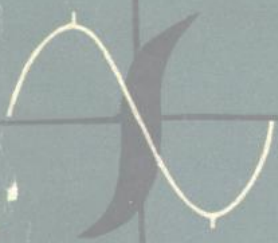


电 工 钢

[苏联] Н.Ф.杜布罗夫 著
Н.И.拉普金



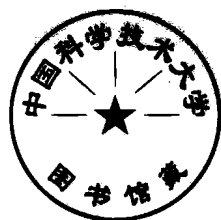
中国工业出版社

电 工 钢

〔苏联〕 Н.Ф.杜布罗夫 Н.И.拉普金 著

彭石之 关克强 柳鸿元 译

杨惠华 校



中国工业出版社

本书旨在叙述电工钢的磁性和现代生产方法（冶炼、铸锭、热轧、冷轧、酸洗、热处理），介绍改善磁性和机械性能的途径，研究钢板和带钢的化学成分和表面质量对磁性的影响。对涂耐热绝缘层的高斯结构和立方结构变压器钢卷的生产特点和各种性能也作了说明。

本书供冶金、电机工程、无线电和仪表制造等专业的工程技术人员使用，也可供有关专业的高等学校学生参考。

Н.Ф.Дубров, Н.И.Ляпкин
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СТАЛИ
Металлургиздат Москва 1963

电 工 钢

彭石之 关克强 柳鸿元 译

杨 惠 华 校

*

冶金工业部科学技术情报产品标准研究所书刊编辑室编辑（北京灯市口71号）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

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 $12 \frac{1}{16}$ ·字数291,000

1965年12月北京第一版·1965年12月北京第一次印刷

印数0001—4,020·定价（科五）1.70元

*

统一书号：15165·4188（冶金-645）

前 言

1962年，全世界电工鋼板的产量已超过 150 万吨。大家都知道，如果没有优质电工鋼，那么电机工程、无线电技术、无线电电子工程、自动控制、遙控机械、仪表制造等便不可能得到发展。

同时，到目前为止，世界文献中还没有专门介绍电工鋼生产和处理工艺的著作。梅什金 (В. С. Меськин)、扎依莫夫斯基 (А. С. Займовский)、博佐尔斯 (Bozorth R.)、斯坦利 (Stanley J. K.)、布雷斯福特 (Brailsford F.)、巴夫列克 (Pawlek F.) 在1937~1952年写的著名的专题著作^[1~6]，以及德魯日宁 (В. В. Дружинин)^[221]和雷因博特 (Reinboth H.)^[232]的著作，主要是论述磁性材料的性能和試驗方法，以及鉄磁性的一般問題。

本书对热轧及冷轧鉄硅电工鋼板和带鋼在冶炼、鑄錠、軋制、热处理和表面加工方面的現代經驗作了系統整理，这在一定程度上弥补了过去文献的不足。

作者編写本书时，利用了烏拉尔黑色金属科学研究所、上依謝特鋼鉄厂、新西伯利亚鋼鉄厂、列宁格勒軋鋼厂、馬格尼托哥尔斯克鋼鉄公司的研究成果，并且还利用了 И. П. 巴尔金中央黑色冶金科学研究所、国立黑色冶金鑄鋼与軋鋼設備設計院、国立冶金工厂設計院、全苏冶金机械制造科学研究所、中央生产工艺与生产組織科学研究所等单位已发表的資料，以及国外某些研究人員的重要著述。

有关美、英、西德、日本、瑞典的电工鋼磁性資料，系取自美国軋鋼公司 (Armco Steel Corp.)、合众国鋼鉄公司 (United States Steel Corp.)、威尔士鋼鉄公司 (Steel Co. of Wales)、

IV

理查·托馬斯和鮑德溫公司 (Richard Thomas and Baldwins Ltd)、約瑟夫·森凱父子公司 (Joseph Sankey and Sons Ltd)、博胡姆鋼鐵公司 (Bochum)、維里·什里克公司 (Willy Schliker Co.)、八幡鋼鐵公司 (八幡制鐵株式會社)、蘇拉哈瑪 (Surahammar) 等公司的情報資料和產品樣本。

