

精密电工合金

唐义慧主编



机械工业出版社



精密电工合金

唐义慧 主编

*

机械工业出版社出版 (北京苏州胡同141号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $7 \frac{10}{16}$ · 字数 195 千字

1966年3月北京第一版·1966年3月北京第一次印刷

印数 0,001—3,500 · 定价(科六)1.10元

*

统一书号: 15033·3971

序

精密电工合金具有磁的、电的及其它物理化学性能，是电机、电器、仪表、仪器、自动化元件及电子计算机等产品的关键材料。对电器工业产品质量的提高有决定性的作用。

随着国民经济各部门电气化、自动化程度的日益提高，和科学技术及国防尖端的日益发展，显示出电工产品应用的广泛性和基础性，因而迫切需要提高质量，发展品种。

我国电工合金专业，是解放后在党的关怀和领导下才建立的。电工合金的特点是：品种繁、规格多、工艺复杂、性能要求严格。如何能使电工合金技术水平尽快地适应国民经济建设形势发展的需要，对每个从事电工合金专业的工作者提出了艰巨而光荣的任务。一方面我们需要发奋图强，自力更生，另一方面也需要吸取国外生产上的先进经验，和科学研究方面的新成就，以便多、快、好、省地迎头赶上国际水平。

为此我们编译了这本精密电工合金文集。

本书的内容介绍了高矫顽永磁、高导磁、钴40镍铬钼、热双金属及触头材料等一些研究试制的经验。对试制这些合金有一定的参考价值。适合于从事精密合金的科技人员，生产车间的工长和熟练工人，以及高等院校合金专业的学生阅读参考用。

本书编译内容限于水平恐有不少错误与不足之处，希读者给予指正。

主 編

1964.11月

目 录

序

高磁能永磁的制备	1
铂合金永磁 Platinax II 的性能及应用	7
Mn—Al 系新永磁材料	15
高导磁率的铁铝合金 IO12 和 IO12K	20
Dynamax——一种新的晶粒及磁畴取向的磁性铁芯材料	26
超坡明杜 (Supermenclur)	32
具有弱各向异性的高合金冷轧电工钢	40
高磁性弱织构的电工钢带	47
冷轧变压器钢的磁感应与最终退火制度的关系	54
Fe—Co—V 合金的冶金学及磁性	59
变压器钢板垛磁性的不均匀性	75
硅钢在真空中退火的二次再结晶	82
论用粉纹图的方法研究变压器钢的磁性能	86
精密电阻合金稳定化的某些方法	95
论精密电阻合金的不稳定性	100
K40HXM 合金弹性材料	112
K40HXM 合金在热变形温度区域内的结构变化	125
K40HXM 弹簧合金的强化问题	135
铍铜	144
电气触头材料方面的新研究及发展方向	154
银-氧化铁系触头原料粉末的调制方法	162
银-氧化铁触头材料的烧结	173
钡和钙对镍赫罗姆 (Нихром) 使用寿命的影响	184
铁-铬-铝合金的高温氧化薄膜	193
电热元件用合金的快速试验方法	203
热双金属的老化处理	213
双金属片轧制时弯曲的研究	227

高磁能永磁的制备

Б. Г. Королев В. М. Пименов

提高永磁合金磁能，对所有的磁系统皆具有重要意义。在一般条件下熔炼的非方向结晶的马格尼可合金磁能约为 4.5×10^6 高斯·奥斯特。若获得柱状结构，则合金的磁能将更高些。

在合金中加入铈和钽，就可获得具有方向结晶的磁铁，其磁能为 $6.0 \sim 7.5 \times 10^6$ 高斯·奥斯特。若要进一步提高磁能就有一定的困难了。

在我们这工作中，试用真空熔炼来提高合金的磁能。合金化学成分选用已发表文献中所用的：非方向性结晶磁铁含有 Co 24.5%；Ni 14%；Al 8.5%；Cu 3.5%；其余为铁的合金；方向性结晶磁铁则在上述合金成分中，加入 Nb 1%。含铈合金在很大程度上增强了方向性结晶的趋向，从而改善了磁性。

本文叙述如何通过真空熔炼获得最好的柱状晶粒生长条件。

真空熔炼对合金性能的影响，现在已有许多研究者对此作了详细的探讨，采用这种方法时，良好的效果是：真空熔炼后氧含量降低到 0.001~0.0032%，而炭则减少到 0.005%，因而就使磁能提高。为产生方向性结晶，作者尽最大可能使整个磁铁极轴的全长生长出粗大的晶粒。

