
細引き用連铸製軟鋼線材の特性

Properties of Continuously Cast Low Carbon Steel for Fine Drawable Wire Rods

峰 公雄(Kimio Mine) 藤田 利夫(Toshio Fujita) 佐々木 徹(Toru Sasaki) 船越
督巳(Tokushi Funakoshi) 浅川 貞夫(Sadao Asakawa) 山本 義治(Yoshiharu
Yamamoto) 上杉 浩之(Hiroyuki Uesugi) 岡田 和男(Kazuo Okada)

要旨：

リムド鋼に代替え可能な細引き用軟鋼線材用素材を成分およびフェライト結晶粒径などから検討し、連铸化に成功した。その成分は低 Al-低 N-極低 C-極低 Si 系であり、線材は次のような優れた材料特性を有している。(1) α 結晶粒径が大きく、パーライト量が少ないので、リムド鋼より低強度、高延性の材料である。(2) 伸線加工による硬化および脆化が少なく断線発生率はリムド鋼より低い。(3) 伸線加工時の軟化焼鈍では、昇温速度依存性が小さく、また同一強度を得るのにリムド鋼より約 60℃低温加熱でよい。

Synopsis：

Bloom continuously cast to replace the conventional rimmed type has been produced for fine drawable low carbon wire rods. The composition is based on low Al, low N, low C not over 0.03% and also low Si less than 0.03%. The wire rods rolled from the continuously cast bloom show the following characteristics in comparison with the conventional rimmed steel counterpart. (1) Larger α grain size and smaller proportion of pearlite contribute to lower strength and higher ductility. (2) Rupturing ratio at drawing is less because of lower work hardening and embrittlement. (3) Because of its small dependence on heating rate in soft annealing after wire drawing, the same strength as of rimmed steel is obtained at 60℃ lower heating temperature.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

細引き用連鑄製軟鋼線材の特性

Properties of Continuously Cast Low Carbon Steel
for Fine Drawable Wire Rods峰 公 雄*
Kimio Mine藤 田 利 夫**
Toshio Fujita佐々木 徹*
Toru Sasaki船 越 督 已***
Tokushi Funakoshi浅 川 貞 夫****
Sadao Asakawa山 本 義 治*****
Yoshiharu Yamamoto上 杉 浩 之*****
Hiroyuki Uesugi岡 田 和 男****
Kazuo Okada

Synopsis:

Bloom continuously cast to replace the conventional rimmed type has been produced for fine drawable low carbon wire rods. The composition is based on low Al, low N, low C not over 0.03% and also low Si less than 0.03%. The wire rods rolled from the continuously cast bloom show the following characteristics in comparison with the conventional rimmed steel counterpart.

- (1) Larger α grain size and smaller proportion of pearlite contribute to lower strength and higher ductility.
- (2) Rupturing ratio at drawing is less because of lower work hardening and embrittlement.
- (3) Because of its small dependence on heating rate in soft annealing after wire drawing, the same strength as of rimmed steel is obtained at 60°C lower heating temperature.

1. 緒 言

細引き用軟鋼線材用素材は、従来低炭素リムド鋼が用いられ、加工メーカーにおけるこの鋼種での伸線および成形などの加工技術はすでに確立されているといえるが、さらに、高速伸線や工程合理化などの生産性向上に対応するために一層の製品品質の安定が望まれ、これに適応する品質をもつ線材製造技術の発達がせまられている。リムド

鋼では頭部偏析および大型介在物の生成は避けられないが、連続鑄造法は、均一な材質が得られる¹⁾ばかりでなく、省資源・省エネルギーの観点からも有利と考えられる。

連続鑄造では、一般に Si, Al による脱酸が不可欠であるが、これらの元素を添加すると材質が硬化する。従来のリムド鋼に代わりうる細引き用軟鋼線材用素材の連鑄化を、成分およびフェライト結晶粒径などに注目して検討した。その結果、リムド鋼と同等もしくはより優れた品質を有する線