在完成本書所闡述的許多研究項目中，作者曾得到烏拉爾黑色金屬科學研究所精密合金實驗室米羅諾夫 (Л. В. Миронов)、多羅舍克 (С. И. Дорошек) 和戈爾拉契 (И. А. Горлач) 的協助。

技術科學博士梅什金教授閱讀了本書手稿，並提出了許多寶貴的批評性意見，這些意見在本書中已全部採納。

作者對上述個人，以及曾協助本書問世的各工廠、研究機構和設計單位的工作人員，謹致謝意。

本書第一、四、五、六、七章系拉普金 (Н. И. Лапкин) 執筆；緒言和第二、第三章系杜布羅夫 (Н. Ф. Дубров) 撰寫；第四章中的“在設有爐內卷取機的可逆式軋機上熱軋帶鋼”一節，系查蘇哈 (П. Ф. Засуха) 編寫。

目 录

前 言	
绪 言	1
第一章 现代电工钢的类型及性能	7
电工钢类型	7
品种	14
电磁性能	17
物理性能	59
第二章 合金元素和杂质对电工钢性能的影响	71
硅	71
铝	73
碳	77
硫	86
锰	89
铜	93
磷	95
镍	98
铬	98
非金属夹杂物	99
气体	101
第三章 电工钢的冶炼和浇铸	104
电弧炉冶炼变压器钢	104
平炉冶炼电工钢	137
真空感应炉冶炼变压器钢	152
第四章 电工钢钢板和带钢的轧制	157
钢板的成迭热轧	158
在連續式軋机上热轧带钢	172
在設有炉内卷取机的可逆式軋机上热轧带钢	177

VI

成卷冷軋	186
第五章 电工钢热处理设备和工艺	208
鋼板和鋼卷的低溫退火	208
成垛鋼板的高溫退火	221
帶鋼在連續式炉內退火	250
第六章 各号电工钢的热处理特点	269
熱軋鋼板	269
低纖构鋼板和鋼卷	276
高斯纖构变压器鋼	282
立方纖构变压器鋼	293
第七章 电工钢板和钢卷的表面处理	307
鋼板和鋼卷的酸洗	307
电工鋼的脫脂	323
鋼板和帶鋼的燻干	338
鋼板和帶鋼的絕緣	345
参考文献	372

緒 言

苏联电工鋼生产的发展，可分为三个阶段：

第一阶段——掌握与改进热轧电机鋼的生产；

第二阶段——掌握与改进热轧变压器鋼的生产；

第三阶段——研究制定电工鋼生产的新工艺过程；試制和大規模生产冷轧变压器鋼和电机鋼。

第一阶段（1915~1927年） 1915年，俄国初次在上依謝特鋼鉄厂組織电机鋼生产。該厂生产的电机鋼的质量，符合当时对这种鋼的要求（单位鉄損 $P_{10/50}$ 不超过3.5瓦/公斤；在磁场强度为28.9奥斯忒时，磁感为14000高斯），而且成功地用于俄国各电机工厂〔8，9〕。

1916年，上依謝特鋼鉄厂曾經試图組織生产变压器鋼，但由于革命以前俄国技术水平低，因此未能取得良好的結果。

第二阶段（1928~1945年） 为了實現全俄电气化委员会的計劃，这不仅要求大大提高电机鋼的产量，而且还必須試制变压器鋼。当时国外已大規模生产变压器鋼，但是任何地方都沒有发表过有关变压器鋼生产的工艺資料。

在苏联，上依謝特鋼鉄厂于1928年首先生产了变压器鋼。根据施坦別尔格（С. С. Штейнберг）的資料〔10〕，上依謝特鋼鉄厂当时生产的变压器鋼的磁性（单位鉄損，瓦/公斤）为：

鋼板厚度	技术条件規定		实际情况	
毫米	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$
0.35	1.3	3.3	1.6	3.4
0.50	1.7	4.0	1.8	3.9

于是，在上依謝特鋼鐵厂冶金工作者面前提出了一項重大而繁雜的任务：在短期內为国家提供必需数量的变压器鋼，而且要大大提高它的质量。因此，必須广泛开展研究工作，探索电磁性能合乎要求的变压器鋼的生产工艺。

