	0.01	0.02	0.0010	0.011	0.0007	Fig. 8
I	0.99	0.19	0.34	0.015	0.003	0.04	1.34	0.01	0.04	0.0014	0.015	0.0003	"

位) で除する。

2) D系介在物

- a) 係数 0.5 以上の厚型が存在する視野数を記録する。
- b) 係数 0.5 の視野をポイント 1, 係数 1 の視野をポイント 2, 係数 1.5 の視野をポイント 3……とする。
- c) これらのポイントを合計し, 合計検鏡面積 (in² 単位) で除する。

この方法は 通常の ASTM-A 法やD法 よりも清浄度の差異を把握しやすいといわれている。

3.1.4 寿命試験

寿命試験にはスラスト型転がり疲労試験機¹⁾を用いた。この試験機による寿命は実体軸受のそれと定性的によく一致するといわれている²⁾。試験条件は次のごとくである。

試験面圧 (P_{max}): 500 kgf/mm²

応力くり返し速度: 1800 c.p.m.

潤滑油: #60 スピンドル油

3.1.5 中心軸を含む寿命試験片

中心軸を含む寿命試験片の採取方法を Fig. 6 に示す。

3.1.6 はく離位置の表示

転動軌跡上のはく離の位置を鋼材の中心線からの角度で表現し, Fig. 10 に示したように第 I~IV 象限の数値を第 I 象限にまとめた形で表示した。

3.1.7 冷間圧延管の寿命試験

冷間圧延管およびその母管の寿命試験は, 鋼管を 650 °C で平板に加工し, 鋼管の外側側で行った。

3.2 品質水準

3.2.1 酸素量

連続鋳造法による SUJ2 鋼材 (CC 材) と従来の造

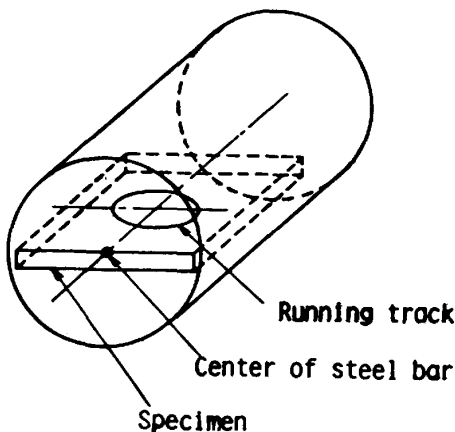


Fig. 6. Running track of rolling contact fatigue life test specimen.

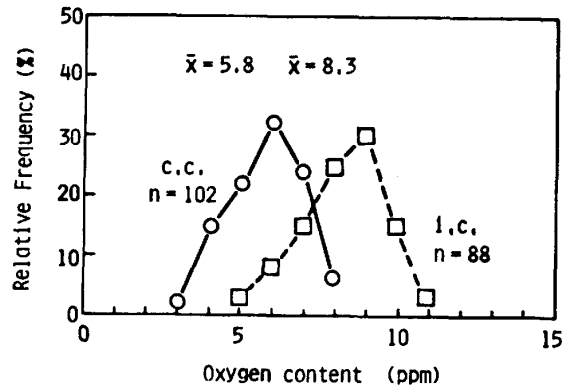


Fig. 7. Oxygen distribution of SUJ 2. (n: number of heats)

Table 8. Nonmetallic inclusions rated to "SAM" method.

Process Inclusion	CC*	IC**
Type B	0	0.4
Type D	0	0.8

* Continuous cast, No. of heats: 66
** Ingot cast, No. of heats: 90

塊法によるそれ (IC 材) の酸素含有量のヒストグラムを Fig. 7 に示す。CC 材の方が IC 材より平均 2.5 ppm 低下しており, 最大値も低下している。また現在のところ酸素の分析用標準試料における酸素の最小値は NBS 1094 の 4.5 ppm (標準値) であるから, これ以下の分析値の信頼性に問題がないとはいえないが, 酸素含有量が 5 ppm 以下の SUJ2 が生産されていることは事実である。この酸素含有量は真空アーク再溶解軸受鋼の酸素含有量とほぼ同等となつている。

3.2.2 清浄度

上述のように CC 材と IC 材の間に酸素含有量の明瞭な差が認められたので, それらの清浄度を調査した。

"SAM" 法による清浄度の判定結果を Table 8 に示す。

判定結果によるとヒート当たりの平均として CC 材では指数 1.5 以上の B 系薄型介在物, 同じく 1.0 以上の厚型介在物および指数 0.5 以上の D 系厚型介在物がほとんど存在しないことがわかる。このように CC 材の成績が IC 材より良好なのは前述のように酸素含有量が低いことによるものである。

