

線材的表面缺陷（裂縫、折痕等等）是費赫拉尔發生猛烈氧化的根源。氧化过程中，在缺陷处形成了一層厚厚的、深灰色的氧化膜，这層氧化膜主要是鉻与鉄的氧化物。圖79表示在1000℃氧化 40 小时后的两个費赫拉尔試样。它們指出，氧化是沿着線上的縱向的表面裂紋發展的。

在較低的溫度（約 900℃）下費赫拉尔線的氧化研究証明了，合金在这些条件下的热稳定性是相当高的。在 900℃氧化70 小时后的試样上形成一層致密的、均匀的保护性（第一層）氧化膜（圖 80）。

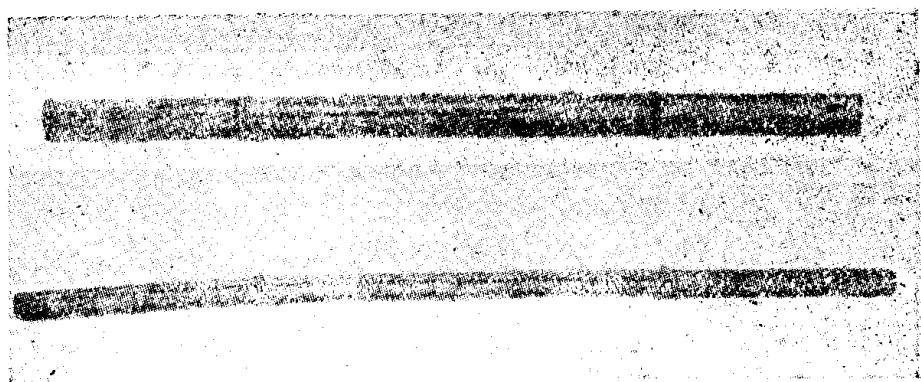


圖 79 1000℃时在空气中氧化 40 小时后，表面缺陷（折痕，縱裂縫）对費赫拉尔線热稳定性的影响

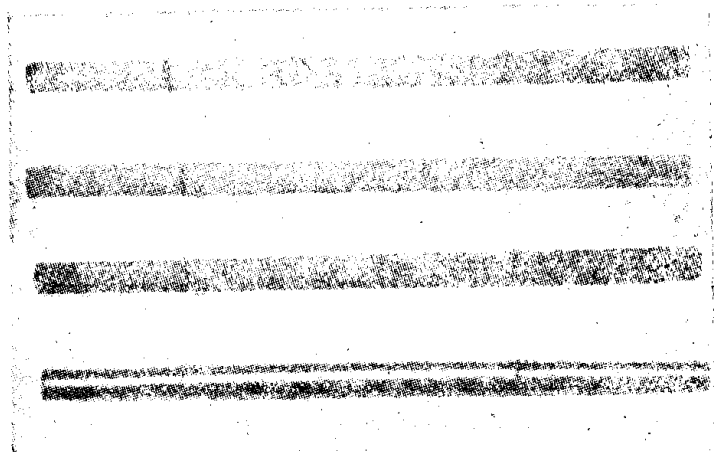


圖 80 900℃时在空气中氧化 24、26 及 70 小时后的費赫拉尔線的表面外貌

本書簡略地說明了苏联科学在电阻高的与耐热的鉄鉻鋁合金的生产与研究範圍內的成就。

詳細地敘述了耐热鉄鉻鋁合金——費赫拉尔的生产与物理技术性能的研究問題。敘述了費赫拉尔合金的几种熔煉方法；論証与推荐了可得到最好結果的这种合金的联合熔煉法。研究了合金的澆注方法，各种鑄模塗料的应用，以及在保护套中获得鑄錠的方法。敘述了費赫拉尔的热傳导、动力变形抗力、軋制工艺程序的数据，最适宜的加热溫度与压下量（孔型設計）規範，再結晶規律。描述了費赫拉尔合金的热处理与拉制工艺过程，物理化学性能的研究方法及物理技术性能。

本書供冶金工程师、科学研究工作者以及从事於电阻元件制造的工程师之用。

在本書翻譯过程中，曾得到刘崙高、邓名成二同志的不少帮助，特致謝意。

Л.В.МАРМОРШТЕЙН: СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗО—ХРОМ—АЛЮМИНИЙ
МЕТАЛЛУРГИЗДАТ (Москва—1950)

鉄-鉻-鋁合金

杜明、蕭湘譯

編輯：叶建林 設計：赵香苓 責任校對：楊維琴

1957年9月第一版 1957年9月北京第一次印刷 1,000册

850×1168·1/32·86,000字·印張 $3\frac{22}{32}$ ·插頁4·定價(10) 0.70元

冶金工業出版社印刷厂印

新华書店發行

書号 0690

冶金工業出版社出版（地址：北京灯市口甲45号）

北京市書刊出版業營業許可証出字第093号

目 录

序言.....	4
第一章 鉄-銘-鋁三元系及鉄銘鋁合金.....	8
第二章 費赫拉尔的熔煉.....	29
第三章 金屬的澆注.....	47
第四章 从錠及坯料軋成線材.....	56
第五章 線材的冷拉.....	86
第六章 費赫拉尔在适合於使用条件时的物理技术性能...	101
結論.....	116
参考文献.....	118