熔炼时选用在高温下难于离解的氧化铝制坩埚。在容量为 5 公斤的感应炉中熔炼，用 50 千瓦 2500 赫芝的发电机供电，用 BH-4 型真空泵抽真空，真空度达到 2~3 毫米汞柱。

将带有毫伏计的 BP5/20 型钨-铈热电偶浸在合金液中以测定其温度，每次熔炼测量 2~3 次。测量结果与热电偶端的保护头

(钢玉) 状态有关, 每测 5~6 次后, 需要截去热电偶的接点端, 并重新焊接好。

通常用大批生产时的原料作炉料: 阿姆可铁 A, 阴极镍 H1, 钴 K1, 阴极铜 M0, 一次铝 A00 及蕊柱状钨。

真空熔化炉配备有储料箱, 由于 Fe, Ni, Co 和 Cu 的量不大, 因而可同时放入坩埚中, 只有 Al、Nb 才放置在储料箱中。在熔炼过程中可以通过孔眼观察, 用 U 形水银气压计测量熔炉的气压。

在真空炉中熔炼后, 浇铸到与熔炉紧接的特制密封室内的干砂型中。

将真空中熔炼、氩气中熔炼及其它条件相同时、在空气中感应炉内熔炼三者的结果进行比较, 证明在真空中及惰性介质中熔炼的磁铁具有较高的磁能 (如表 1)。

表 1 在真空中、氩气中及在空气中的感应炉内熔炼
后铸造的磁铁的磁性比较

炉号	炉料化学成分% (余 Fe)				磁 性			
	Ni	Co	Cu	Al	B_r Gs	H_c Oe	$(BH)_{\max}$ $\times 10^6$ Gs·Oe	η
26	14	24.5	3.2	8.5	13100	640	5.3	0.63
27	14	24.5	3.2	8.5	13150	640	5.3	0.62
30	14	24.5	3.2	8.5	13100	640	5.2	0.61
31	14	24.5	3.2	8.5	13400	630	5.5	0.66
9	14	24.5	3.2	8.5	12000	620	4.4	0.59
10	14	24.5	3.2	8.5	12000	620	4.65	0.61

〔注〕 炉号 26 及 27 是在真空中进行; 30 及 31 是在氩气介质中进行; 9 和 10 是在空气中感应炉内进行。样品尺寸为 $15 \times 15 \times 40$ 毫米。所有样品皆按下列规范进行热处理: 在电炉中加热到 1300°C , 在磁场中冷却, 每四个试样一捆, 用两层石棉裹着保温, 然后进行两段回火 (640°C 2 小时及 580°C 6 小时)。

进一步将通过真空熔炼问题来研究制备方向性结晶的磁铁。熔炼是在真空炉中进行, 而浇铸及结晶过程在空气中进行。

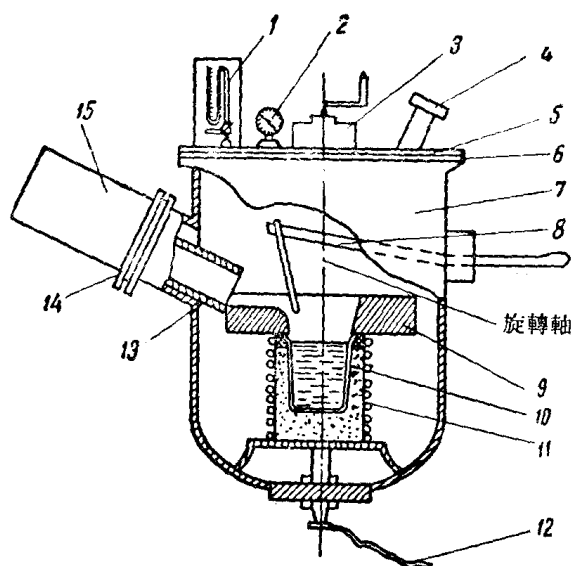


图1 真空感应炉（具有转动轴）：

- 1—U形气压计；2—弹簧压力计；3—储料箱；4—观察孔；
5—上部顶盖板；6—橡皮垫圈；7—炉体；8—热电偶接点；
9—耐火土板；10—坩埚；11—感应圈；12—抽气管；13—
导流漏斗；14—橡皮垫圈；15—紧接炉体的密封室。

