技術資料

Technical Paper

高硬度電磁ステンレス鋼 K-M57 の開発

江幡貴司^{*}，滝口常美^{*}

Development of a High Hardness Soft-Magnetic Stainless Steel K-M57

Takashi Ebata and Tsunemi Takiguchi

Synopsis

Voices of our customers in late 1990s requiring soft-magnetic steels with high hardness for high wear resistance and high durability drove us to launch research and development and we have succeeded in developing a new steel K-M57, Fe-15Cr based precipitation-hardened ferritic steel by modifying a base steel with high hardness above 400HV but not quite satisfactory concerning magnetic properties and manufacturability.

A simple relationship between concentrations of alloy elements and matrix phase has been found around the composition of base steel which gave us a confirmation about stability of ferritic matrix and helped us to design the new steel.

Newly developed K-M57 has both high hardness ($>350\text{HV}$) and high performance soft-magnetic properties ($H_c < 100\text{A/m}$, $\mu_{\text{max}} > 2500\text{ }\mu\text{H/m}$, $B_{2000} > 1.2\text{Tesla}$) simultaneously, which satisfy the requirements of magnetic cores of various types of solenoid valves including fuel injectors of automobiles. It also has high corrosion resistance and high electric resistivity ($> 90\text{ }\mu\text{-cm}$) suitable for highly responsive devices. K-M57 has also good manufacturability due to low hardness ($< 250\text{HV}$) after solution treatment which enables cold-drawing. Machinability is not less than SUS304 containing 0.02mass%Sulfur.

It is expected that the demands for the new steel will further extend because of its potential for expanding freedom of solenoids' design and eliminating surface hardening treatment of parts as well as of eco-friendliness from them.

1．はじめに

東北特殊鋼の電磁ステンレス鋼は、産業機器、家電、自動車等の電磁弁や燃料噴射装置等に広く使用されている。これらに要求される軟磁気特性を維持しながら、機械的には 300 ~ 350HV 以上の硬さが欲しいという顧客の声が 90 年代終り頃相次いで寄せられたため、高硬度電磁ステンレス鋼の開発に着手した。

電磁弁等のソレノイドの鉄芯として実用されている軟磁性材料¹⁾は、熱処理状態で、33HRB (電磁軟鉄) ~ 92HRB (18-20Cr 系電磁ステンレス) であり、Ni, Co 系を含めても 100HRB (約 250HV) を超えることはまずない。加工硬化によって 300HV 以上になる場合もあるが、既に軟磁性とは言い難いほど特性が劣化している。

ソレノイドの鉄芯は、アクチュエータの可動部として摺動、衝突部分を構成する場合が多い。従って、機械的な耐

久性 (耐磨耗性、耐座屈性) を付与するために、硬質 Cr メッキや窒化などの表面硬化処理を施して使用される場合も多い。これらの処理費用が、部品単品の製造コストに占める割合は数 10% になる場合もあり、さらにメッキ処理では、環境対応コストも大きな負担になってきていることなどが、顧客要求の背景にある。

2．開発目標

17-4PH に代表される析出硬化型ステンレス鋼はよく知られているが、マトリクスが、マルテンサイト或いはフェライトとの 2 相系が殆どである。フェライトにおける析出の研究^{2) ~ 5)}も報告されているが、軟磁気特性に着目したのものとしては、鈴木ら⁶⁾の発明およびこれを継承した小野寺ら⁷⁾の開発が恐らく初めてであり、軟磁性ステンレス鋼の歴史上画期的なものであった。

小野寺らによる開発鋼 K-M50 は、時効処理後の硬さで

2004 年 7 月 23 日受付

^{*} 東北特殊鋼(株)研究開発部 (Research and Development Division Tohoku Steel Co., Ltd.)