* 技術研究所水島研究室主任研究員
*** 阪神製造所管理部部長
***** 水島製鉄所管理部条鋼管理課
〔昭和54年10月24日原稿受付〕

** 技術研究所水島研究室
**** 技術本部鋼材技術部大阪鋼材技術室主査(課長待遇)
***** 水島製鉄所管理部厚板管理課主査(掛長待遇)

材として KFR 3 の開発に成功し、需要家で好評を得ている。この鋼種の機械的性質、伸線加工性および熱処理特性などについて報告する。

2. 実験材

2.1 成分の設計

リムド鋼に匹敵する機械的性質および加工性を有し、しかも、連铸化できる成分系を決定するにあたり、C, Si, Mn など材質硬化元素の添加量、さらに Si, Si-Al, Al によるキルド化あるいは脱ガス処理などの脱酸法を検討してきた。

細引き用軟鋼線材は、加工硬化および加工脆化が少なく、伸線後の軟化焼鈍による品質の安定性を必要とする。そのためには、C, Si, Mn, Al などの固溶元素が少ないこと、 α 結晶粒が大きいこと、パーライト量が少ないこと、さらに、ひずみ時効が小さいことが必要である。

特徴的な元素の制御条件は以下のとおりである。

- (1) C は凝固時のブローホール発生と材質硬化抑制のために低下させる。
- (2) Si, Mn および P は同じく材質硬化を防ぐために低下させる。
- (3) Al は AlN 形成により、熱間圧延後のフェライト結晶粒を微細にし、また、軟化焼鈍時の昇温速度依存性を大きくするので、添加は望ましくないが、C 低下により溶鋼の酸素濃度が高くなるので、良好な内質および表面性状を有する鑄片を得るために少量添加する。
- (4) N は上記 AlN の析出と加工硬化およびひずみ時効を抑えるために低下させる。

2.2 化学成分

Table 1 に 5.5mm ϕ 線材で分析した実験材の化学成分を示す。今回報告する連铸製軟鋼線材は上段の KFR 3 であり、比較として従来の低炭リムド鋼および連铸製低炭 Al キルド鋼線材も用いている。KFR 3 は 2.1 の検討に基づき、C, Si, Mn, Al および N などを低く制御している。この成分系では O がリムド鋼と同程度に高くなるが、C 量を低く調整しているので、鑄片にブローホールの発生はなく、表面手入の必要はなかった。

2.3 製造工程および条件

200t 転炉で溶製し RH 脱ガス処理を行った溶鋼を 250mm ϕ ブルームに連続铸造し、80mm ϕ ビレットを経由して、5.5mm ϕ 線材に圧延した。

製鋼段階では成分と鑄込み温度等を制御し、線材圧延ではステルモア処理で均一に冷却した。線材の冷却条件は機械的性質と表面酸化スケールの剥離性を考慮して、捲取温度および冷却速度を決定した。