熔炼的原料总重3公斤，炉料经20~25分钟全部熔化；保持10分钟后，加入Al和Nb，由于添加这些组元后真空变坏，需要继续抽气5分钟，然后把真空泵停掉，在真空箱中充满氩气，使压力升到760毫米水银柱高，熔炼温度到达1650℃，金属浇进预先加热至500~600℃的铸模中。

图2示出了获得方向性结晶磁铁的装置。用高频感应(150~250千赫芝)加热。金属浇进石墨加热器中央的石英管内。加热壁的厚度为50毫米，可以使用30~35次，石英管放在铜制的通水冷却器上面，上端装有一个由泡沫粘土砖做的顶盖，加以固定，铸件在浇铸前的温度保持在1400~1500℃之间，这个温度由一支带有毫伏计的Pt-PtRh热电偶（不浸入的）来测定。

合金浇铸出来后，马上接通振荡器（用作补偿耗热量），经25

分钟使合金结晶，并使铸件缓冷，直至 $900\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 时为止，然后，移至砂中冷却。获得方向性结晶磁铁的全部过程，包括装置铸模及冷却器，加热模型和合金结晶，总共所需时间为 $60\sim 70$ 分钟。

图 2 还简略的示出了铸件的柱状结构，这些柱状晶粒分布在磁铁的全部高度上。

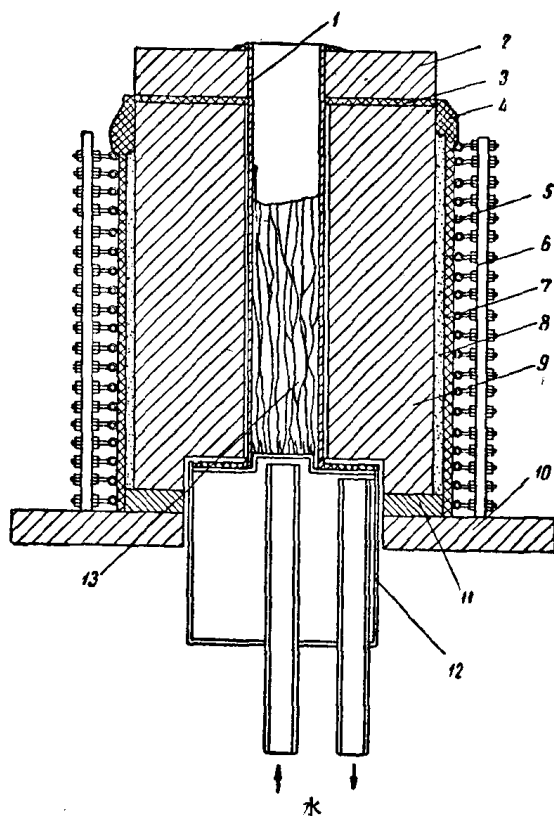


图 2 制取方向性结晶磁铁的装置图：

- 1—石英管；2—由泡沫粘土做的顶盖；3—石棉垫衬；4—粘土涂料；
- 5—感应器；6—支柱；7—绝缘涂料；8—石棉填充物；9—石墨加热器；
- 10—石棉水泥板；11—耐火土坯；12—铜的冷却器；13—铸件。