序 言

比电阻大与热稳定性高的金屬合金的生产近几年日益發达起来。这些合金在电气工業上得到了广泛的应用，把它們用作电加热爐的电阻元件，以及作为制造变阻器和一些特殊仪器的材料。

現有的比电阻大与热稳定性高的金屬合金可分为下列三大类：

1. 銅基合金。屬於这类合金的有：基本上是含銅与鎳的康銅；含有銅、鎳、錳与鋅的錳銅。

2. 鎳基合金。屬於这类合金的有：鎳鉻合金和鉄鎳鉻合金。

3. 鉄基合金。这类合金包括有很大的一組鉄鉻鋁合金（費赫拉尔、1号合金、2号合金、3号合金及4号合金），鉄鉻鎳鋁合金等等。鉄基合金的比电阻及热稳定性均比鎳鉻合金的高。

上述三类合金的成分，在大多数情况下，是經過研究金屬的相互作用及作出平衡圖后才确定的。第一类合金是銅基固溶体，它們是 Cu-Ni；Cu-Ni-Zn 及 Cu-Ni-Mn 平衡系中的合金。第二类合金是具有面心立方晶格的 γ -型的鎳基固溶体，它們是 Ni-Cr；Ni-Cr-Fe 系中的合金。在第三类合金中，鉄鉻鋁合金是体心立方晶格的 α -形态的鉄基固溶体，而鉄鉻鎳鋁合金則是面心立方晶格的 γ -形态的鉄基固溶体。最后这一类合金是位於 Fe-Cr-Al 及 Fe-Cr-Ni-Al 平衡系中的固溶体範圍內。

这样一来，比电阻大与热稳定性高的鉄基合金按固溶体又分为兩类：鉄素体固溶体的及奧氏体固溶体的。鎳基合金也屬於奧氏体固溶体的。

正如 Н. С. 庫尔納科夫 (Курнаков) 和 С. Ф. 热穆楚日內 (Жемчужный) 所确定的 [1]，固溶体的优异性質之一就是他們的比电阻大与电阻溫度系数小。金屬固溶体的比电阻随着固溶的合金元素濃度的增加而增大，而电阻溫度系数則减小 (庫尔納

科夫定律)。

Н. С. 庫尔納科夫院士創立的物理化学分析法——成分——性質圖學說，是研究金屬固溶体的主要方法〔2〕。

根据平衡系实验研究的物理化学分析是探讨合金性质的改变同成分关系的规律，确定系内各組元相互作用的特性的，因而，也能解决选择能满足这种或那种要求的合金的合理成分问题。这样一来，我們就能从理論問題、平衡圖的研究、物理化学分析与实际問題的結合探讨出合金的新成分与拟定出它們的制造工艺。

根据物理化学分析，可决定合金中的金屬要以怎样的比例配合（百分数）才能满足电气工业上的要求。合金的科学研究与生产实践证实物理化学分析法是很有成效的。具体的例子如：苏联科学院庫尔納科夫普通化学及无机化学研究所 С. А. 波果金(Погодин)对导线用与变阻器用合金及比电阻大的合金(镍铬合金)所做的研究，И. И. 柯尔尼洛夫(Корнилов)和 В. С. 米赫耶夫(Михеев)对比电阻大与热稳定性高的合金所做的研究，以及一些冶金工厂实验室的研究。

铜基与镍基电阻合金的物理性能，以及这些合金的生产工艺，在 С. А. 波果金的論文内有全面的叙述〔3〕。

第一类合金——铜基合金具有良好的电气性能。

康铜——含 60% Cu 及 40% Ni——的比电阻 $\rho_{25^{\circ}\text{C}}$ 为 0.46 欧姆·公厘²/公尺，电阻温度系数 $\alpha_{25-100^{\circ}\text{C}} = 0.0000245$ 。

德银类型的含锌的铜镍合金的 $\rho_{25^{\circ}\text{C}} = 0.30$ 欧姆·公厘²/公尺，而 $\alpha_{25-100^{\circ}\text{C}} = 0.00036$ 。

含锰的铜镍合金——成分为 60% Cu、10% Mn 及 30% Ni 的锰铜，它的 $\rho_{25^{\circ}\text{C}} = 0.65$ 欧姆·公厘²/公尺，而成分为 40% Cu、25% Mn 及 10% Ni 的锰铜，它的 $\rho_{25^{\circ}\text{C}} = 0.50$ 欧姆·公厘²/公尺。这些合金的电阻温度系数比不含锰的铜镍合金的小得相当多，而且许多合金是負值的。

