

電熱線の改良についての一実験* (第1報)

矢島悦次郎** 柴田悌二郎***

Etsujiro Yajima and Tejiro Shibata : Experiment on Improvement of Electrical Heat-resisting Wire by Al Diffusion. Various kinds of Al diffused electrical heat-resisting wires were measured for their specific electrical resistance and mechanical strength. The specific electrical resistance of nichrom wire did not increase by Al diffusion, but by Fe-Cr-Al wire it increased. The mechanical strength of these Al diffused wires was almost the same as before the diffusion.

(Received June 30, 1954)

I. 緒 言

電熱線材料としては比抵抗値が適度に高く、かつ耐熱性に富むことが第一条件である。従来最も広く用いられて来た電熱線は Ni-Cr 系合金すなわちニクロム線で、次いで Ni 不足のために代用電熱線として Fe-Cr-Al 系合金が用いられた。Fe-Cr-Al 系合金は加工がやゝ困難な欠点がある。著者等は純 Fe 線に Al を固態拡散させたものゝ比抵抗値を測定したところ、Al の拡散につれてこの値は増大したので、その変化を検べかつ機械的諸性質について實

験を行った。

II. 実験方法

各種電熱線の試片(直径 1~2 mm, 長さ 100 mm)の表面を 1 G 程度の粗エメリー紙で磨いて酸化被膜を除き、金屬光澤を呈したものを実験に供した。これらの試片を鋼製圓筒中に充填した Fe-Al 合金粉末 (Fe:Al=50:50) に NH₄Cl 1% を添加したものゝ中に埋め所要の温度および時間、拡散処理を施した後比抵抗値を測定した。

III. 拡散処理の温度および時間の影響

Table 1 は拡散処理の温度および時間の影響を示したもので、上段は比抵抗値 ($\mu\Omega\text{cm}$)、下段は拡散処理後の電

** 名古屋工業大學金屬工學科

*** 東北大學工學部通信工學科

* 1951 年 4 月本會東京大會に發表。

熱線の直徑 (mm) である。また Fig. 1 はこれらの中の
 數種について 6 時間 Al 擴散を施した場合の擴散温度と

て比抵抗値の著しい變化はないが、Fe-Cr-Al 系統の電熱
 線では擴散處理の温度が高くなるとともに、比抵抗値は次

Table 1 Effects of diffusion temperature and time. (Upperlines: Specific electrical
 resistanc, $\mu\Omega\text{cm}$; Lower lines: Diameter of wire after diffusion, mm).

Condition of Al-diffusion	Pure Ni wire 1.5 or 2 mm ϕ	Nichrom wire (I) 2 mm ϕ	Nichrom wire (I) 1.5 mm ϕ	Nichrom (II) wire	Ni-Cr-Si alloy steel wire	Pure Fe	Fe-Cr-Al (I) wire	Fe-Cr-Al (II) wire
800°, 6 hrs	14.3 1.45	101.7 1.96	104.7 1.58	110.5 1.94	104.8 1.99	14.1 2.02	117.2 1.99	110.5 1.97
800°, 20 hrs	— —	100.4 1.97	101.7 1.58	111.0 1.96	— —	15.1 2.04	119.5 2.00	111.7 1.99
900°, 3 hrs	13.6 1.47	104.8 1.95	106.8 1.65	111.3 1.98	106.9 2.01	14.7 2.00	113.6 1.97	115.6 2.00
Same as and foot note (a)	— —	— —	95.1 1.57	110.7 1.97	102.0 2.01	14.6 2.02	124.3 2.01	121.6 1.99
900°, 6 hrs	13.8 1.46	103.5 1.96	106.5 1.57	112.2 1.96	104.3 2.00	15.9 2.03	116.0 1.96	118.3 2.00
Same as and (a) heat treated	— —	101.4 1.96	97.5 1.57	109.8 1.96	104.2 1.99	15.9 2.05	131.0 2.01	123.4 1.99
1000°, 3 hrs	13.0 2.03	— —	106.0 1.59	111.3 1.94	— —	17.5 2.10	129.5 2.06	123.7 1.99
Same as and (a) heat treated	12.3 2.03	— —	101.5 1.63	— —	— —	18.4 2.12	144.7 2.08	— —
1000°, 6 hrs	13.5 2.07	— —	107.0 1.65	114.2 2.00	103.2 2.00	24.6 2.23	134.5 2.21	142.2 2.12
Same as and heat treated(a)	13.3 2.07	— —	102.2 1.66	116.2 2.00	103.0 2.02	25.0 2.22	195.2 2.20	155.5 2.12
1050°, 3 hrs	12.9 2.05	— —	102.3 1.61	111.3 1.95	— —	22.0 2.21	159.7 2.17	142.0 2.07
Same as and heat treated (a)	13.1 2.04	— —	100.0 1.61	— —	— —	24.4 2.23	177.3 2.18	— —
1050°, 6 hrs	14.0 2.10	— —	105.0 1.68	119.4 2.07	108.0 2.06	29.5 2.30	210.5 2.29	180.2 2.23
Same as and heat treated (a)	14.0 2.10	— —	101.5 1.69	123.4 2.07	102.0 2.05	32.0 2.31	250.0 2.30	214.2 2.25
1100°, 6 hrs	— —	— —	— —	— —	111.3 2.12	52.5 2.25	174.7 2.13	169.5 2.12
Not diffused	14.1 1.97	104.5 1.97	108.7 1.55	111.3 1.95	102.7 1.96	12.8 1.98	108.8 1.95	110.7 1.95