最初所进行的研究，主要是在当时所采用的电弧炉炼鋼、二輥軋机热送軋鋼板、燃煤隧道炉退火等冶金生产技术的基础上，为变压器鋼的冶炼、軋制、退火寻求合适的工艺过程。經過研究以后，制定了一些措施，并且在生产中加以运用。这些措施主要是降低碳、硫等有害杂质的含量，因此对提高鋼的磁性有某些帮助。

在1942年頒布生效的有关电工鋼板的ГОСТ 802-41中，已經有可能对变压器鋼作出以下的規定：厚0.35毫米的鋼板，单位鉄損 $P_{10/50} = 1.2$ 瓦/公斤；厚0.50毫米的鋼板，单位鉄損 $P_{10/50} = 1.45$ 瓦/公斤。但是，上依謝特鋼鐵厂当时生产的变压器鋼，其性能的平均水平長時間低于該指标，即：

鋼板厚度，毫米.....	0.50	0.35
单位鉄損 $P_{10/50}$ ，瓦/公斤.....	1.50	1.30
磁感 B_{25} ，高斯.....	14400	14400

第三阶段（1946~1962年） 在第二次世界大战結束以后，大力开展了恢复国民經济和使国家进一步工业化的建設工作。苏联建設的古比雪夫、卡霍夫卡、伏尔加格勒（斯大林格勒）等大型水电站，为国家建立了强大的电力基础^[11]。无綫电工业得到了巨大的发展，无綫电收音机产量显著增加，电视机也开始大批生产。所有这一切，都說明了必須增加电工鋼的产量，提高电工鋼的质量，創造新的鋼种。工业方面的要求很高，原有的工艺已經不能滿足，因而提出了根本改进旧有工艺和創造新工艺的任务。

研究工作广泛地开展了起来，参加研究的，有苏联国内的許多科学家，以及上依謝特鋼鐵厂广大的工程技术人员和工人。上

依謝特鋼鐵廠會同烏拉爾黑色金屬科學研究所就鋁和硫對變壓器鋼性能的影響進行了研究，在該項研究的基礎上，發現有可能創造一種平爐冶煉高硅變壓器鋼的新工藝^[12, 13]。這種工藝使變壓器鋼產量大約提高了0.5~1倍。在電爐冶煉變壓器鋼生產中精確地控制了鋁、硫含量極限，從而大大提高了隧道爐退火的高標號變壓器鋼的產量^[14]。

由於堅持不懈的探索，在上依謝特鋼鐵廠首先制定了變壓器鋼高溫真空退火工藝。1948年，開始在工業上採用真空退火，從而有可能使生產的大量變壓器鋼的單位鐵損 $P_{10/50}$ 達到1.10瓦/公斤（鋼板厚0.50毫米）和0.90瓦/公斤（鋼板厚0.35毫米），亦即比隧道爐退火變壓器鋼的單位鐵損低30~40%^[15]。由於掌握了真空退火，上依謝特鋼鐵廠為無線電電視工業所需的許多新牌號熱軋電工鋼（厚0.20和0.10毫米）制定了生產工藝^[16]。

在1944~1945年期間，上依謝特鋼鐵廠中心試驗室和中央黑色冶金科學研究所為制定冷軋變壓器鋼的生產工藝進行了極為重要的研究。雖然美國從1942年起已經生產冷軋變壓器鋼，但是從未發表過有關這種鋼的性能和生產工藝的任何資料。因此，蘇聯研究和試製冷軋變壓器鋼的依據，主要是國內的研究資料^[17, 18, 19]。上依謝特鋼鐵廠在試驗室試驗成功以後，便生產出蘇聯第一批厚0.35毫米的冷軋變壓器鋼，其檢驗結果如下：

試樣來源	試驗室生產的試樣	工業生產的試樣
單位鐵損 $P_{10/50}$, 瓦/公斤	0.75~0.90	0.79
磁感 B_{25} , 高斯	18100~18500	17600