铜基合金在冷态下的塑性很好。可是，由于这些合金的抗氧化性弱，不能经受高温的作用，所以，它們仅能在 450°C 以下的

溫度下应用。在电气工業上，銅基合金是制造变阻器和精密仪器的材料。

第二类合金的比电阻更大与热稳定性更高。

含 80%Ni 及 20%Cr 的鎳鉻合金的比电阻 $\rho_{25^{\circ}\text{C}} = 1.03$ 欧姆·公厘²/公尺，而电阻溫度系数 $\alpha_{25-100^{\circ}\text{C}} = 0.00011$ 。成分为 65%Ni、15%Cr 及 20%Fe 的铁鎳鉻合金的 $\rho_{25^{\circ}\text{C}} = 1.08$ 欧姆·公厘²/公尺， $\alpha_{25-100^{\circ}\text{C}} = 0.00011$ 。

鎳鉻合金能在电阻电爐內經受更高的溫度：铁鎳鉻合金达 850—1000°C，而鎳鉻合金达 1100—1150°C。第二类合金具有足够的塑性，这些合金制品的生产毫無困难。但是，鎳鉻合金不能滿足近代技术的需要：金屬加工部門及其他冶金工業部門，以及科学實驗室要求在加热爐內能經受更高工作溫度(1200—1400°C，或更高)的合金。此外，鎳鉻合金中含有 60—80% 鎳，而鎳是制造其它特种鋼所需要的。鉑、鈳等純金屬能使加热爐得到甚高的工作溫度。然而，这些金屬極貴，且其中某些金屬的制造工艺很复杂，在使用时，还要遵守一些特殊的条件。

由於希望提高加热爐的工作溫度及获得更便宜的合金，科学思想与技术沿着寻找新型铁基合金的道路前进。在具有比电阻大与电阻溫度系数小以及热稳定性高的铁合金中，铁鉻鋁合金引起了注意。其中有一些——費赫拉尔及 1 号合金和 2 号合金——在苏联得到了广泛的应用。

铁鉻鋁合金的成分及其某些物理性質如后面的表 1 所列（第 26 頁）。

铁是这些合金的主要組元，因而，它使这些合金的价格比鎳合金要降低很多，故铁鉻鋁合金比鎳合金便宜些。

按照合金的用途和它們的工作条件，对它們提出了不同的要求。例如对第二类和第三类合金提出了下列要求：

1. 結構均一，無相变。
2. 熔点高。
3. 在空气与爐气气氛中的热稳定性高，以保証使用期限

長。

4. 比电阻大。合金的比电阻愈大，則用它来制造电阻元件时就愈省，重量就愈輕，在电爐內所佔的位置就愈小，价值也愈低。

5. 电阻溫度系数小，即当溫度升高时电阻的变化不大。

6. 具有足够的强度，这样，才可以防止螺旋線在高溫工作条件下發生变形。

7. 無論在热态或冷态下均容易加工。

8. 作为合金組元的金屬，成本不应当高。

应用金屬合金作为加热爐的电阻元件的長期实践証实，只有無相变的金屬固溶体才能滿足上述要求。

第一章 鐵-鉻-鋁三元系及鐵鉻鋁合金

鐵-鉻-鋁三元系首先是在苏联开始研究的〔4、5、6〕。在研究这个系的基础上，确定了热稳定性高的和比电阻大的鐵鉻鋁合金的新成分，並拟定了制造它們的工艺。在沒有指出鐵-鉻-鋁系的科学研究的主要特征以前，我們先引用一些研究某些鐵鉻鋁合金物理性質方面的早期著作中的資料。

大家知道，鉄中加鉻，可大大地提高鉄的比电阻。鐵鉻合金中再加入鋁时，則比电阻更加增大。

苏联在1933年到1936年間，就研究了某些鐵鉻鋁合金的物理性質〔7、8〕。例如，研究过含有12.8%Cr、4.45%Al、0.36%Si、0.35%Mn和0.09%C的費赫拉尔及含有30%Cr、4%Al、1%Si和0.20%C的赫羅馬尔。

根据С.М.西洛夫(Шилов)的报导〔7〕，上述成分的費赫拉尔錠，軋成0.25公厘厚的薄板后，其机械性能为： $\sigma_b = 83.3$ 公斤/公厘²， $\delta = 12\%$ 。在850°C退火后， $\sigma_b = 58—64.5$ 公斤/公厘²及 $\delta = 13—16.7\%$ 。此种合金的冷拉線在710°C退火后的机械性能为： $\sigma_b = 65$ 公斤/公厘²， $\delta = 20\%$ 。这种成分的合金帶材的比电阻为1.6欧姆·公厘²/公尺。电阻溫度系数为0.00003。合金开始氧化的溫度为850—900°C。

在М.В.普利丹采夫(Приданцев)和Н.В.謝梅諾娃(Семенова)〔8〕，Г.С.那札罗夫(Назаров)，Я.Л.罗捷布里特(Розенблит)〔10〕，В.А.爱拉赫季(Эрахтин)和В.普罗佐罗夫(Прозоров)〔11〕，Р.М.罗津布留穆(Розенблюм)的著作中均載有費赫拉尔的物理技术性質。

根据М.В.普利丹采夫和Н.В.謝梅諾娃的研究資料，上述成分的赫羅馬尔的比电阻为1.40欧姆·公厘²/公尺，电阻溫度系数为0.00004；这种合金的工作溫度可达1300—1350°C。就赫羅馬尔的成分說，它位於鐵-鉻-鋁三元系中的 σ 相範圍內。合金