(a) After diffusion of Al, heated at 1030° for 30 minutes, then water quenched and tempered at 600°, for 5 hrs.

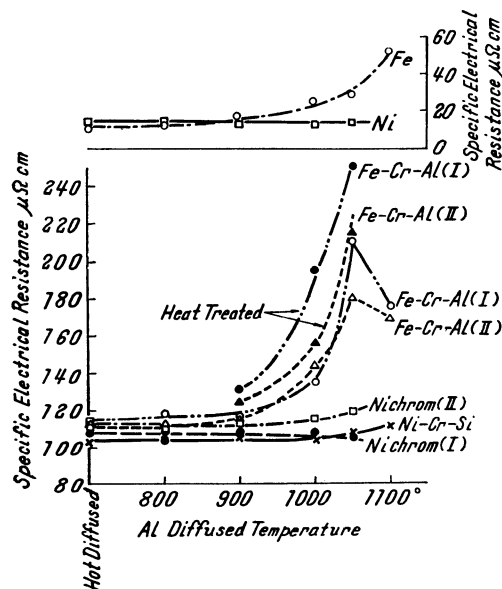


Fig. 1 Relation between diffusion temperature and specific electrical resistance.

比抵抗値との關係を示したものである。これらによつて知
 られる如く、ニクロム系統の電熱線は Al 擴散處理によつ

第に増加する。これは Fig. 1 上部に附記したように、純 Ni
 に Al を擴散させても比抵抗値はほとんど變らないのに對し、
 純 Fe の場合は擴散温度の上昇とともに、比抵抗値
 が次第に増すことに歸因すると考えられる。なお純 Ni の
 場合に比抵抗値の増加しないのは、Ni 中に Al が擴散し
 ないためではなく、顯微鏡的に擴散層が認められる。かつ
 第2報に示すように耐熱性が著しく向上することから、ニク
 ロム線に Al が擴散していることは明らかである。この
 Fe と Ni に対する相違の原因としては、電氣抵抗の本質
 から考えて、Al の擴散による格子歪が主原因ではなく、
 異種原子の存在による電子散亂の確率の相違に基因するこ
 ころが大きいものとする。

また純ニクロムの 1 號線は 1000°, 6 時間擴散處理を施
 しても比抵抗値はほとんど變化しないが、Fe を含んだニ
 クロム 2 號線および Si を含有する Ni-Cr-Si 系電熱線
 はさらに高温擴散によつて僅かに比抵抗値は増加し、純
 ニクロム 1 號線は逆に僅かに減少の傾向を示す。Fe-Cr-
 Al 系統の電熱線は 900° までの擴散處理では比抵抗値の
 増加は僅かであるが、1000° 擴散から急激に増加し、1050°
 では最高値に達し、擴散前の 1.5~2.0 倍程度となる。さら
 に擴散温度を高めて 1100° で處理した場合は、純 Fe 線の

比抵抗値は著しく大きくなり、未拡散のそれに比べて4倍以上にもなるが、Fe-Cr-Al系のものは比抵抗値は1050°に比べて僅かに減少している。

IV. 比抵抗値の熱処理および加熱による変化

本実験に用いた電熱線は何れも変態点を有しておらな

Table 2 Changes of specific electrical resistance by heating. Heat condition is 1000°, 25 hrs and more 1200°, 20 hrs.