磁铁的热处理包括在磁场中淬火及回火，样品在马弗电炉中预热至 800°C ，然后转入大功率的高温炉中，最后加热到 1300°C ，

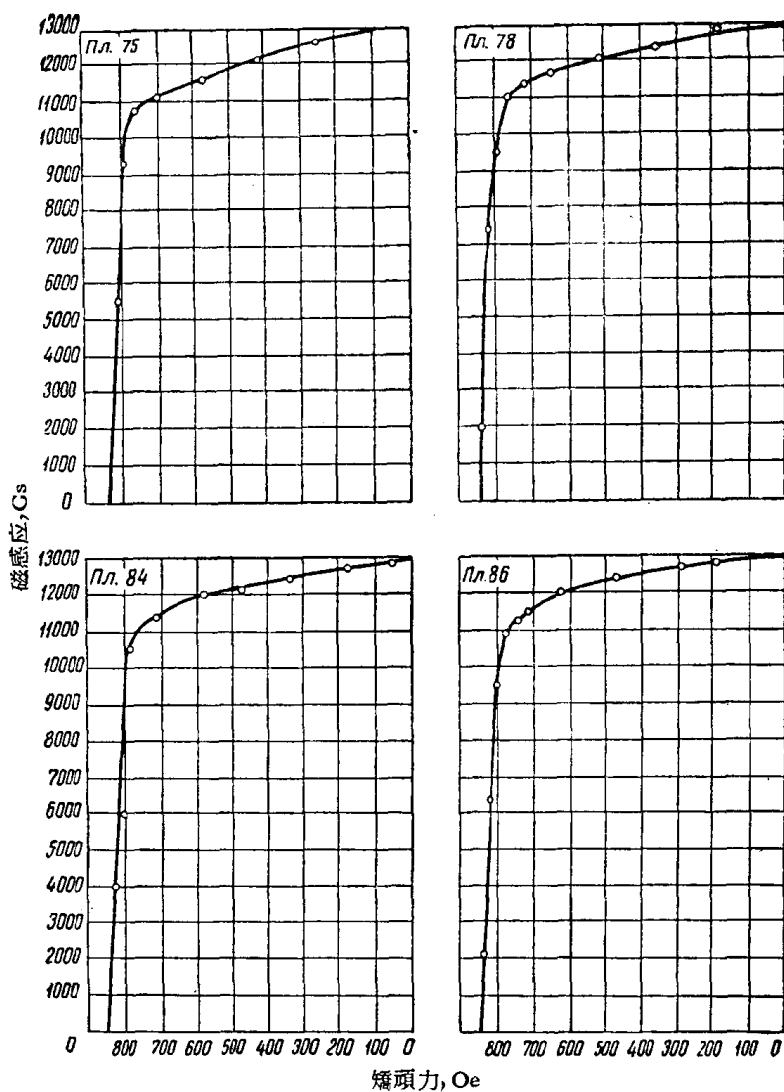


图3 由所述方法制取磁能大于 8.0×10^6
高斯·奥斯特磁铁的退磁曲线。

保温 15 分钟后,放到磁场为 4500 奥斯特的电磁铁两极间,冷却到温度为 $800 \sim 1000^\circ\text{C}$ 时,冷速不低于 $2^\circ\text{C}/\text{秒}$ 。然后,借助石棉保温试样,以减慢冷却速度。当冷到 600°C 时,结束热磁处理,把磁铁移入马弗电炉。此时磁铁按下列规范进行两段回火: 600°C 24 小

时及 560°C 24 小时。

为了较精确地测量样品磁性，将圆柱状磁铁加工成截面为 28×28 平方毫米（正方形）长为 60 毫米的试样。

图 3 给出由上述熔炼方法得到的磁铁的退磁曲线，按照这些曲线用图解法确定最大磁能的数值，它们是 $8.0 \sim 8.36 \times 10^6$ 高斯·奥斯特。

最后，试验指出，对于生产形状复杂的磁铁，利用真空熔炼及在惰性气体中浇铸，也是不可能获得柱状结晶的。

利用真空熔炼再经过方向结晶，就可获得磁能为 $(8 \sim 8.36) \times 10^6$ 高斯·奥斯特的磁铁。

译自 Изв. вуз черная металлургия, 第 9 期, 1961 年, 124~128 页

铂合金永磁Platinax II 的性能及应用

R. A. Mintern

许多年前，就已知道 Pt—Co 合金具有强铁磁性。1936 年 Jellinghaus [1] 已经证明含 Co 原子量 50% 的合金，经热处理以后，有非常大的矫顽力。在较近的研究中，J. B. Newkirk, R. Smoluchowski [2, 3] 及 A. H. Geisler, D. L. Mertin [4, 5] 等均指出，当合金在 50% 原子量附近时，冷却到低于 825°C 并经过热处理后就属于有序结构，这种部分有序化的处理方法，能使合金获得高磁性能。

合金成分的微小偏差或热处理条件稍微改变，皆可使合金磁性产生很大的变化。Johnson Matthey 研究所在改进 Platinax II 合金生产所得的结果中指出：合金具有优越的磁性是与适宜的制造工艺密切有关的。

这种合金在退火状态，不但可以很容易进行机械加工，而且能够轧制或拉伸，可以毫无困难地制成实际要求的任何尺寸。用这种优良材料制成形状复杂或尺寸很小的磁铁，与由贱金属做成的永磁合金比较是有巨大意义的。那些由贱金属做成的永磁合金，大多数很脆，除了用磨研方法外，用其他方法是不能进行加工的。虽然这种合金的成本高，但是，在要求同样的磁能下，它的尺寸很小；适于用来制造小型磁铁，例如小线段、薄圆片或由丝或带材做成的小配件等，所以成本高也是合算的。