中如有 σ 相存在，塑性便会大大地降低，而在冷态下，就变得很脆。

在B.A.爱拉赫季和A.H.謝特基娜（Щеткина）的著作中，也有關於赫羅馬尔的性質的一些資料〔13〕。

美国曾在1910年到1912年間，企圖把鉄鉻鋁合金当做比电阻高的耐热材料来应用，但未成功。

虽然，某些成分的合金，例如，含20—30%Cr和5—8%Al的合金已获得了專利权，但是，它們的制造工艺还没有研究好，因此，它們还没有得到实际的应用。

1929年的国外技术文献上，又重新注意到了鉄鉻鋁合金：在这个时期發表的文献中，有一篇〔14〕是研究含有不同成分的鉻、鋁、鈷及其他元素的65种鉄鉻鋁合金的物理性質。某些合金含有1.73到12.76%Cr，2.47到5.38%Al，0.8到1.1%Si及0.39到1.08%C；在加入其他的元素沒有影响的条件下，对这些合金的物理性質进行了研究。研究的結果确定，合金中同时含有鉻及鋁时，可提高它們的热稳定性。例如，含12.76%Cr、5.32%Al及0.8%C的鉄素体合金，在温度为840—1000°C之間，比兩相合金具有更高的热稳定性。錳可降低合金的热稳定性，鈷对合金的热稳定性沒有影响。鈳能促使細晶粒組織的形成。硅可降低鋼的韌性。

發表在国外技术刊物上的大批研究著作，是講述合金的物理性質的——热稳定性、比电阻。

此外，在这些著作中所注重的全在鉄鉻鋁合金作为加热爐的电阻元件的应用上及叙述爐子的使用性能等方面。

这些著作都缺乏科学的数据——沒有深入地研究鉄鉻鋁合金的性質。合金的成分，不是根据鉄-鉻-鋁三元系及“成分-性質”圖的研究来确定的而是主觀选定的。因此，所用的鉄鉻鋁合金的成分及它們的制造工艺在科学上是沒有根据的。

苏联И.И.柯尔尼洛夫及B.C.米赫耶夫和其他同事們所完成的著作〔4、5、6〕，則具备完全另一点的性質。他們把物理

化学分析的理論，应用到鉄同鉻及鋁的互相作用的研究上去，作出了鉄-鉻-鋁三元系平衡圖，研究了合金物理性質的变化和成分的关系，並作出了相应的“成分-性質”圖。在这些工作的基础上，确定了鉄鉻鋁合金的合理成分，並在原則上制定了这些合金的新的制造工艺。

И. И. 柯尔尼洛夫及 В. С. 米赫耶夫的著作是第一批卓越的科学著作，在这些著作里，把制造鉄鉻鋁合金的理論和实践看成为相互联系着的。

就許多性質来看，鉄与鉻的区别是不大的。这两种金屬的晶格均为体心立方，晶格常数差別很小（ α -鉄为 2.861Å，而鉻为 2.87Å）。同样，这两种金屬的比重也相差不大：20°C 时， α -鉄的比重为 7.9，而鉻的比重为 7.138。

鋁的晶格为面心立方；晶格常数等於 4.04 Å。20°C 时，鋁的比重为 2.7，差不多只有鉄的三分之一。

鉄与鉻在液态下能相互作用，且在結晶过程中，形成互相連續的一系列固溶体。根据 Н. Н. 庫尔納科夫和 Н. И. 柯列涅夫（Коренев）〔15〕及其他作者的資料，鉄-鉻系固溶体的特征是它們的物理性質随着成分的改变而連續地变化。鉄-鉻系中有下列两种轉变發生： α -固溶体形成化合物 FeCr 的轉变； $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 轉变。正如 Н. Н. 庫尔納科夫和 Н. И. 柯列涅夫的著作中〔15〕，И. И. 柯尔尼洛夫和 В. С. 米赫耶夫的著作中〔16〕以及 В. С. 米赫耶夫〔17〕在自己的著作中所指出的，由於鉄-鉻系內在鉻原子百分数为 40—51.5 之間發生固溶体的轉变，故物理性質的連續变化特性破坏：性質曲綫的連續性中断。根据 Н. Н. 庫尔納科夫和 Н. И. 柯列涅夫以及其他作者們的研究資料， α -固溶体的轉变与化合物 FeCr (σ 相) 的形成同时进行。И. И. 柯尔尼洛夫及 В. С. 米赫耶夫在用轉变時間或轉变速度的方法研究鉄-鉻系固溶体的轉变时，确定出在鉻原子百分数为 40—51 之間 α -固溶体發生轉变形成 β , Θ 及 σ 三个相。这些相的形成速度各不相同，同时，在相所扩展到的范圍內（圖 1），随着鉄及鉻含量的改变，

各相形成的速度發生急劇的變化。每一相各有自己的形成速度及轉變溫度。這些作者作出了表示鐵-鉻系固溶體轉變的新的相圖(圖2)。這些研究資料証實了過去研究工作者們的觀察,但確定了鐵-鉻系固溶體轉變的另一特性。