3.2.3 寿命

1) CC 材の寿命

CC 材の酸素量は上述のように低いから良好な寿命が得られる可能性がある。最近の CC 材の寿命試験結果を Fig. 8 に示す。この結果は従来得られている酸

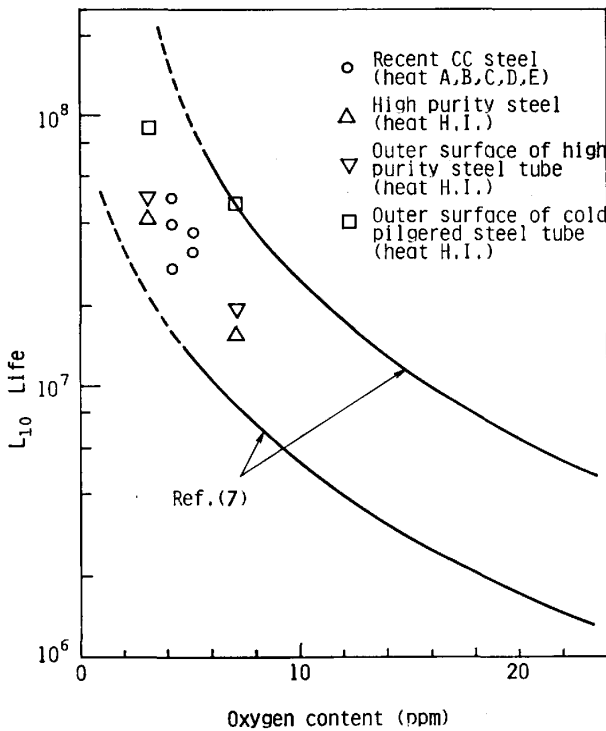


Fig. 8. Effect of oxygen content on rolling contact fatigue life of SUJ 2.

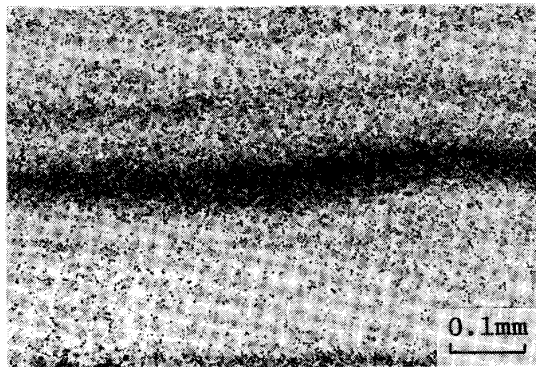


Photo. 1. Microstructure of center segregation in continuous cast SUJ 2. (65φ, life test specimen)

素量- L_{10} 寿命 (90% 残存確率寿命) 曲線の上に乗っており, IC 材の平均酸素量である 8~9ppm に相当する L_{10} 寿命より 2~3 倍良好な寿命が得られている。

2) 中心偏析と寿命

従来から CC 材の中心部の偏析は IC 材のそれより大きいといわれており, 鋼材の諸性質に及ぼすその影響が問題となる。

SUJ2 の場合鋼材の中心部に炭素や非金属介在物が濃化すると転がり寿命が低くなるのが考えられるので, 鋼材の中心部が転動面上に出現するよう Fig. 6 のごとく試験片を作成し寿命試験を行った。Photo. 1 に鋼材