3. 実験結果および考察

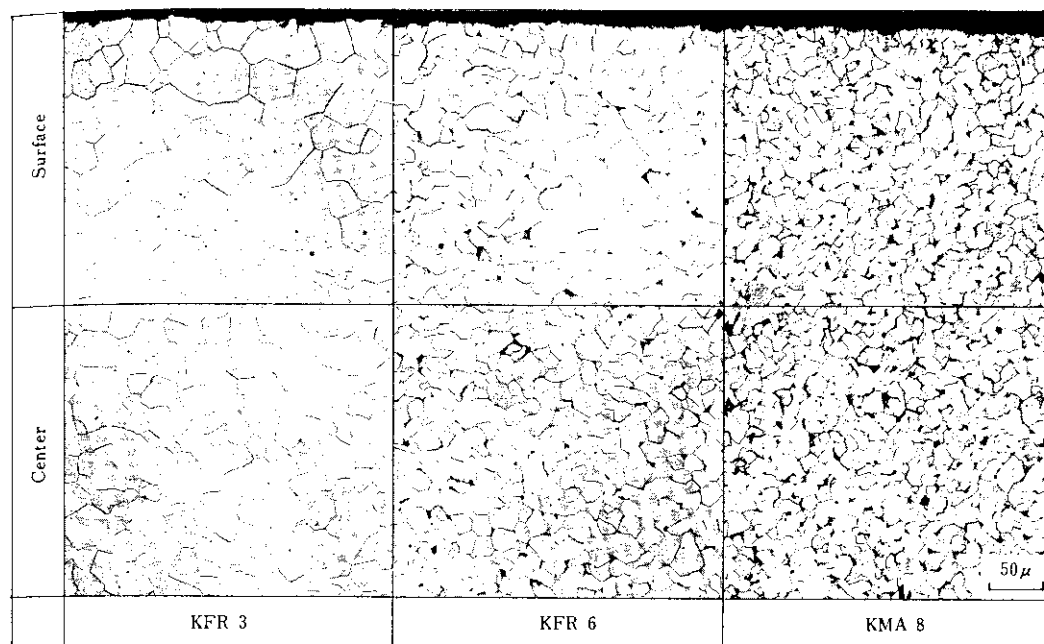
3.1 圧延材の性質

3.1.1 組織

Photo. 1 に圧延材の代表的な組織を示す。KFR 3 は結晶粒径 d が表面層および中心部ともに大きく、パーライトの生成がほとんどない。リムド鋼は表面のリム層で d がやや大きく、パーライトは少ないが、内部のコア部では d が小さく、かつパーラ

Table 1 Chemical composition of low carbon steel wire rods used for tests

Steel		C	Si	Mn	P	S	Al	N	O
Continuous cast	KFR 3	0.005	< 0.01	0.20	0.009	0.005	0.001	0.0020	0.0150
		0.022		0.30	0.010	0.020	0.005	0.0040	0.0250
Rimmed	KFR 6 and SWRM 8	0.04	< 0.01	0.25	0.008	0.007	0.001	0.0016	0.0229
		0.07		0.34	0.010	0.024		0.0027	0.0264
Al-killed	KMA 8	0.03	0.01	0.25	0.013	0.015	0.005	0.0052	0.0025
		0.07	0.02	0.35	0.015	0.027	0.020	0.0060	0.0035

Photo. 1 Optical microstructures of 5.5mm ϕ wire rods

イト生成量が多い。Al キルド鋼の d は小さく、炭素当量が幾分多いのでパーライト量は最も多い。

3・1・2 介在物

Photo. 2 に代表的な介在物と Table 2 にその組成を示す。KFR 3 の介在物はリムド鋼 KFR 6 に比べて非常に小さく、組成も SiO_2 の比率が多くなっているものの、 Al_2O_3 は同レベル以下である。したがって、Al キルド鋼の 100% Al_2O_3 組成よりは軟らかく、伸線加工でのダイス寿命への悪影響は少ないと考えられる²⁾。また、小さい介在物になっていることは伸線加工性にとって有利である。

Table 2 Inclusions in wire rods by EPMA analysis (wt. %)

Steel	Al_2O_3	SiO_2	MnO	MnS	CaO	MgO
KFR 3	0.2	18.5	24.8	0.4	0.2	~0.3
	16.9	20.5	39.1	1.9	1.1	
KFR 6	40.6	0.41	27.7	1.1	0.2	—
KMA 8	100	—	—	—	—	—

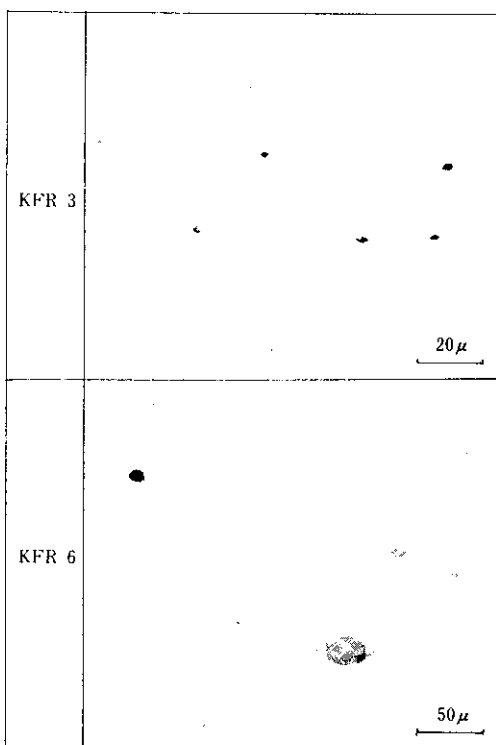


Photo. 2 Typical inclusions observed in wire rods

3.1.3 強度および延性におよぼす炭素当量の影響

Fig. 1 に 5.5mmφ 線材の引張試験値と下式で表した炭素当量 C_{eq} の関係を示す。

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{5} + \frac{\%Si}{6}$$

KFR 3 の降伏応力および引張強さは、ほぼリムド鋼と同一直線上にある。 d が小さい Al キルド鋼ではこれより高い別の直線となる。伸びは C_{eq} に対して変化せず、絞りは C_{eq} が増加するほど低下する。また、伸びおよび絞りは鋼種によらずほぼ同一直線で表される。同一 C_{eq} のとき Al キルド鋼は他の鋼種より強度が高いにもかかわらず、延性が同一直線で表されることは、Al キルド鋼は酸素が少ないので介在物が少ないこと、さらに、 d が小さいことが延性低下を防止しているからである。