Platinax II 可用来代替一般的永磁材料。当然，应该用在能充分利用它的磁性的地方。要按照实际磁路中所要求的磁通密度去选定磁铁的最经济的大小及适宜的形状。这样，才能使它所独有的磁性在应用中得到巨大的经济效果。

Platinax II 的磁性

Platinax II 的最优磁性是经过双重热处理〔6〕使原子结构有序化后获得的。第一步热处理是在950~1000°C下保温约3小时,使成为无序结构;第二步是把工件移入660°C的盐浴炉中,工件在这个温度下保温15~45分钟。当工件在无序化处理时,需用保护气体来防止氧化,并且在移入盐浴炉时,操作要尽量快,以避免工件温度降低到低于660°C。对小工件,最好先用氧化铝粉粘结好,包上镍片并用金属丝把镍片扎好以便拿取。在660°C的保温时间是由材料所受到的加工度决定的,各炉处理条件可以不同。在15~45分钟范围内进行系统的热处理试验,通过对样品测试所作的退磁曲线和计算得的 $BH_{\max}$,用来确定最优磁性的相应保温时间。

经过热处理的合金是各向同性的,即在任何方向上充磁皆可得到相同的磁性,这样,对于由薄片冲成的小零件或圆柱零件,充磁都很方便。

表1 Platinax I 的典型性能

性 能	数 值
剩磁(B_r), Gs	6400
矫顽力(H_c), Oe	4800
磁能积(BH) $_{\max}$, Gs·Oe	9.2×10^6
在(BH) $_{\max}$ 点之磁通密度(B_d), Gs	3400
在(BH) $_{\max}$ 点之退磁场强度(H_d), Oe	2700
充磁要求的磁场, Oe	≥ 20000
居里温度, °C	≈ 500
回火后电阻率, $\mu\Omega\text{-cm}$	42.4
硬化后电阻率, $\mu\Omega\text{-cm}$	30.2
回火后硬度	200~210
硬化后硬度	305~315
线膨胀系数(在0~100°C), $1/^\circ\text{C}$	9.3×10^6
比重	15.5

Platinax II 合金经适当热处理并充磁后, 具有剩磁(B_r)6400

高斯；矫顽力 (H_c) 4800 奥斯特；磁能积 $(BH)_{\max} 9.2 \times 10^6$ 高斯·奥斯特。图 1 所示的退磁曲线及磁能积曲线是按上述条件进行热处理后所得到的典型曲线。

磁性材料的磁滞迴线，是用图解法表明磁通密度与磁化强度之间的关系，迴环的面积是能量的量度，是材料在磁化时经过它的两个不同方向上的饱和磁化点而作出的迴线。在软磁材料中，这个迴环很重要，但在永磁材料中，例如 Platinax II，在第二象限的迴环部分，也即退磁曲线，对于设计

上是很重要的。它给出在应用中的两个重要的特性：一是 B_r ，它是磁铁充磁至足够饱和后再回复到无磁场状态的磁感应值；另一是矫顽力，它是使磁铁剩磁 B_r 减少到零时所需要反方向磁场的值。

磁能积或 BH 曲线，能很方便地给出磁铁最优工作点。在上图中虚线表示这个合金工作点为 $B_d = 3400$ Gs； $H_d = 2700$ Oe。当将磁铁的工作点设计在该点时，在具有一定的磁场强度要求下，磁铁的体积为最小。