400HV 以上を実現し、1984 年頃から少量ではあるが、精密機器の磁気シールド材に使用されてきた。併し、最近のソレノイド全般の要求に対応するには磁束密度(熱処理条件によっても精々 B2000 1.1Tesla)に不満がある上に、溶体化状態でも硬さが 300HV 前後以上なので、冷間引抜きは不可能で、曲り矯正も温間でなければ難しく、棒鋼の大量生産は困難であった。

本開発では K-M50 をベースに、冷間加工性の改善を図り、時効後の硬さが 350HV 以上を有し、近年の電磁弁や自動車用燃料噴射装置等の用途にも十分対応出来る量産製造性と軟磁気特性に優れた(保磁力 H_c 100A/m, 最大透磁率 μ_m 2000 μ H/m, 磁束密度 B2000 1.2Tesla)析出硬化型電磁ステンレス鋼を目標とした。

3. 化学成分

3.1 成分検討の方法

成分設計は、ベース鋼 K-M50 の磁束密度を上げるために添加合金元素の総量を減らしても、目標の時効硬さが確保され、同時に冷間加工性改善のために溶体化硬さが 250HV になる組成を見出すことにあった。具体的には、先ず K-M50 の主要組成 15Cr-1Si-3Ni-1Al-3Cu-4Mo 付近から低組成側に種々変化させたときの磁気特性と硬さの変化を調べた。その際、Cr は耐食性とフェライトの安定性を考慮して 12 質量%, Si は保磁力等の低磁場特性と電気抵抗を考慮して 0.5 質量%, Ni は時効析出に必要な量と考えられる Ni/Al ~ 3 を大幅には超えないようにした。

試料は、アルゴン雰囲気中で少量溶解(約 7 kg) - 鑄造(約 80mm × 150L)後、20mm まで熱間鍛造(1223 ~ 1423K)で製作し、切削で磁気測定用リング(18mm × 8mm × 5t)とした。溶体化処理(ST)は、真空炉での 1300K × 2Hr 保持後窒素ガス(0.1MPa)冷却により、時効処理(AG)は、823K × 3Hr 保持後空冷とした。ST および ST-AG 処理したリング試料で、直流磁気特性(B-H ループトレーサ)を測定後、平面部を研磨してビッカース硬さ測定(HV5)を行った。

試料組成は、Schaeffler の状態図で F, M + F, A + M + F(F: フェライト, M: マルテンサイト, A: オーステナイト)領域に跨っているが、光学ミクロ組織ではいずれの試料でもマルテンサイトは未だ確認されていない。ここでは、Ni-Al 化合物²⁾および Cu の析出⁸⁾と一緒に考え易くするため、Fig.1 に模式的に示したような Fe-Cr-Ni 系の等 Cr 切断状態図⁹⁾を念頭においた。F/F + A 境界は Ni (当量)によってシフトするので、状態図との単純な関連付けが出来ることを期待して、Ni 当量と Cr 当量との差を

Fig.1. Schematic illustration of Cr constant section of Fe-Cr-Ni system phase diagram.

パラメーターにして試験結果を整理した。

3.2 成分決定

Fig.2(a) ~ (d) に、少量溶解材による硬さと磁気特性の測定結果を示す。ここで、横軸には Ni 当量 ($Ni + 30C + 0.5Mn + 0.3Cu$, mass%) と Cr 当量 ($Cr + 2Si + 5.5Al + 1.5Mo + 1.5Ti$)⁹⁾ との差に定数 20 を加えたパラメーター $G=Ni, eq-Cr, eq + 20$ をとっている。Fig.2(b) ~ (d)において、 $G < 0$ では良好な軟磁気特性を示し、 $G > 0$ では急速に劣化することから、 $G < 0$ では ST, ST-AG 状態ともマトリクスがフェライト単相で、 $G > 0$ では少なくとも 2 相領域であることが推定される。実際、Fig.3(a) ~ (c) に示すミクロ組織は、これに対応するものである。尚、Fig.3 は ST 状態であるが、AG 処理を追加した場合も、光学的には明確な変化は見られない。これらの結果から、マトリクスがフェライト単相、ST 後の硬さが 250HV 以下、

ST-AG 後の硬さが 350HV 以上、目標磁気特性が得られる、の 4 つの条件を満たす基本組成を決め、1 トン VI 溶解 ~ 熱間鍛造 ~ 線材圧延材による数回の試作試験による若干の修正を行った。