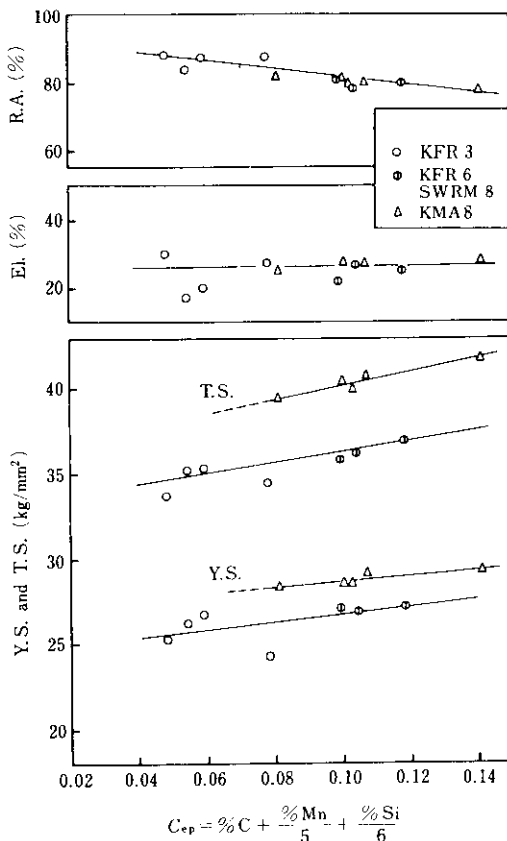


Fig. 1 Influence of carbon equivalent on the tensile properties of hot-rolled steel wire rods

この図に示されるように KFR 3 は強度が低く、延性の大きい材料であり、また、Al および N を低下させているので、リムド鋼の性質と類似し、リムド鋼の C_{eq} を低下させたものに相当する材質を示すものといえる。

3.2 ひずみ時効性

C 量の低い KFR 3 では圧延後高温で変態し、パーライトが少なく、かつ d も大きいので、C の析出サイトは少なく、かえって固溶量の増加することが心配される。これにともないひずみ時効脆化が大きくなる恐れがあるので、Aging Index (A.I.) を測定した。方法は 7% 予ひずみを与えた後、100°C で強制時効し、再引張時の flow stress の増加量を A.I. とした。結果を Fig. 2 に示す。

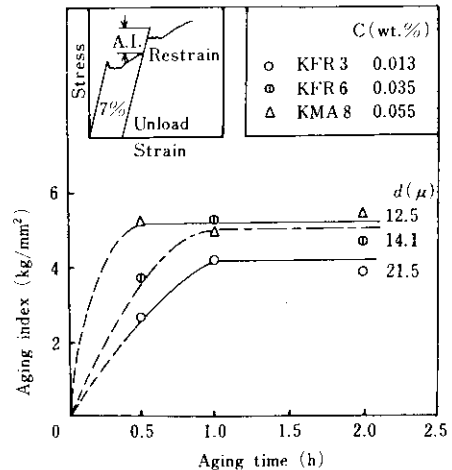


Fig. 2 Increase in yield stress by aging at 100°C for 5.5mmφ wire rods prestrained 7%

時効速度に d の影響が認められ、 d の大きい KFR 3 は遅い。また長時間時効後の飽和値はリムド鋼、Al キルド鋼より KFR 3 のほうがわずかに小さい。

したがって、この A.I. 測定結果から、KFR 3 のひずみ時効性はリムド鋼より小さいか同程度と考えられる。

3.3 伸線による材質変化

3.3.1 伸線条件

伸線加工特性を調査するために、Table 3 に示

Table 3 Drawing test condition

Test	Surface preparation	Schedule (mm ϕ)	Drawing speed (m/min)
A	MD Borax	5.5 $\rightarrow$ 0.8 13 dies	1000
B	Pickling Borax	5.5 $\rightarrow$ 0.8 14 dies	400