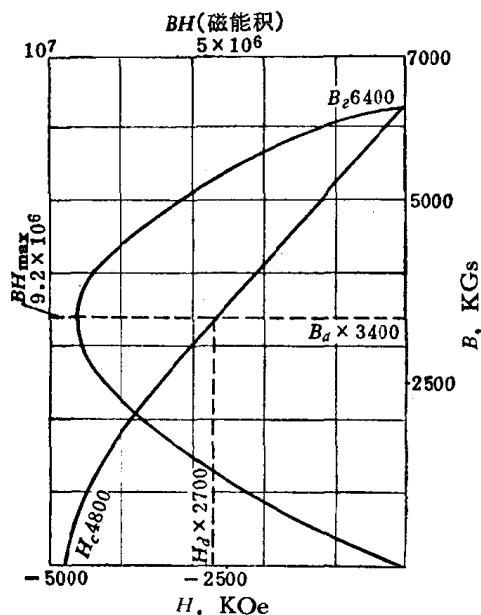


图 1 Platinax II 的退磁曲线及磁能积曲线图。

充磁程序

Platinax II 具有很高的矫顽力，所以要求充磁的磁场强度最少为 20000 奥斯特，才能得到应有的最优磁性。经过这样充磁的

合金就很难退磁了。

圆柱形或长方形的试样充磁时，可以放在电磁铁的两极中进行。但是较长的磁铁，因为要求两极空隙要有较高的场强，所以这个方法是有了一定限度的。

对于较大型的磁铁，可以把它放在用大截面铜线绕成匝数不多的空心螺旋管中充磁。在很短时间內，在铜线中通过几千安培电流来产生磁场；这样大的电流，可以用电容器放电，或用与控制电接触头装置类似的方法，使功率大的交变电源的大电流在半个周波內流过线圈。这些方法通常称为“脉冲充磁”。这种技术也可用于进行马蹄形或环形磁铁充磁，这时用一根直铜棒穿过零件中心来代替螺旋管，磁铁的两极气隙用软铁或坡莫合金组成闭合迴路，使气隙的磁阻降低。

局部磁滞迴环的斜率

在实际应用中，当 H 的值不是恒定时，磁铁在退磁状态下呈现周期性的变化。这时磁感应值与主退磁曲线不一致，而是在次级的或称为局部的迴环上。这个合金退磁曲线上三个典型的局部磁滞迴环的斜率，如表 2 所示。

表 2 局部迴环的斜率

局部迴环的起点		局部迴环的斜率 (即可逆导磁系数)
H	B	
Oe	Gs	$\mu_r = \frac{\Delta B}{\Delta H}$
-2000	4000	1.13
-3000	2800	1.14
-3600	1900	1.16

温度循环的影响

一般上，磁铁可能在温度反复变化的情况下使用，这包括环

境温度的改变, 例如在航空仪表和控制装置中使用。对由铸造并经过加工的 Platinax II 磁铁进行了一系列试验, 获得在 -40°C 至 $+70^{\circ}\text{C}$ 之间温度循环变化对磁铁所产生的效应。首先在室温下测定磁铁的剩磁及矫顽力数值, 然后使磁铁冷到 -40°C , 又让其自然回复到室温, 再次升到 70°C , 最后自然冷却至室温, 这样的处理后, 使剩磁及矫顽力产生微小下降, 但是对同一样品, 如继续在 -40°C 至 $+70^{\circ}\text{C}$ 温度之间循环变化, 剩磁和矫顽力将不再变动, 因此这个磁铁在 $-40 \sim +70^{\circ}\text{C}$ 内使用, 其磁性是稳定的。

在较高温度时的磁性

虽然 Platinax II 在较高温度下使用时, 磁通密度有一定降低, 但仍可使用。图 2 指出, 当温度升到 350°C 的限度内, 将磁铁保温到 1000 小时时磁通量的减小〔1〕。在这些温度下保温时磁通的减小主要是在最初几分钟内, 这个结论在图 3 中更明显地表示出: 磁通的减小几乎是在最先的五分钟内出现; 若再继续长时间加热时, 磁通的减小就要慢些, 表 3 是在不同温度下, 经 5 分钟 2 小时和 1000 小时加热, 工作磁通减小的百分比。

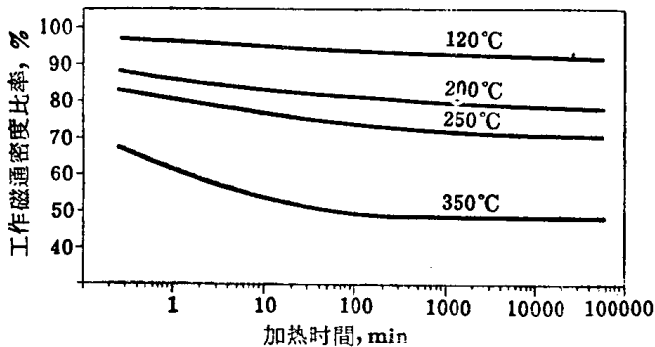


图2 在各温度下加热时间与工作磁通密度的变化关系。

当温度增加到 250°C 时, 对磁铁的原始磁性没有破坏作用, 磁铁经重复充磁后, 几乎可以恢复原有性能, 只是由于矫顽力降低的结果使磁能积 $(BH)_{\max}$ 稍为减小, 但在 350°C 经 1000 小时