根據文獻上的資料,把鐵-鉻二元系平衡圖畫在鐵-鉻-鋁三元系三角形的側邊上(見圖5)。

許多研究家們研究過 $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 轉變。現在已經確定, γ 區的境界綫成一環形曲綫。鐵鉻合金中加入另外一些元素,例如,加入碳,可大大地改變 γ 區境界綫的位置。

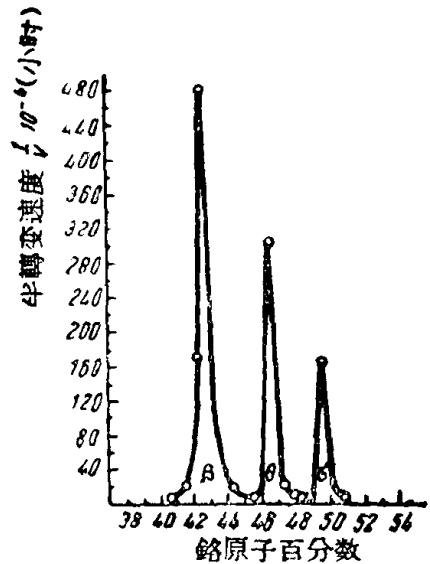


圖 1 “成分-半轉變速度”圖

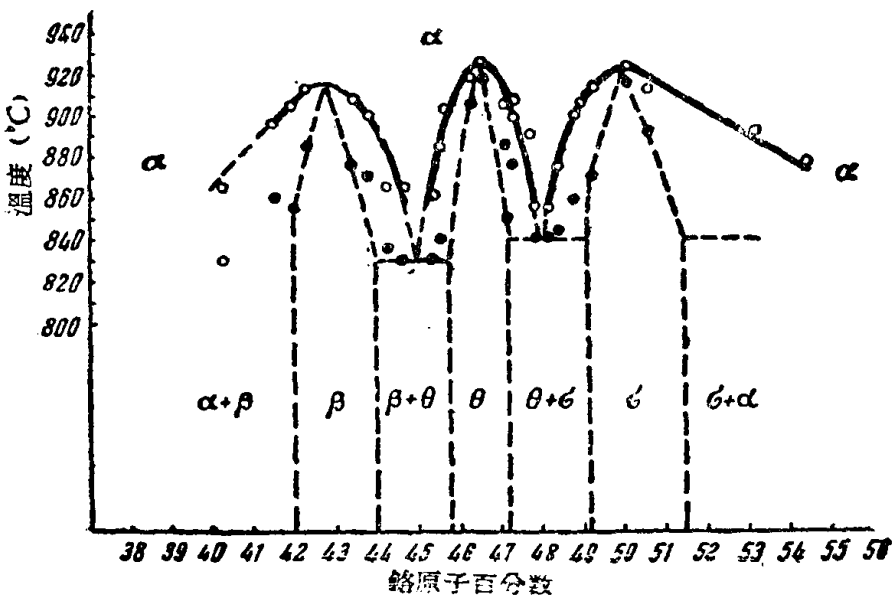


圖 2 鐵-鉻系相圖

随着合金中碳含量的增大，曲线就向含铬量高的方面移动。在含微量碳的合金中， γ 区的边界在 13—14%Cr 的合金处。当含有 0.4% C 时， γ 区的边界线移至含铬达 30% 的合金旁。因为合金要在高温下使用，所以想不让防止合金氧化的氧化膜因相变而引起的体积变化所破坏，就必须选择在高温下没有相变的单相合金，并且这些合金中的碳含量应当减至最低限度。

铁-铝系是附在铁-铬-铝相图一边（见图 5）的另一个合金系。

许多研究家们研究过铁铝合金。作出了铁-铝合金的平衡图，确定了铝在铁中的溶解度达 34%，並有三个化合物： FeAl_3 ， Fe_2Al_3 及 FeAl 。

Н.С.庫尔納科夫、Г.Г.烏拉佐夫（Уразов）及 А.Г.格利戈尔耶夫（Григорьев）〔18〕用物理化学分析法（热分析，显微组织及导电性之研究）研究铁-铝系合金的性质时，首先确定了在铁原子百分数为 24—34 之間有一可变成分的化合物（别尔托里德体）独立存在。

А.Г.格利戈尔耶夫及 Н.М.格魯傑娃（Груздева）〔19〕用物理化学分析法研究铝在铁中的固溶体合金的性质时确定，在固溶体中有化合物 Fe_3Al 形成。

Б.索明（Сомин）、Ю.馬尔戈林（Марголин）及 Н.李波欽（Липчин）〔20〕在铁-铝-碳三元系中，也观察到有化合物 Fe_3Al 存在。

铁与铝在液态下能从任何比例相互作用。至於铬与铝在液态中的相互作用，則有两种观点。某些作者〔21〕认为，铬与铝在液态下相互作用时，在 5—55%Cr 之間形成兩層。这种情况下的熔度图的特点为：结晶开始时的温度曲线的連續性破坏。