すA、Bの条件で伸線し、引張試験と捻回試験を行った。

Aでは表面酸化スケールをベンディング・ローラーで機械的に剥離した後、ボラックス処理して0.8mm ϕ まで13枚のダイスを用いて伸線した。仕上速度は毎分1000mの連続伸線である。Bでは酸洗後ボラックス処理して、単釜ダブルデッキ伸線機を用いた。以下では主にAの条件で伸線した結果を述べるが、条件Bでも鋼種、成分により表れる試験値の変化の傾向はAと同じであった。

3.3.2 伸線による強度および延性の変化

Fig. 3に加工硬化曲線を示す。加工硬化率 $\Delta T.S./\Delta \epsilon$ はKFR 3が15.6kg/mm²と16.7kg/mm²のリムド鋼より小さく、Alキルド鋼は18.8kg/mm²と最も大きい材料である。

Fig. 4にこのときのR.A.と捻回値の変化を示す。

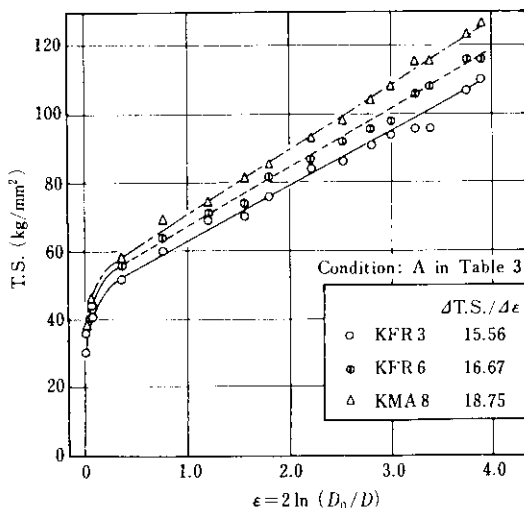
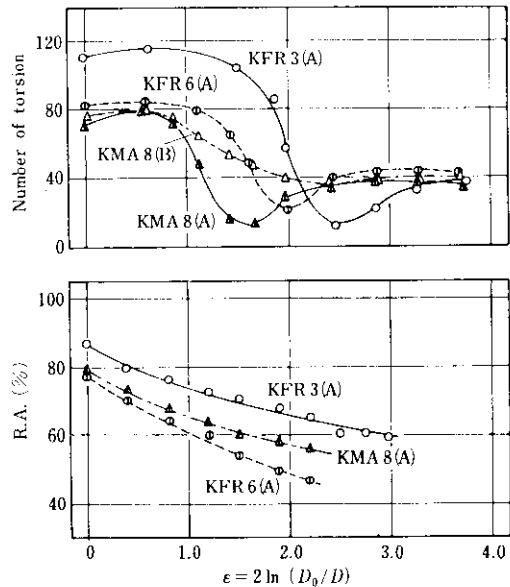


Fig. 3 Work hardening curves during drawing



A and B show drawing condition in Table 3

Fig. 4 Change of R.A. and number of torsion with drawing strain

KFR 3のR.A.は他の鋼種より常に大きい値を示し、また、捻回値は $\epsilon = 2.0$ 以下の領域で他の鋼種より大きく、かつ、極小値も高ひずみ側にある。

これらからKFR 3は加工硬化および加工脆化が小さく、伸線加工性が良好な線材であることを示している。

3.3.3 加工硬化および加工脆化への炭素当量の影響

Fig. 5に加工硬化率と加工脆化の目安となる捻回値が、極小を示す伸線加工ひずみを C_{eq} に対してプロットした。これから C_{eq} が多くなるほど加工硬化率は大きくなり、加工脆化する傾向を示すこと、 d の小さいAlキルド鋼の加工硬化率はKFR 3およびリムド鋼で示される直線より大きいこと、また、捻回値極小のひずみ量はいずれの鋼種もほぼ同一の曲線で示されることがわかる。

C_{eq} に対する各特性値をみると、強度に関するものはAlキルド鋼のみ別グループにプロットされ、延性に関するものは3鋼種がほぼ同一の曲線で表されるのは先のFig. 1と同じである。このような挙動に対して組織の影響が推定されるので、 C_{eq} に対して d およびパーライト量の関係をみたものがFig. 6である。 d は C_{eq} が少ないほど大き