3.3 成分の特徴

Table 1 にベース鋼および比較鋼と共に開発鋼 K-M57 の代表組成を示す。ここで、K-M35FL は自動車用燃料噴射装置で多く使用されることが多く、K-M31 は世界初の電磁ステンレス鋼で、各種電磁弁に広く使われている。AISI430F は、磁性用途の汎用鋼としては最も広く用いられている。

Cr, Si, Ni, Al は、ベース鋼と結果的に殆ど変わらない

Fig.2. (a) Hardness, (b) Coercivity, (c) Magnetic flux density and (d) Maximum permeability of alloys with various G values.

Fig.3. Microstructures of solution treated alloys.

- (a) G = - 3.2 (14.2Cr, 1Si, 3Ni, 1Al, 3Cu, 4Mo, 0.007C etc.)
 (b) G = 1.8 (14.2Cr, 1Si, 2.7Ni, 0.5Al, 1.7Cu, 2Mo, 0.2Mn, 0.2Ti, 0.013C etc.)
 (c) G = 4.1 (12.8Cr, 0.7Si, 2.7Ni, 0.5Al, 1.7Cu, 1.9Mo, 0.2Mn, 0.006C etc.)

Table 1. Typical chemical composition of K-M57.

Brand Name	C	Si	Mn	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	Pb
K-M57	0.01	1.0	0.2	0.02	0.5	2.9	14.5	2.0	0.9	0.2	-
Base material											
K-M50	<0.01	1.0	<0.1	<0.01	3.0	3.0	15	4.1	1.1	0.2	-
Reference											
K-M35FL	0.01	0.8	0.3	0.02	-	-	13	-	0.3	-	0.2
K-M31	0.04	2.2	0.3	0.02	-	-	13	-	-	-	-
AISI430F	0.02	0.5	0.5	0.3	-	-	18	0.4	-	-	-

なったが, Mo, Cu をベース鋼よりも大幅に減らして磁束密度を改善している。

Cu は, 2% 以下では硬さへの寄与は小さく, 寧ろ時効硬化速度の調整機能に意味がある。これは Ni-Al 系化合物よりも高温で析出する δ -Cu⁹⁾ が, Ni-Al 系の優先析出サイトになる⁵⁾ ことによると考えられる。このとき Cu が 1% 以上では, 軟化目的の溶体化工程で部分的に時効硬化が進み, 冷間引抜きや曲り矯正に支障を来す恐れがある一方, 少な過ぎると顧客が部品加工後に行う ST-AG 処理の時間が長くなってしまいうので, 0.5% 程度にした。Fig.4 に, 0.1Cu と 0.5Cu 時の時効硬化挙動の違いを示す。また Fig.5 に, K-M57 の時効温度と硬さとの関係を示すが, 820 K 付近で最高時効硬さになる。

また, ベース鋼では軟磁気特性の劣化を防止するために C, Mn, S を非常に低く抑えているが, 出来るだけ製造し易い鋼種を目指して, 極端に C, S を下げなくとも軟磁気特性が劣化しないように, Ti の C, S 固定作用によるマトリクスの低 C, S 化^{10,11)} を利用した。Fig.6 では, Ti 添加

Fig.4. Cu content dependence of age hardening rate. Solution treated at 1323K and aged at 823K.

の磁気特性改善効果が顕著に見られるが, これは快削化効果が殆どないくらいの S 量 ($< 0.03\text{mass}\%$) では, 磁壁ピンングの効果が小さいためと考えられる。

Fig.5. Aging temperature dependence of hardness. Solution treated at 1323K and aged for 3hr.

Fig.6. Effect of Ti addition on magnetic properties.

Fig.7. Manufacturing process of K-M57 ground bar.