另一些作者肯定铬同铝在液态时能以任何比例混合，否認有兩種液体層形成。例如，Н.И.斯捷巴諾夫（Степалов）及 И.И.柯尔尼洛夫〔22〕以物理化学分析法研究铝-铬系的结果，确定了一直到 1650°C 时液态的铬及铝是不断地互相溶解，並确定了

所形成鉻在鋁中的固溶体的范围是極窄的。上述二人所求得的鋁与鉻的液体之开始結晶溫度标在一新的熔度圖上，此圖繪在相圖三角形之一边上（見圖 5）。鉻-鋁系熔度圖的特征是有一系列的包晶反应，由於这些反应，形成了九个相。

根据文献上的資料，合金中含鋁量小於 17% 时，鋁同鉻形成固溶体。

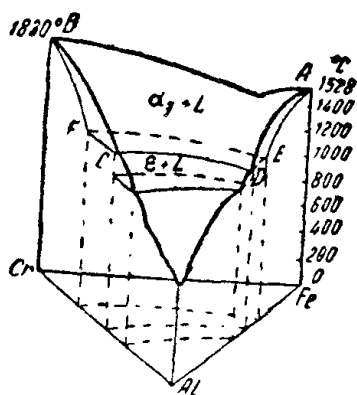


圖 3 Fe-Cr-Al 三元系熔度圖
三元固溶体 α_3 的結晶面

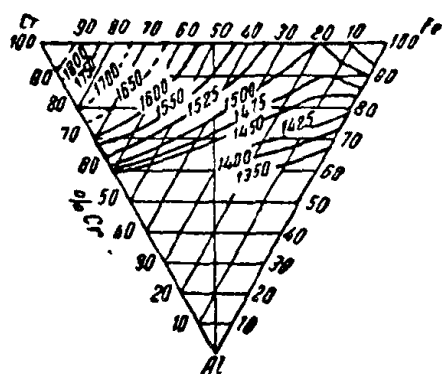


圖 4 Fe-Cr-Al 系液相面等溫線

加鋁於鐵或鉻中，会使鐵或鉻的熔点大大降低。鉄鉻鋁三元合金的熔点，曾由 И.И. 柯尔尼洛夫 [5] 用热分析法測定过。他根据热分析的資料及二元系熔度圖，作出了含 0—100% Cr 及 0—60% Al 的鉄鉻鋁三元系合金的熔度圖（圖 3）。由此圖可看出，在与鉄-鉻、鉄-鋁及鉻-鋁諸二元系固溶体接連着的三元系內很大一部分合金在結晶时形成三元固溶体 α_3 。面 BCDA 是三元固溶体結晶开始的面，而面 BFEA 則为結晶終了的面。鉄-鉻-鋁系三元固溶体液相面的熔度等溫線的投影如圖 4 所示。这个熔度圖在鉄鉻鋁合金的生产方面有很大的意义。它不仅表示了三元固溶体合金熔点的变化与其成分的关系，而且在知道了合金的成分以后便能够决定該合金的熔点，因此，它对决定金屬熔化及澆注溫度是極有用的。

1939 年，И.И. 柯尔尼洛夫、В.С. 米赫耶夫及 О.К. 柯年科

格拉切娃 [6] 第一次發表了鐵-鉻-鋁三元系相圖。

稍后, И.И. 柯尔尼洛夫和 В.С. 米赫耶夫 [4] 於 1943 年發表了改进了的退火合金的鐵-鉻-鋁系相圖 (圖 5)。

鉻与鋁均为立方晶格, 因此, 就使得 α -鐵的晶型稳定。鐵-鉻-鋁三元系鐵角內的合金結晶时, 在鉻和鋁含量的 很大範圍內會發生鉻与鋁在 α -形态鐵中的三元 固溶体析出, 也可以用这一点来解釋。