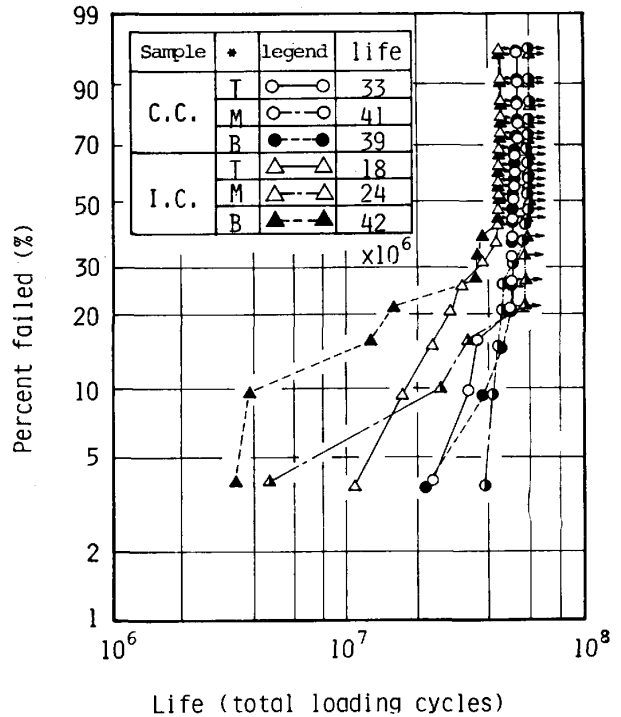


Fig. 9. Weibull distribution of rolling contact fatigue life test (longitudinal section).
* Position of bloom or ingot.
C.C. : continuous cast (heat F)
I.C. : ingot cast (heat G)

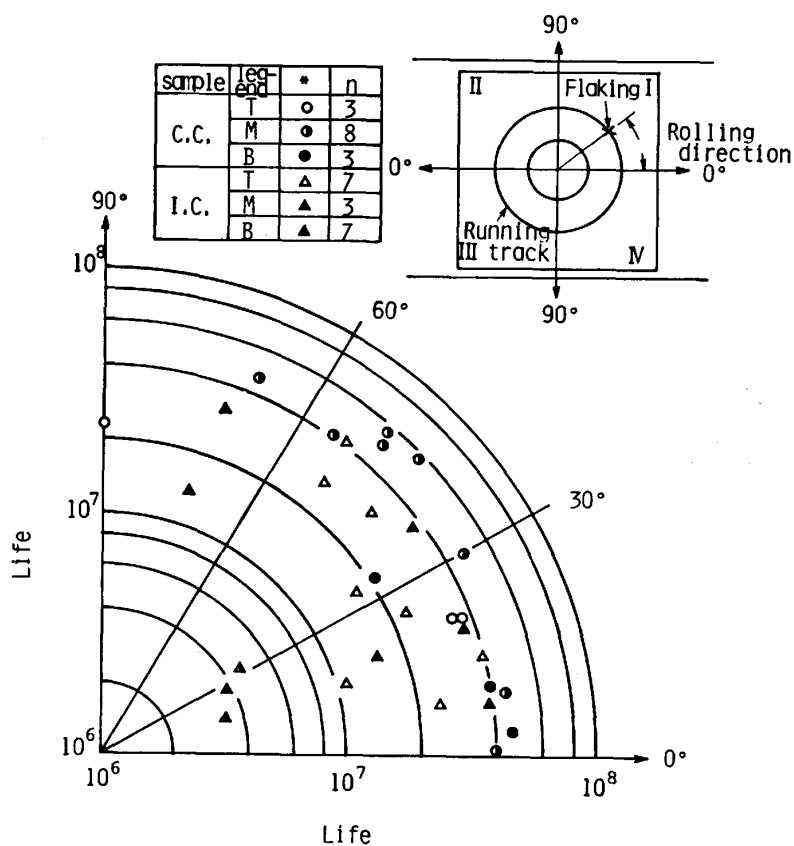
中心部のマイクロ組織を示す。

寿命試験結果を Fig. 9 に示し, このときのはく離発生位置 (はく離位置の鋼材中心線からの角度) と寿命との関係を Fig. 10 に示す. 寿命の絶対値は酸素量の少ない CC 材の方が良好であるが, はく離発生位置は CC 材と IC 材とであまり差はなく, CC 材において特に中心部にかたよつてはく離が発生しているという傾向はない。

酸化物系介在物は転動応力によつて拡散した炭素を捕捉し, ミクロき裂や板状炭化物の生成媒体として作用⁹⁾する. 一方鋼材中心部の炭素の偏析度 (C/C_0 , C: 中心の炭素量, C_0 : レードル値) は CC 材で約 1.15, IC 材では鋼塊の部位によつて異なるが 0.9~1.15 程度であるから CC 材のそれが極端に高いわけではない. 基地中の炭素が多い場合は寿命が低下する⁹⁾が, 拡散する炭素が多くてもそれを捕捉する酸化物系介在物がなければ寿命は低下しない. したがつて CC 材で中心にはく離が集中しないのは酸化物系介在物が全断面にわたつて均一に減少しているためであろう。

3) 極低不純物化と寿命

最近酸素, 硫黄, チタンなどの不純物を低減させて寿命を改善する試みが各所で行われている⁵⁾⁶⁾. そこで



* Position of bloom or ingot.
C.C.: continuous cast.
I.C.: ingot cast.