4. 製造工程

K-M57 は、溶体化状態でも従来の切削用電磁ステンレス鋼より硬いので、冷間鍛造に使用されることは想定しておらず、切削加工用棒鋼のみの製造工程となる。Fig.7 に、センタレス磨き棒鋼の量産製造工程の概要を示す。

溶解／ casting は、現在大同特殊鋼(株)渋川工場の 9 トン真空溶解炉で 2.5 トン鋼塊に casting し、分塊から溶体化処理 (1) までは同社星崎工場に製造を委託している。溶体化処理 (1) は、後工程の冷間引抜きのための軟化処理で、星崎工場の線材圧延ラインに併設されている連続炉 (ST13 号炉) で約 1270 K で数分間加熱後水冷処理を行い、硬さ Hv210 ～ 240、線径 8 ～ 13mm ϕ の線材が、東北特殊鋼の二次加工工程に投入される。

Fig.8 に、空冷処理した圧延線材の溶体化温度と硬さの関係を示す。圧延まま (空冷) では 300HV 前後以上で、1120 K 以上の溶体化処理で 250HV 以下になるが、連続炉での 5 分間程度での処理であれば、1270 K 加熱－水冷により、250HV 以下で粗大粒 (G.S.No < 3) のない組織が得られる。1020 K 付近で硬さが一旦上がるのは、この付近での Cu の析出 (Fig.1) が関係しているものと考えられる。尚、Fig.1 から casting 偏析が予想され、実際に試作段階で Ni リッチのオーステナイト相が観察されているが、分塊から圧延までに 1420 K 以上の履歴があればマトリクスは完全にフェライト単相になることを確認している。

冷間引抜き以降の二次加工工程は、東北特殊鋼(株)鋼材工場で行われるが、既存のフェライト電磁ステンレス鋼との工程上の大きな違いは、焼鈍工程が、溶体化処理 (2) に変わったことのみである。これは、処理 (1) と同様に、連続炉加熱－水冷による。その目的は、冷間引抜きの歪緩和および結晶粒度調整の点では従来鋼と共通するが、磁気特性を保証する工程ではない。Fig.9 に、棒鋼出荷時のマイクロ組織を示す。

工程全体としては、一次工程の分塊鋼片のヘゲ等の疵取りによる歩留り低下に若干問題を残すものの、二次加工工程では、従来のフェライト電磁ステンレス鋼対比で目立った品質上の問題はなく、本年より自動車関連向けに量産を開始する。

Fig.8. Effect of solution treatment temperature on hardness.

Fig.9. Microstructure of cross-section of a ground bar of supplied condition.

5. 特性

5.1 電磁気特性

Table 2 に、K-M57 と比較鋼の電磁気特性の代表的な値を示す。磁束密度、保磁力とも目標を満足し、最大透磁率もフェライトステンレス鋼としては大きい部類である。比抵抗も比較的高いので、低損失、高速応答性が要求される燃料噴射装置等のソレノイド用途にも適している。

また、時効処理による保磁力の増加が小さいことも特徴

Table 2. Electromagnetic properties.

Brand Name	Flux Density (Tesla)				Coercivity (A/m)	Maximum Permeability (μ H/m)	Resistivity μ -cm
	B160	B400	B800	B2000			
K-M57 (ST-AG)	0.62	0.97	1.10	1.24	81	2700	90
K-M57 (ST)	0.75	1.09	1.17	1.26	68	3200	94
Base material							
K-M50	0.36	0.61	0.83	1.10	50	1700	70
Reference							
K-M35FL (MA)	0.82	1.10	1.21	1.33	75	4100	72
K-M31	0.26	0.93	1.13	1.28	150	1900	88
AISI430F	0.22	0.78	1.04	1.19	200	1600	76

Table 3. Mechanical and physical properties.