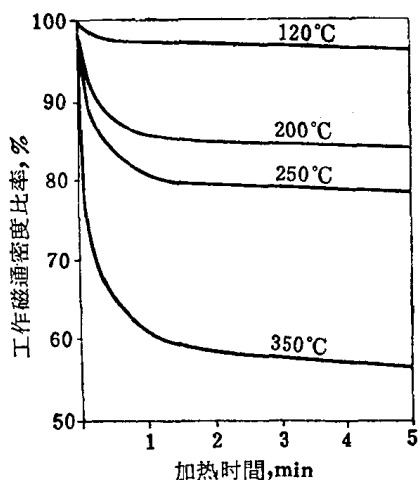


图3 在各温度下加热时在最初5分钟内工作磁通密度下降曲线图。

表3 在较高温度时工作磁通减小的百分比

温度 °C	在相应温度下加热时间 磁通减小百分比		
	5min	2h	1000h
120	3	5.5	7.5
200	16	18.5	22.5
250	21.5	26	29
350	43.5	50.5	51

加热后,原始磁性则有某些永恒性的破坏作用,这可能是晶体结构的有序化程度增加的结果。在这个温度下加热1000小时后,经重复充磁所得的剩磁及矫顽力数值,比原始数值低。表4指出在350°C以下的几个温度中,经1000小时加热,样品在加热前后所测定的 B_r 、 H_c 及 $(BH)_{\max}$ 的数值。由表可见,甚至在这样较高极限的条件中处理后,磁性仍是非常高;其值分别为: $B_r=6230$ Gs; $H_c=4600$ Oe; $(BH)_{\max}=8.35 \times 10^6$ Gs·Oe。在高于350°C磁性恶化更快,因由这温度开始一直到合金的相变温度825°C时,将会促使合金进一步有序化。

表4 在较高温度下经1000小时加热,样品在加热前后所得之磁性

特 性	原 始 值	在各温度下加热1000小时后重复充磁之值			
		120°C	200°C	250°C	350°C
剩磁, Gs	6400	6400	6400	6360	6230
矫顽力, Oe	4800	4700	4650	4620	4600
磁能积, Gs·Oe	9.2×10^6	8.9×10^6	8.8×10^6	8.6×10^6	8.4×10^6

既然磁通的减小大部分是发生在加热开始的时候，那么如要求较高温度下使用时，可在可能达到的最高使用温度下，事先经过约 2 小时的短期加热处理，则在使用中磁性便能够稳定了。

抗 腐 蚀 性

Platinax II 具有高的抗腐蚀性，其磨光表面在大气中暴露月余后，仍保持不变；同时，在通常温度下，无机酸和氢氧化钾对合金皆没有腐蚀作用。

Platinax II 也可以长期浸在热的强硫酸溶液中而不受浸蚀，因此它可用于需要直接放置在腐蚀性液体的机器和仪表中。

Platinax II 的应用

这种高磁性的材料，适用于要求磁铁非常小时，能充分利用它的高磁能积及高矫顽力，是小型设备中不可缺少的永磁材料。磁铁在开路状态下，在退磁曲线上 $(BH)_{\max}$ 工作点的长度与有效直径比为 1~1.2。

Platinax II 可用于：小型替续器、重量非常轻的再生录音器中的立体或单向拾音器，以及各种磁性离合器。也可以试用于：动磁式扬声器、电磁式电流表、医学研究上用的低功率换能器以及要求抗腐蚀性高的仪器中。

由 Platinax II 薄片冲成的磁铁，可做成助听器和耳机，这种磁铁的直径为 0.3125 吋，只有 0.003 吋厚，充磁方向是沿着厚度方向，使用这种磁铁后，形状大小及重量均显著减少，助听器的大小：长为 0.5 吋，最大宽度为 0.45 吋，厚度为 0.296 吋，而耳机尺寸分别为 0.43 吋，0.59 吋。它们都具有优良的频率特性。

参 考 文 献

- [1] W. Jellinghaus, Z. Tech. Physik, 1936, 17, 33.
- [2] J. B. Newkirk, A. H. Geisler, D. L. Mertin, R. Smoluckow-