Class	1st class nichrom wire			2nd class nichrom wire			Fe-Cr-Al alloy steel wire		
	Not diffusion	900° 3 hrs	900° 6hrs	Not diffusion	900° 3 hrs	900° 6 hrs	Not diffusion	900° 3 hrs.	900° 6 hrs
Resistance value before heating $\mu\Omega/cm$	104.5	104.8	106.5	111.3	111.3	112.2	110.7	115.6	118.3
Resistance value after heating $\mu\Omega/cm$	104.5	114.0	120.0	111.2	114.4	118.7	92.5	125.2	132.0

い。従つて熱処理によつて結晶粒を細くしたり、機械的性質を改善することは出来ない。また変態点がないから焼入焼戻によつて比抵抗値の大きな変化は豫期し得なかつたのであるが、Table 1 および Fig. 1 に附記した如く、1000°に30分加熱後水焼入し、600°に5時間焼戻した結果、Fe-Cr-Al系統のものでは著しく比抵抗値を増し、1050°に6時間拡散処理を行ったものに、前記熱処理を施すと拡散前の比抵抗値に比べて約2~2.5倍となる。この原因については今のところ明らかではないが、恐らく溶

解度変化による析出が一つの原因ではないかと思われる。勿論焼入して後600°に5時間焼戻したのであるから、焼入歪によるものとは考えられず、また次に述べるように加熱による変化に基くものでもない。このように比抵抗値の高いものは後述する如く機械的性質悪く、拡散および熱処理後曲げて用いることは出来ないが、しかし前記の熱処理を施したままではかなりの剛性を有しているから、特別

の用途に對しては高抵抗材料として用い得る。

次に拡散処理を施した電熱線を高温度に長時間加熱した場合の比抵抗値の変化を検べた。加熱条件は最初1000°に25時間加熱後空冷し、さらに1200°に20時間加熱後空冷したものについて比抵抗値を測定して、加熱前のそれと比較した。その結果はTable 2の如くである。すなわち高温長時間の加熱によつて何れも比抵抗値は多少増加している。これは拡散層のAlが高温度長時間加熱によつて内部に擴散し、Alの固溶した部分を增大するためと考えられ

Table 3 Mechanical properties. (Upper line: Tensile strength, kg/mm²; Lower line: Elongation, %)

Diffusion condition	Pure Ni wire	Dia. 2mm 1st class nichrom wire	Dia. 1.5 mm 1st class nichrom wire	2nd class nichrom wire	Dia. 2 mm (Ni-Cr-Si) alloy steel wire	Dia. 1 mm Ni-Cr-Si alloy steel wire	Pure Fe wire	1st class e-Cr-Al alloy steel wire	2nd class Fe-Cr-Al alloy steel wire
	Not diffused	52.5 40.5	79.7 22.0	82.5 23.0	81.2 12.0	71.5 32.0	63.3 36.0	56.8 6.0	62.7 16.0
800°, 6 hrs	—	78.6 22.0	80.1 25.0	70.0 19.0	74.5 30.0	64.6 30.0	34.9 30.0	65.3 16.0	64.6 2.0
800°, 20 hrs	—	76.5 10.0	77.7 ?	67.6 18.0	—	—	31.8 40.0	63.5 13.0	49.8 2.0
900°, 3 hrs	48.2 30.0	72.2 20.0	79.6 ?	67.8 23.0	61.5 20.0	57.9 14.0	33.0 24.0	56.8 5.0	55.7 0
Same as and heat treated (a)	—	—	75.1 ?	69.8 23.0	60.4 23.0	60.4 14.0	31.8 16.0	63.4 9.0	51.0 2.0
900°, 6 hrs.	44.2 33.0	76.6 22.0	76.6 ?	68.6 20.0	61.5 29.0	64.0 12.2	33.9 20.0	54.4 2.0	50.8 1.0
Same as and heat treated (a)	—	—	73.7 20.0	69.8 22.0	60.6 28.0	60.7 26.0	33.5 12.0	52.6 6.0	44.8 0
1000°, 3 hrs	—	—	76.4 25.0	—	—	—	38.0 7.0	57.4 3.0	—
Same as and heat treated (a)	42.3 26.0	—	62.2 ?	—	—	—	30.9 12.0	44.5 2.0	—
1000°, 6 hrs	—	—	—	62.5 22.0	58.8 19.0	62.3 2.0	—	—	22.2 0
Same as and heat treated (a)	39.6 28.2	—	57.1 ?	65.0 21.0	59.5 18.0	57.7 2.0	24.5 4.0	29.5 0	24.7 0
1050°, 3 hrs	—	—	71.6 26.0	—	—	—	41.8 4.0	26.6 0	—
Same as and heat treated (a)	43.3 30.0	—	61.7 ?	—	—	—	29.2 10.0	32.6 0	—
1050°, 6 hrs	—	—	—	57.4 32.0	50.8 8.0	45.9 0	—	—	7.0 0
Same as and heat treated (a)	39.3 38.0	—	54.0 24.0	56.4 30.0	53.0 11.0	42.9 0	24.1 5.0	22.4 0	13.2 2.0

(a) After Al diffusion, heated at 1000°, for 30 minutes, the water quenched and annealed at 600°, for 5 hrs.