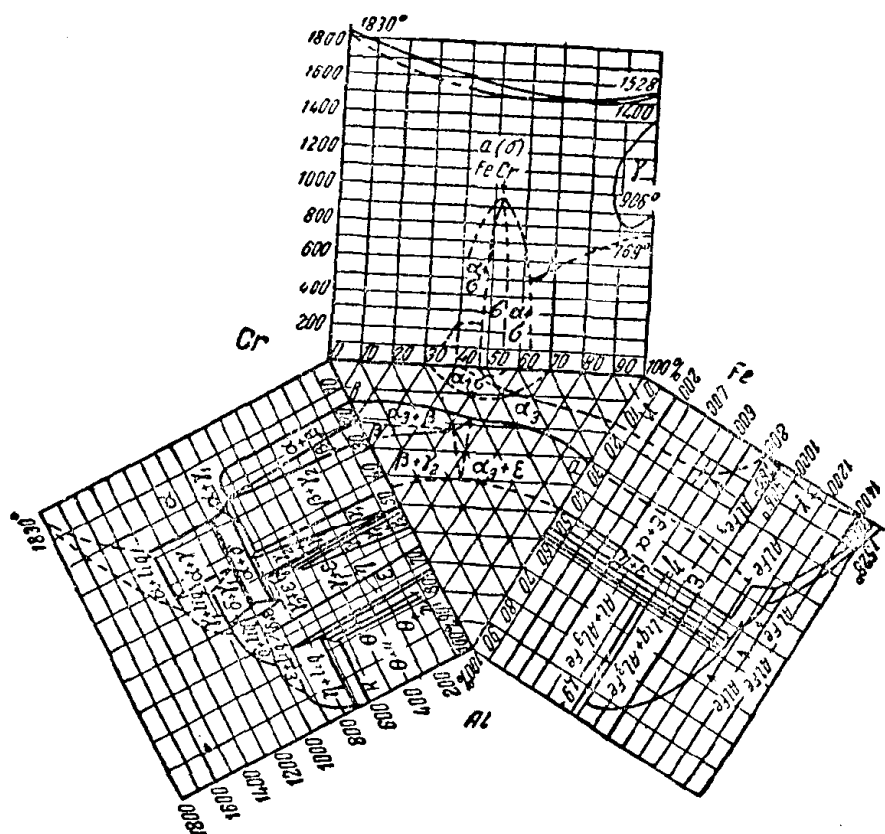


圖 5 Fe-Cr-Al 三元系中相的分佈圖

他們兩人根据热分析、合金物理性質的改变与成分的关系以及三个二元系平衡圖确定了鐵-鉻-鋁三元系內三元 固溶体 α_s 及其他相的存在範圍。在平衡圖上, 三元固溶体的存在区域以曲綫 ab 为界。三元系中的 σ 相在合金中沿 化合物 FeCr-Al 的剖面扩

展到 10%Al 处（三元系中的鋁角）。

三元系中的化合物 FeAl 的存在境界沒有确定。

根据 И.И. 柯尔尼洛夫 [5] 的資料，鉄-鉻系这边的空間平衡圖如圖 6 所示，此几何圖形很明显地表示出：三元固溶体的結晶区域， σ 相和 $\alpha_s + \sigma$ 相的扩展范围 and 固态中的 $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 转变的范围，呈傾斜面的磁性转变境界以及磁性合金和非磁性合金的存在范围。

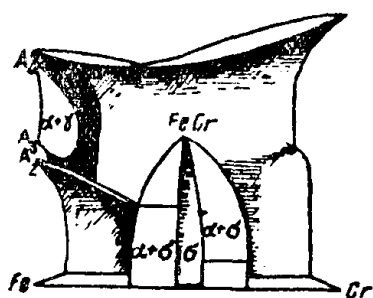


圖 6 Fe-Cr-Al 三元系
Fe-Cr 側的平衡圖

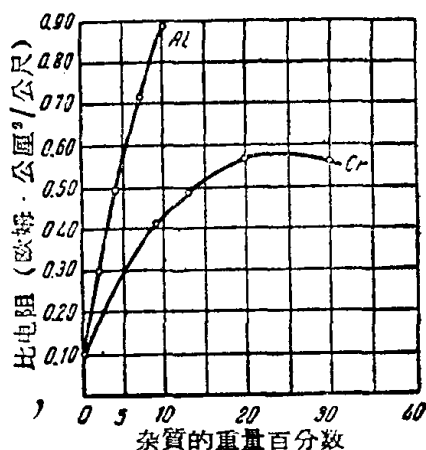


圖 7 鉻及鋁对鉄的电阻的影响

这样一来，由於研究鉄-鉻-鋁三元系平衡圖的結果，确定了此系內三元固溶体的存在范围很寬、在鉻-鋁二元系側为 0—100%Cr、0—17%Al、在鉄-鋁二元系側为 0—30%Al。И.И. 柯尔尼洛夫和他的同事們对三元固溶体的物理性質进行了系統的研究。在沒有叙述这些研究的結果与成就以前，我們先將鉄-鉻及鉄-鋁二元固溶体合金物理性質方面的某些資料引述於下。

例如，H.H. 庫尔納科夫和 H. И. 柯列涅夫 [15] 很詳細的研究了鉄鉻合金的电气性質，A. C. 翟莫夫斯基和 B. B. 烏索夫 [23] 及其他研究者也部分地研究过这些性質。根据他們的資料，把鉻加入鉄中，可提高鉄的比电阻：比电阻曲綫随着鉻含量的不同，有着固溶体合金所特有的圓滑且連續变化的特性（圖 7）。

H.C. 庫尔納科夫、Г.Г. 烏拉佐夫及 A.T. 格李戈尔耶夫研究

过铝对铁的比电阻的影响，A.C.翟莫夫斯基和B.B.烏索夫也部分地研究过它。鉄-鋁系固溶体的比电阻随着鋁含量的增大而增加。鉄的比电阻曲綫的变化与鋁含量的关系按照A.C.翟莫夫斯基和B.B.烏索夫的資料如圖7所示。

由圖上可以看到、把鋁加入鉄中引起的比电阻增大效果几乎比加同量鉻的效果要大一倍。

鋁对鉻的比电阻影响沒有研究过。

根据其他文献上的資料，鉻和鋁同时存在对鉄的电气性質的影响以及电气性質的变化与溫度的关系如圖8所示。正如圖8上的曲綫所指出的，只含鉻的合金或只含鋁的合金的比电阻比含鉻达18%、鋁达14%和碳达0.06—0.26%的三元合金小得多，而电阻溫度系数則大得很多。当鉻与鋁之比值一定时，就可得到比电阻大的及电阻溫度系数低的合金。例如，含5%Cr和12%Al, 9%Cr和6%Al, 11%Cr和6%Al的合金都有最大的比电阻。