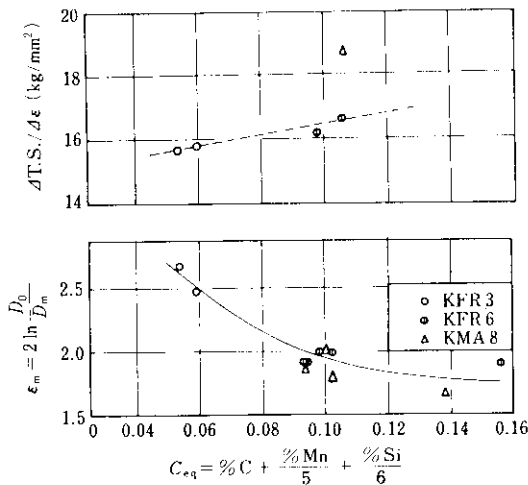


Fig. 5 Effect of carbon equivalent and material on the work hardening rate $\Delta T.S./\Delta \epsilon$ and strain ϵ_m showing min. number of torsion

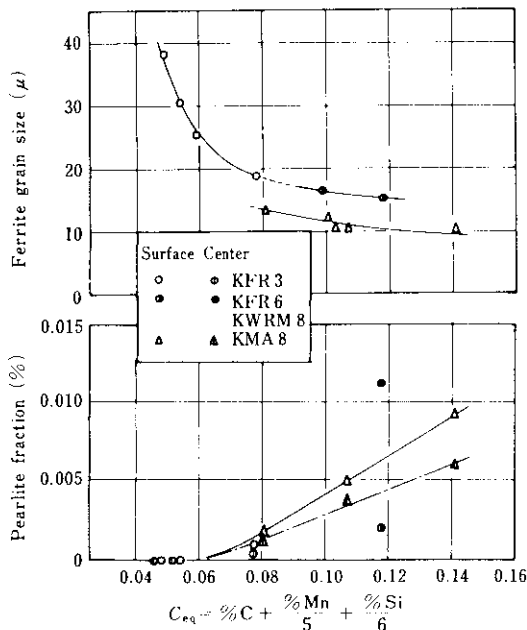


Fig. 6 Effect of carbon equivalent on ferrite grain size and pearlite fraction of 5.5mmφ wire rods

い傾向を示す。これは圧延後の冷却中に高温で変態するために、熱的にも粒成長しやすく、また、C、SiおよびMnなどによる粒成長抑制作用が少ないことによる。ただし、Alキルド鋼はKFR 3およびリムド鋼よりAINの影響で d が小さくなってい

る。 C_{eq} に対する各特性値の変化で、Alキルド鋼の挙動の原因はこの点にも起因している。パーライト量は当然のことながら C_{eq} が多くなると増加する。

以上のように、KFR 3は C_{eq} を少なくしているため、 d が大きく、パーライト量が少ない。このために、強度が低く、加工硬化も抑えられ、伸線加工後の延性の低下が少ない³⁾である。

3・3・4 伸線加工性へのパーライトの影響

軟鋼線材の伸線加工性へのパーライトの影響は良く知られていない。そこで、伸線加工で生じる内部クラックの発生状態を走査型顕微鏡で観察した。その例をPhoto. 3に示す。

クラックはパーライト粒内、パーライト-フェライト界面、フェライト粒界に存在するフィルム状セメントイトおよび介在物から発生している。高炭素鋼線材では伸線加工が進むにつれ、ほぼ伸線加工ひずみに相当するパーライト粒の変形が認められる⁴⁾が、軟鋼線材では圧倒的に多いフェライトが高加工ひずみまで変形を受けもっており、パーライト粒の変形は進んでいない。

したがって、パーライトはクラックの有力な起点であり、これが多いものほど伸線加工中のクラックの発生が多いうえ、伸線加工後もパーライト粒が大きいまま残るので、外部応力に対して第2相として働きそこからの新たなクラックが発生するなど、パーライト量の多いものほど加工脆化しやすいものといえる。KFR 3はパーライトの生成量が少ないので、この面からも加工脆化が少なかったものといえる。