るが、しかし著者の一人ならびに佐藤⁽¹⁾の研究によると、Cr と Al の同時擴散において加熱による Al の分布移動は餘り大きくないから、従つて比抵抗値の變化も大きくないことは當然である。しかしこのように加熱によつて比抵抗値が幾分變化するから、標準用抵抗線などの比抵抗値を一定に保たねばならぬものには不適當であるが、一般用電熱線としてはこの程度の變化は大して問題ではない。

V. 擴散處理による機械的性質の變化

各種電熱線に擴散處理および熱處理を施したものについて手廻しによる最大荷重 300 kg の小型引張試験機で抗張力および伸びの變化を檢べた。その結果は Table 3 の如くで、表中の上段には抗張力(kg/mm²) 下段は伸び (%) が示してある。これによるとニクロム系統のものでは Al 擴散處理によつても機械的性質は餘り低下せず、1000° の擴散處理を施したものでも相當の抗張力および伸びを示しているが、しかし 900° 以上の擴散處理を施したものはこれを曲げると表面の擴散層が剝脱するから、利用方法の如何によつてその點に限度を生ずる。Fe-Cr-Al 系統の電熱線は 900°, 3 時間までの擴散處理では未だ相當の伸びもあり、抗張力も左程低下しないが、1000° 以上の擴散處理を施したものは、抗張力著しく低下ししかも伸びはほとんど零になり容易に折損する。もつともこれは全體の斷面積

Table 4 Bending test.

Clas.	1st class nichrom wire	2 nd class nichrom wire	Fe-Cr-Al allog steel wire
Diffusion condition	900°, 6hrs	800°, 20 hrs	900°, 3 hrs
wt decreases by bending g/m	0.244	0.143	0.0210
wt decreases by heating at 1200°, 20hrs g/cm ²	0.000050	0.000067	0.000061
Same as above but not diffused g/cm ²	0.00590	0.01100	0.00890

に對する擴散層の厚さにもよるもので、太い線はその傾向が比較的少く、細い線は大である。これはニクロム系統のものについても同様で、Table 3 の Ni-Cr-Si 線の直徑

1 mm と 2 mm の線はこれを示している。

次に簡単な曲げ試験を行つて表面の擴散層の剝脱の程度およびその耐熱性におよぼす影響を檢べた。試料は直徑 2 mm の線を用い、これに Al の擴散處理を施したものを、直徑 16 mm の細い丸棒に強く捲きつけて、その捲きつけによつて剝脱した重量變化を求めた。さらに曲げたまゝのものを 1200° に 20 時間加熱して、曲げによる表面層の剝脱が、擴散による耐熱性の効果におよぼす影響を檢べた。その結果は Table 4 の如くである。これによると 900°, 3 時間の擴散處理では何れも上述の如きかなり厳しい曲げを行つても、ほとんど擴散層の剝離は起らず、表に示す程度のもは肉眼で見たとこでは剝離したことが認められない。しかし加熱試験の結果もこれを示しており、未擴散のものを加熱したものとは比べると、加熱による重量減少(加熱試験後一定の機械的方法で表面の酸化被膜を除去して秤量)は 1/100~1/200 程度に過ぎず、2 mm の線はこのような條件の擴散處理後これを強く屈曲しても差し支えないことを示している。

VI. 總 括

各種電熱線に Fe-Al 合金粉末を用いて Al の擴散處理を行い、比抵抗値の變化ならびに機械的性質におよぼす影響を檢べた。その結果を要約すれば次の如くである。

(1) ニクロム系統の電熱線は、Al の擴散處理を施しても比抵抗値はほとんど變化せぬが、Fe-Cr-Al 系統の電熱線は著しく比抵抗値を増加する。

(2) Fe-Cr-Al 系統の電熱線は、擴散處理を行つたものに焼入焼戻の熱處理を施すと、比抵抗値は著しく増加し、1050° に 6 時間擴散しこれを熱處理したものは、比抵抗値が未擴散のその約 2.5 倍に達する。

(3) 900° までの擴散處理を施したものは、機械的性質も大して劣化せず、これを曲げても擴散層を剝離するようなことはないが、1000° 以上の擴散處理を施したものは機械的性質が著しく低下し、曲げると表面の擴散層が剝離する。

本研究遂行に當り終始御懇切なる御指導を賜りました東北大學教授佐藤知雄博士に厚く感謝の意を表す。なお本研究費の一部は文部省科學研究費の補助によることを附記する。

(1) 佐藤, 矢島, 本誌, 15 (1951) B. 297