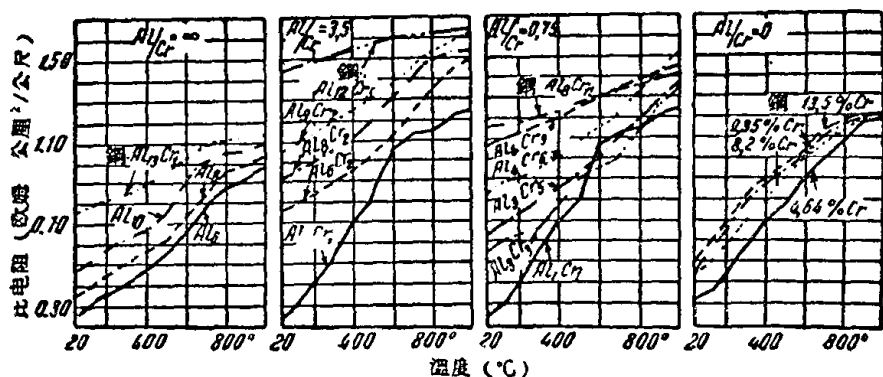


圖8 低碳鉄鉻鋁合金的比电阻与溫度的关系

И.И.柯尔尼洛夫和B.C.米赫耶夫对鉄-鉻-鋁三元固溶体合金的比电阻进行过詳細的研究。他們根据鉄鉻与鉄鋁二元合金以及鉄鉻鋁三元合金比电阻的資料，作出了表示三元固溶体合金比电阻的变化同鉻和鋁含量的关系的空間圖（圖9）。等比电阻曲綫表示於空間圖形的表面上及濃度三角形的投影面內。这些曲綫明显地指出三元合金的比电阻随着鉻和鋁含量的增加而增大。正

如从引用的資料中得出的：鋁使三元合金比電阻的增大效果比鉻大得多。這些圖對確定具備所要求的性質的合金成分有巨大的實際意義。反之，如已知合金的成分，便可由此圖確定合金的比電阻。

比電阻高的鐵鉻鋁合金應當是熱穩定的，高溫時在空氣氣氛中應具有很大的抗氧化能力。

許多研究工作者研究過鐵鉻、鐵鋁及鐵鉻鋁合金的熱穩定性。鐵鉻合金在900、1000、1100、及1200°C下的氧化曲線與鉻含量的關係引於圖10。當鉻含量在0到10%之間時、氧化曲線的變化不大，例如，含鉻10%的合金，在1100°C的氧化條件下，重量的增加為0.10公分/公分²，在1200°C時為

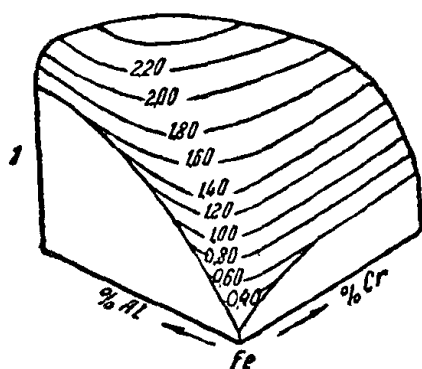


圖 9 Fe-Cr-Al 固溶體的比電阻

1—空間圖；2—投影

0.125公分/公分²，在1200°C時為

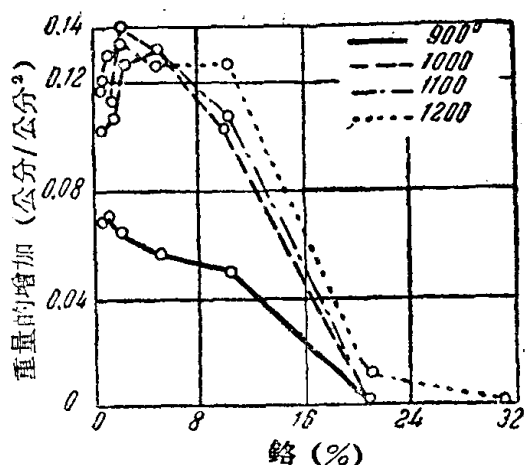


圖 10 在不同溫度下鐵鉻合金的氧化與鉻含量的關係

時迅速減小（圖11）。含4%Al的合金在1100°C氧化時，重量的增加約0.10公分/公分²，而含6%Al的合金在同一溫度氧化時，

0.125公分/公分²，含20%Cr的同種合金，在同一溫度同一時間內氧化時重量的增加約為0.01公分/公分²。根據文獻上的資料，鋁對鐵的氧化影響如圖11所示。鐵鋁合金在1100°C的氧化速度於含鋁量在1—6%之間時迅速減小，在1200°C時的氧化速度於含鋁量在4—8%之間