Fig. 10. Relationship between flaking site on the test piece and fatigue life.

EF-LF-RH-CC 工程でこれらの不純物を低減させた供試材を溶製し、寿命試験を行った。得られた結果をFig. 8 にあわせて示す。Fig. 8 には鋼中酸素量と L_{10} 寿命とについて従来得られている関係⁷⁾ が示してある。これによると酸素以外の不純物を低減しても寿命は必ずしも改善されず、鋼中酸素量- L_{10} 寿命のバンドの中にある。硫黄とチタンを低減しても寿命が改善されないことについては別に行った実験⁸⁾ でも確認されており、定性的に本実験と一致している。

4) 冷間圧延と寿命

SUJ2 を約 70% の減面率で冷間ピルガー圧延を行うと酸化物系介在物の破碎と硫化物系介在物の延伸とによって平均約 3 倍以上寿命が向上することがわかっている⁷⁾。これは酸素量が 6 ppm 以上の供試材について判明した結果であり、酸化物系介在物の破碎による寿命向上効果は酸化物系介在物が多い場合ほど顕著であると考えられるので、ここではその含有量が少ない場合の冷間ピルガー圧延の寿命に及ぼす影響について(3.2.3-3)と同じ供試材を用いて調査した。

実験結果を Fig. 8 に併記した。これによると冷間加工によって寿命は向上しており、若干ばらつきはあるが、大略 2~3 倍の寿命向上となっている。これはすで

に報告した⁷⁾ ように酸化物系介在物の破碎と硫化物系介在物の延伸によるものと考えられるが、これらの供試材はいずれも硫黄量が少ないので硫化物の延伸による寿命向上効果は少なく、どちらかという酸化物系介在物の破碎による効果が大きいと考えられる。

以上の結果から量産 SUJ2 としては CC-冷間圧延工程の鋼管が最も長寿命であると考えられる。

3.2.4 まとめ

以上のように SUJ2 の CC 材は酸化物系介在物が少ないためすぐれた寿命を示す。このように酸化物系介在物の減少によって寿命が向上するのは次の理由によると思われる。すなわち転動応力によって拡散した炭素は転動面下の最大せん断応力作用域付近で、酸化物系介在物の間に形成された応力集中域で転位に捕捉されてマイクロき裂を生じさせるか、拡散した炭素が多い場合には板状炭化物となつてマイクロき裂生成の原因となるが、その原因となる酸化物系介在物が CC 材のように少ない場合は上述のマイクロき裂が生じにくいことになる。したがって CC 材は中心での炭素の濃化が多少多いにもかかわらず、はく離位置が中心部に集中せず長寿命となるのは酸化物系介在物が全断面にわたって少ないためである。

4. 結 論

EF-LF-RH-CC を主体とする SUJ2 の製造と品質水準について述べた。得られた結論は次のとおりである。

- 1) CC 材の酸素含有量は従来の IC 材より 2.5 ppm 低下した。
- 2) 溶鋼の低酸素化により浸漬ノズルへのアルミナの析出が減少し, 1 タンディッシュ当たり 10 000 t の連々鑄が達成された。
- 3) 酸素量が低下したことにより CC 材の寿命は従来の IC 材のそれより 2~3 倍向上した。
- 4) 酸素量が 5 ppm 程度であつても冷間圧延によりさらに 2~3 倍寿命が向上する。

5) 硫黄, チタンを低減しても寿命向上には結びつかず, 寿命は酸素量- L_{10} 寿命の範囲内にある。これは低酸素化してもなお酸素の寿命への影響が大きいことを示すものであろう。

文 献

- 1) 上野 学, 中島宏興, 池田定雄: 鉄と鋼, 46 (1960), p. 344
- 2) 古村恭三郎, 平川 清, NSK Bearing Journal (1979) 638, p. 1
- 3) 坪田一一: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2037
- 4) 坪田一一: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 1487
- 5) 大西稔泰, 川崎正蔵, 鈴木康夫, 塩飽 潔, 上野伸熹, 土井健司: 鉄と鋼, 71 (1985), S 262
- 6) 高田八束, 菊池永喜, 熊谷憲一, 森 甲一, 小松柳三: 鉄と鋼, 70 (1984), S 1366
- 7) 坪田一一, 大西公雄, 坂上高志, 石原晟好: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 854
- 8) 坪田一一: 未発表