蘇聯最初於1947年在列寧格勒軋鋼廠組織生產厚0.08毫米的冷軋變壓器帶鋼，然後在新西伯利亞鋼鐵廠於1949年開始生產厚0.35和0.50毫米的冷軋變壓器鋼板。以後，“電爐鋼”廠、查波羅什鋼鐵廠和馬格尼托哥爾斯克鋼鐵公司也掌握了冷軋變壓器鋼

的生产, 其中“电炉鋼”厂在拉伸炉内将冷轧变压器鋼用电解氢气氛进行热处理。馬格尼托哥尔斯克鋼鐵公司从1956年开始生产冷轧电机鋼, 在各项质量指标方面, 冷轧电机鋼均超过了热轧电机鋼, 而且磁各向异性不超过10%〔20, 137〕。

掌握新工艺和改进旧工艺以后, 生产的电工鋼品种大量增加, 而且质量也有更进一步的提高。在ГОСТ 802-41 中, 只对12种牌号的热轧电工鋼作了規定; ГОСТ 802-54 則包括了33种牌号热轧电工鋼和10种牌号冷轧电工鋼; 而ГОСТ 802-58 已包括30种牌号热轧电工鋼和19种牌号冷轧电工鋼。这些資料說明了冷轧电工鋼生产的发展占有重要的地位, 这是因为与热轧电工鋼相比, 冷轧电工鋼具有一系列的优点: 占空系数高, 厚度不均較小, 单位鉄損低, 順軋制方向的磁感大, 可以进行成卷生产。

国外冷轧变压器鋼的生产規模也在不断地扩大。美国、英国、西德、法国、日本、瑞典、意大利都生产大量的冷轧变压器鋼。

苏联的工程师和科学家对杂质、变形程度、再結晶动力学和織构形成的影响所作的广泛研究, 对进一步改进热轧、冷轧电工鋼的生产工艺作出了巨大的貢獻。施坦別尔格 (С. С. Штейнберг)、丘法罗夫 (Г. И. Чуфаров)、梅什金、扎依莫夫斯基等人的著述, 起了特別重大的作用。根据薩馬林 (А. М. Самарин) 等人制定的方法〔21〕將鋼水进行真空处理, 能使变压器鋼的磁性有些改善。

进一步改善电工鋼电磁性能和提高质量的最重要任务之一, 是制定立方織构变压器鋼的生产工艺, 这种鋼在順軋制方向和橫軋制方向上的磁性是一样高的。

生产成卷电工帶鋼, 对于訂貨工厂也是很重要的。帶鋼可以用两种方法退火: 一种方法是將鋼卷放在間歇式炉内退火, 然后在使帶鋼展直的直通炉内低溫退火, 另一种方法則是完全在直通炉内退火。第二种方法比較完善, 效率也較高, 但是这种方法的

加热速度很快（每分钟数百度），而且保温时间很短（约数分钟），因而用这种方法来进行电工钢最终热处理便受到了限制。

现在，组织变压器钢只按第一种方法退火，亦即成卷退火。但是，已经有一些资料指出，在某些情况下，组织形成过程相当快，只需15~20分钟^[22]。

电机钢和低组织变压器钢在直通炉内退火时，所需要的先决条件较多。在这种退火之前，必须将钢中的碳降低到0.020~0.018%^[23]。

采取快速加热，必然会给予退火时的组织转变和再结晶带来一系列的特点。必须对快速退火时的再结晶、晶粒长大和组织形成过程进行系统的研究，并且根据研究的结果，制定出直通炉退火的高性能电工钢的生产工艺。

随着无线仪表制造业和自动装置的发展，需要探索一些新电工钢品种，这些新品种在高声频和高射频条件下，在脉冲状态下工作时，当有附加励磁时，以及在气候温度和高温条件下，要具有特殊的和稳定的电磁性能。

涂有耐热绝缘层、单位铁损低、占空系数高的电工钢生产工艺的研究制定^[148, 224, 225]，对于提高钢的质量有着重大的作用。

苏联已建立起先进的冶金工业，在这个基础上便可以广泛发展高性能冷轧电工钢的生产。

如果将下列几个问题有效地加以解决，将会大大促进苏联电工钢生产的进一步发展：

1. 彻底了解冷轧变压器钢的组织形成机理；
2. 为生产单位铁损 $P_{10/50}=0.45\sim0.50$ 瓦/公斤、带耐热绝缘层的、厚0.35毫米冷轧变压器钢制定出生产工艺，并加以运用；
3. 为生产厚0.20~0.35毫米的立方组织冷轧变压器带钢探索生产工艺；