3・4 熱処理特性

伸線後の軟鋼線材では、一般にポット炉でコイル状に巻かれた状態で軟化焼鈍される。この加熱炉内の位置により昇温速度が異なる。そこでKFR 3が昇温速度によりどのような挙動を示すか調査した。結果をFig. 7に示す。KFR 3の強度はリムド鋼と同様に昇温速度の影響を受けず変化しない。これはAlおよびNが少ないために、再結晶粒径が昇温速度に影響されないためと考えられる⁵⁾。

一方Alキルド鋼では昇温速度が早くなると強度の昇上が認められる。Fig. 8は昇温速度を一定

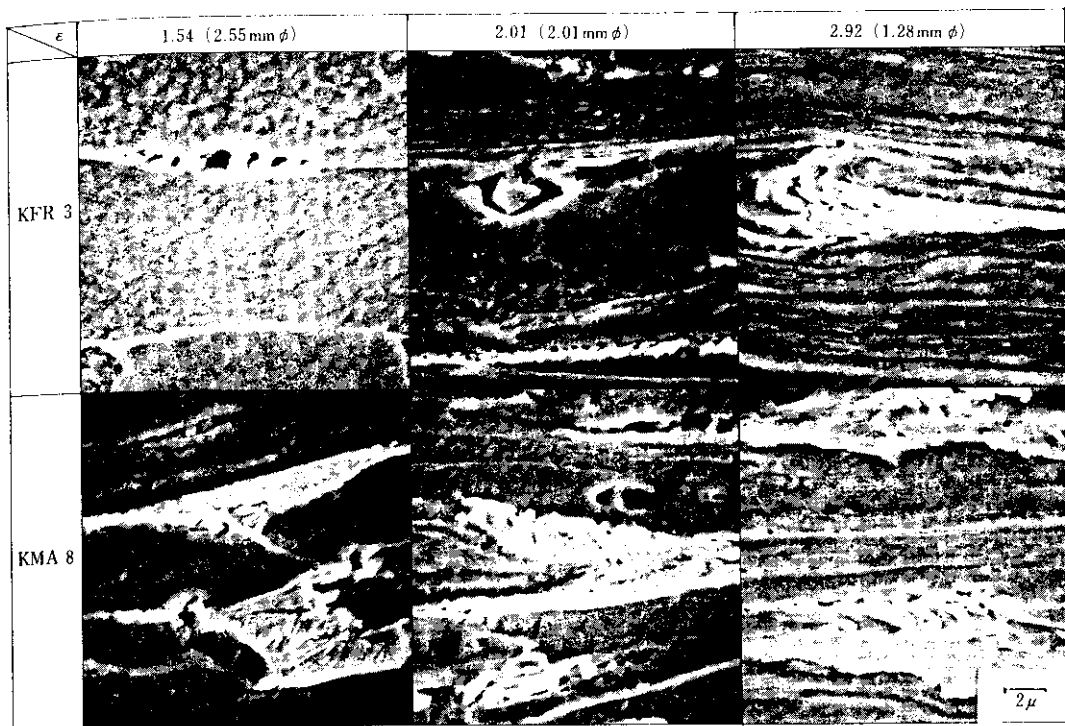


Photo. 3 Microscopic appearance of cracks by drawing (longitudinal section)