Brand Name (Heat treatment)	Hardness	0.2% Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of Area(%)	Density (Mg/m ³)	Young's Modulus (kN/mm ²)	Poisson Ratio	Thermal Expansivity ($10^{-7}/K$)
K-M57(ST-AG)	370HV	780	800	1	1	7.62	197	0.33	0.33
K-M57(ST)	230HV	520	620	26	64	-	-	-	-
Reference									
K-M35FL(MA)	72HRB	240	400	50	75	7.69	212	0.27	0.27
K-M31(MA)	90HRB	400	570	43	73	7.61	231	0.33	0.33
AISI430F(MA)	83HRB	340	490	35	65	7.60	225	0.24	0.24

である。類似の Fe-Cr 系電磁ステンレス鋼に $1 \sim 10 \mu\text{m}$ の Ti 系硫化物を分散させたもの¹⁰⁾では磁壁に対するピンング効果によると思われる比較的顕著な保磁力の増加が見られる。一方、K-M57 の主な析出物と考えられる $-\text{Cu}$ 、Ni-Al は、いずれも $1 \mu\text{m}$ ^{5),8)}であると考えられる。従って、非磁性析出物のサイズが磁壁の厚さと同程度の時にピンング効果が最大になるという議論¹²⁾によって、保磁力増加が小さいことを解釈することも出来る。

Fig.10. Corrosion resistance.

5.2 機械的 / 物理的性質

Table 3 に、機械的 / 物理的特性の代表的な値を示す。AG 状態で、硬さは、340 ~ 390HV5 でほぼ目標を満たし、引張強さは、従来鋼の 1.5 ~ 2 倍である。但し、伸び・絞り が 1 % 前後で、シャルピー衝撃値 (V ノッチ) は、2 ~ 4 J/cm² なので、大きな衝撃が加わる用途には注意を要する。

5.3 耐食性

Fig.10 に、3.5% 食塩水中での、孔食電位 (JIS G 0577) を示す。ベース鋼に対して、耐食性の低下は少なく、SUS304、SUS430F 同等以上の耐食性を有する。

Fig.11. Machinability (Drilling test).
Tool material : SKH51 ; Nominal diameter : 5mm; Tip angle:118 °
Cutting speed : 15m/min.; Feed rate : 15m/min; Depth of hole: 10mm.

5.4 被削性

被削性評価の一例として、Fig.11 に、出荷状態（冷間引抜 - 溶体化 - 矯正 - センタレス研磨）でのドリル加工試験の結果を示す。旋削、突っ切り、総型溝入れ加工における工具磨耗についても、SUS304(0.02%S) と同程度かやや少ない工具磨耗量を示した。

6. まとめ

電磁弁、自動車用燃料噴射装置等のソレノイド用鉄芯に要求される軟磁気特性を有し、時効硬さ約 370Hv、耐食性は SUS304 以上の析出硬化型電磁ステンレス鋼を開発した。低保磁力で、比抵抗も高いので、高応答性用途にも適している。また、冷間引抜きが可能で量産製造し易く、被削性も SUS304 並で、部品加工に特殊な切削技術は必要としない。部品製造コストへの影響および環境負荷が大きい表面硬化処理の省略を可能とすることから、今後の需要拡大が期待される。

(文 献)

- 1) 滝口常美:油空圧技術, **41**(2002)9, 31.
- 2) M. Kanao: Transactions of National Research Institute for Metals, **17**(1975), 2, 77.
- 3) 渡辺敏幸, 石田清仁:電気製鋼, **49**(1978) 225.
- 4) Y. H. Shon and H. K. Cho: J. of the Korean Inst. of Metals, **25**(1987), 6, 420.
- 5) Y. H. Shon and H. K. Cho: J. of the Korean Inst. of Metals, **25**(1987), 10, 739.
- 6) 品川丞, 鈴木耐三, 大友強:特願昭53 - 32407.
- 7) 品川丞, 阿部有道, 田部井誠, 小野寺敏:特願昭59 - 240933.
- 8) Y. Kimura and S. Takaki: ISIJ International, **37**(1997), 3, 290.
- 9) W. C. Leslie: The Physical Metallurgy of Steels, McGraw-Hill International(1982), 332.
- 10) J. Ebata, T. Takiguchi, T. Shimizu, K. Oikawa, H. Mitsui and K. Ishida: Proceedings 4th European Stainless Steel Science and Market Congress, **2**(2002), 81.
- 11) 及川勝成, 光井啓, 石田清仁:電気製鋼, **75**(2004) 113.
- 12) 本間基文, 金子秀夫:磁性材料, 日本金属学会(1977) 102.