4. 研究出成卷电工鋼在直通炉內最終退火获得成品鋼卷的方法;

5. 創造一些在特殊使用条件下具有特殊性能和性能稳定的电工鋼新品种。

第一章 现代电工鋼的类型及性能

电 工 鋼 类 型

目前所有各种电工鋼，可以按生产方法、結晶織构和最終电磁性能的不同划分成下列四个类型：

- 1) 热轧非織构电工鋼；
- 2) 冷轧低織构电工鋼；
- 3) 冷轧高斯織构电工鋼；
- 4) 冷轧立方織构电工鋼。

上述各种类型电工鋼，各有其独特的生产方法，而生产方法的特点主要表现在軋制和最終热处理方面。

各种电工鋼的电磁性能水平在很大程度上取决于鋼板或帶鋼的含硅量和厚度。按含硅量的不同，电工鋼可分为：低合金鋼（0.8~1.8%Si），中合金鋼（1.8~2.8%Si），較高合金鋼（2.8~3.8%Si）和高合金鋼（3.8~5.0%Si）。

目前苏联及其他国家采用的电工鋼厚度，在大多数情况下为1.0~0.05毫米。为了滿足特殊需要，还生产厚度达3.0~5.0毫米的低硅鋼板，和厚度为0.02~0.025毫米极薄較高硅鋼。

将生产不同含硅量和不同最終厚度电工鋼的各种方法配合起来，就可以生产出很多种牌号的电工鋼，它們的个别磁特性彼此有着很大的差別。因此，在比較电工鋼板和評价其质量时，至少必須考虑四个因素：軋制方法（热轧或冷轧）、含硅量、織构特性及鋼板或帶鋼的厚度。

按热处理方法及表面质量的不同，电工鋼可分为退火的和不退火的，酸洗的和不酸洗的，带有各种表面絕緣层的（有机絕緣层、无机絕緣层和掺陶瓷附加料的无机絕緣层）和不帶絕緣层的。

电工鋼可以制成不同厚度的鋼板或成卷帶鋼。

苏联目前生产 30 种牌号热轧电工鋼板和 19 种牌号冷轧电工鋼板，它們具有不同的尺寸和不同的綜合磁性（苏联国家标准 ГОСТ802-58）。此外，按 ГОСТ 9925-61 的要求，生产約 20 种牌号的冷轧电工帶鋼，其厚度由 0.20 到 0.05 毫米，有的甚至更薄些。

在苏联有关电工鋼板的 ГОСТ802-58 中，牌号名称規定用字母 Э（电工鋼）及两位数字表示。第一位数字代表平均含硅量的百分数，或称鋼的合金度（1—低合金，2—中合金，3—較高合金，4—高合金）。第二位数字（1、2、3、4、5、6、7、8）代表鋼的保証电磁性能：

1、2、3—鋼在 50 赫的頻率下反复磁化时的单位鉄損和强磁场內的磁感（1—标准单位鉄損，2—較低单位鉄損，3—低单位鉄損）；

4—鋼在 400 赫的頻率下反复磁化时的单位鉄損和中磁场內的磁感；

5、6—在 0.002~0.008 安匝/厘米的弱磁场內的磁导率（5—标准磁导率，6—較高磁导率）；

7、8—在 0.03~10 安匝/厘米^①的中磁场內的磁导率（7—标准磁导率，8—較高磁导率）。

代号中的第三位数字——0 代表冷轧纖构电工鋼；代号中的第三及第四位数字——00 表示冷轧低纖构电工鋼。数字后面的字母 A，代表特低单位鉄損，字母 II 代表較高軋制精度和較高表面精整度。