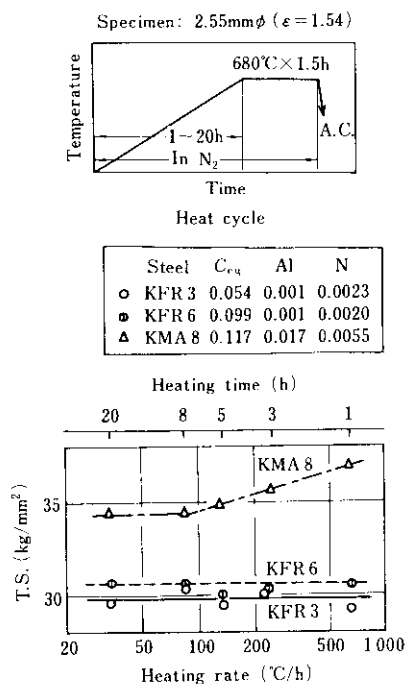


Fig. 7 Effect of heating rate for softening on the tensile strength of wires

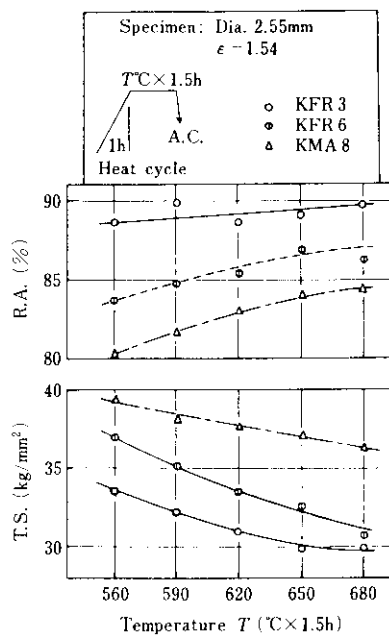


Fig. 8 Effect of softening temperature on the tensile strength and R.A. of drawn wires

にして保持温度を変えた結果である。保持温度が高くなるほど強度は低下する。KFR 3は3鋼種中同一温度で最も低く、同一強度を得るにはリムド鋼より約 60℃低温で熱処理できることを示している。また、この時の絞り率は十分大きい値である。

これから、軟化焼鈍後の KFR 3は延性に優れ、かつ、均一で安定した機械的性質が低温熱処理によって得られることがわかる。

4. 需要家での使用状況

KFR 3 およびリムド鋼の 5.5mmφ線材を、需要家において Table 4 に示す伸線条件で、継続的に大量の伸線実験を行った。A および B の条件とも連続伸線である。各条件での断線発生率（伸線量 1t あたりの断線回数）の月間推移を Fig. 9 に示す。

Table 4 Drawing condition for rupturing test

Test	Surface preparation	Schedule (mm φ)	Drawing speed (m/min)
A	MD Borax	5.5 → 0.8 13 dies	1000
B	Pickling Borax	5.5 → 0.6 15 dies	600

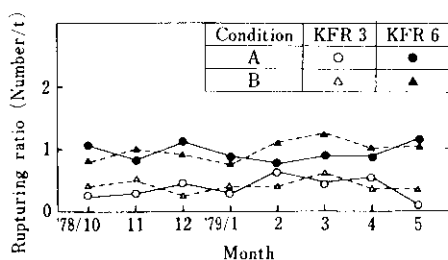


Fig. 9 Change of rupturing ratio

A および B のいずれの伸線条件でも KFR 3 の断線発生率はリムド鋼よりも低く、実操業における伸線加工性が優れていることは明らかである。

また、前述のように KFR 3 の場合、伸線後の軟化焼鈍において同じ強度を得るのに必要な焼鈍温度がリムド鋼より 60℃ も低いことから、需要家における焼鈍温度の低下および保持時間の短縮などの省エネルギー効果に役立っている。

さらに加工硬化が小さい特徴を利用して細引き以外の用途たとえば冷間圧造用などに使用され、従来のリムド鋼では軟化焼鈍しなければ成形できなかった厳しい加工に用いても全く問題なく使用できることも確認されている。

5. 結 言

低炭素リムド鋼に代わる連铸用鋼種として、C, Si, Al および N を低く抑えて製造した KFR 3 は、α 結晶粒径が大きくパーライト量の少ない組織を有する低強度高延性の材料である。このために、この線材は伸線による加工硬化および加工脆化が小さく断線が少ない。さらに、伸線後の軟化焼鈍では機械的性質の昇温速度依存性が小さく、かつ、低温熱処理でリムド鋼と同等の強度を付与できる。

このように、KFR 3 は従来の低炭素リムド鋼より優れた性質を有する細引きに適した新製品であり、生産性向上、製品品質の安定および省エネルギーに大きく寄与する材料といえる。

今後も伸線加工あるいは冷間鍛造などでの生産性向上に応える線材を鋭意開発していく所存である。

終わりに、この線材の開発に当り有益かつ適切な評価をいただいた二藤レー株式会社殿に厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 千野, 中井, 山本, 大坪, 中川, 峰, 藤田: 鉄と鋼, 63 (1977), S93
- 2) 線材及び線分科会: 特殊鋼, 26 (1977) 12, 41
- 3) T. Gladman, B. Holmes & F.B. Pickering: JIS1, 208 (1970), 172
- 4) 例えば, N. Lambert: CRM No. 40 (1974), 43
- 5) 音谷, 形浦, 福田: 鉄と鋼, 57 (1971), 566