苏联和其他国家采用的主要牌号电工鋼的代号列于表 1~3。

在資本主义国家中，广泛流行着电工鋼的各种商标名称，名称中包括：代表鋼的类型的字母或单詞，和表示厚度为 0.50 或 0.35 毫米电工鋼板在 15000 高斯的磁感和 60 赫的电流頻率（美国），或 10000、15000 和 13000 高斯的磁感和 50 赫的电流頻率（英

① 原书在此处和下段中印为安/厘米。——譯校者

ГОСТ 802-58 中主要牌号电工鋼代号和保証磁性

表 1

合 金 鋼		鋼 的 牌 号	电 工 鋼 类 型	保 証 磁 性
含 Si 量 %	质量评价			
0.8~1.8	低 合 金	Э11, Э12, Э13	热 軋	单位鉄損: 标准的, 較低 的和低的
		Э1100, Э1200, Э1300	冷軋, 低纖构	同 上
1.8~2.8	中 合 金	Э21, Э22	热 軋	单位鉄損: 标准的, 較低 的
2.8~3.8	較高合金	Э31, Э32	热 軋	单位鉄損: 标准的, 較低 的
		Э3100, Э3200	冷軋, 低纖构	同 上
		Э310, Э320, Э330, Э330 A	冷軋, 纖构	单位鉄損: 标准的, 較低 的, 低的和特低的
		Э340	同 上	在 400 赫的頻率下的单位 鉄損和中磁场內的感应强度
3.8~5.0	高 合 金	Э370, Э380	同 上	中磁场內的磁导率: 标准 的和較高的
		Э41, Э42, Э43, Э43 A	热 軋	单位鉄損: 标准的, 較低 的, 低的和特低的
		Э44	热 軋	400 赫的頻率下的单 位鉄 損和中磁场內的感应强度
		Э45, Э46	热 軋	弱磁场內的磁导率: 标准 的, 較高的
		Э47, Э48	热 軋	中磁场內的磁导率: 标准 的, 較高的

国、西德和其他国家)下的单位鉄損值(瓦/公斤或瓦/磅)^[24~35]。

此外, 电工鋼表面絕緣层也有各种商标名称: 卡尔利特 (Carlit) (美国軋鋼公司)、考灵 (Kaolin)、因苏灵 (Insuling) (英国理查·托馬斯-鮑德溫公司, 約瑟夫·森凱父子公司)、黑苏雷特 (ハイシユレート) (日本) 等等。

最后必須指出, 所謂微薄电工鋼 (厚度小于 0.1 毫米), 則属于特殊的一組, 它通常按照注明必要的电磁特性的訂单制造。

苏联、美国和英国主要牌号电工钢的代号

表 2

含 硅 量 %	苏 联 ГОСТ 802-58	美 国			英 国	
		美国钢 铁学会	合众国钢铁公司	美 国 轧 钢 公 司	威尔士钢铁公司	理查·托馬斯-鮑德 温 钢 铁 公 司
2.8~3.5	Э 330 А	M-6	USS 变压器 66	M-6W; M-6X①	Unisil 46	Alphasil 33
	—	M-7	USS 变压器 73	M-7W; M-7X	Unisil 51	Alphasil 37
	Э 330	M-8	USS 变压器 80	—	Unisil 62	Alphasil 40
	Э 320	M-9	—	—	—	Alphasil 44
	Э 310	M-10	—	—	—	—
3.8~5.0	Э 43 А	M-14	USS 变压器 52	Armco Tran-Cor M-14	Transil 74	Ferrosil HR80
	Э 43	M-15	USS 变压器 58	Armco Tran-Cor M-15	Transil 80	Ferrosil HR86
	Э 42	M-17	USS 变压器 65	Armco Tran-Cor M-17	Transil 86	Ferrosil HR92
	Э 41	M-19	USS 变压器 72	Armco Tran-Cor Di-Max M-19	Transil 92	Ferrosil HR100
	—	—	—	—	Transil 100	Ferrosil HR107
2.8~3.5	Э 3200	—	—	—	—	Ferrosil CR146
	Э 3100	M-22	USS 发电机	Armco Tran-Cor Di-Max M-22	—	Ferrosil CR158
	—	—	—	—	—	Ferrosil CR176