

• 高频热处理丛书

第 12 册

感应透热在工业中的应用

〔苏联〕B. H. 包格达诺夫 著

小 冰 译

上海科学技术出版社

原 序

在社会主义经济中，工业的发展和工业生产水平的提高与国民经济各部门中工艺不断改进和过程自动化有着密切关系。

在机器制造业和冶金工业中，许多工艺过程都与金属加热有关系；例如零件的热处理，锻造和模压，金属的铸造，轧制等等。

到目前为止，进行金属加工的技术水平比之加工前的加热在大多数情况下要高些。这种差别在作为机器制造业和冶金工业重要组成部分的锻造和轧制生产中尤为明显。

以 B. II. 伏洛格金教授命名的高频电流科学研究所和其他一些机关在利用高频电流改进金属透热过程方面进行了一系列的工作。结果创造了一系列的感应装置和苏联第一个巨大的锻工车间，在该车间中高频电流感应加热是唯一的金属加热方法。

作 者

目 录

原序

引言	1
第一章 金属的感应加热	3
1. 感应加热的原理	3
2. 电流频率的选择	5
3. 加热时间的决定	7
4. 加热非实心圆柱形毛坯的电流频率和加热时间	9
5. 感应加热装置的原理图	10
第二章 锻造生产用的感应加热器	12
6. 毛坯的分类	12
7. 匀整毛坯的加热器	14
8. 棒形毛坯的加热器	19
9. 匀整毛坯端部的加热器	24
10. 可变截面毛坯的加热	28
11. 感应加热装置的计算	28
12. 用感应法加热金属的机器制造厂锻工车间	36
第三章 轧制生产中的感应加热	39
13. 滚珠横向轧制机组	40
14. 连续进料感应加热的零件横轧机组	42
15. 应用两种频率电流的感应加热器	45
第四章 钢板弹簧生产中的感应加热	47
16. 应用感应加热的弯曲淬火机	48
17. 卷孔前加热钢板弹簧主片端部的装置	51
第五章 薄金属带的感应加热	53

18. 帶材在橫向磁場中的加熱	53
19. 帶材的感應加熱連續退火裝置	55
20. 軋制前用感應法加熱鋼帶的軋機	58
第六章 金屬制件的感應加熱焊接法	59
21. 感應加熱焊接法的實質	59
22. 鋼管的感應加熱對頭焊接裝置	62
23. 應用感應加熱的焊管機	65
第七章 感應加熱的各種運用	69
24. 感應加熱熱軋齒輪	69
25. 制件冷拉後的退火機	72
26. 螺栓頭感應加熱自動退火機	74
27. 鋸齒錘薄機	76
28. 長棒材和管材的退火和淬火裝置	78
29. 感應加熱的鋼絲鉛浴淬火法	79
結語	82

引 言

冶金工业和机器制造业各个生产部门中所用的机器和机构,不断地在改进。

例如,在锻造生产中大量制造锻件时,自由锻已被封闭式模锻所代替;而封闭式模锻又被平锻机和机械锻压机所取代,这些机械能获得高精度锻件并开始向锻件制造工艺过程自动化过渡。

在轧制生产中,创制了一系列新颖的和高生产率的轧机。但金属加工前的加热方法却很少改变。直到现在,在重油炉和煤气炉中加热金属仍然是工业中的主要加热方法。

在火焰炉中加热金属有许多缺点,主要是:所费加热时间极多且加热不稳定;加热时生成大量的氧化皮;加热装置庞大;劳动条件繁重。这些缺点阻碍了需要加热金属的生产工艺进一步发展和改进。

近几年来已开始采用电流加热金属,这是改进加热装置方面的一个极重要进步。

应用接触电热法,特别是应用金属感应加热法,可以全面改进许多生产工艺。感应加热和接触加热的主要优点是热量直接在被加热金属中产生,与电阻炉和火焰炉中加热金属时由周围介质传导热量不同。

长期使用感应加热装置的结果证明了这种装置工作可靠,以及可以合理地在冶金工业和机器制造业的各个生产部门中广泛应用。改用感应法之后,金属的加热时间照例缩短为 $1/30 \sim 1/40$ 。在电能的单位消耗量方面,感应加热的成本

可与火焰炉和电阻炉相竞争。

应用感应加热使工艺过程的机械化和自动化的可能大为增加。加热装置多半是自动的和半自动的。金属装入加热器、通过感应器和从加热器中取出,都由各种机械来完成,不需人工操作。

金属的加热规范也是自动保持的。

除了金属加热过程的自动化以外,应用高频电流还有可能过渡到制件加工过程的全盘自动化,把金属的加热和热加工连成一个工艺循环,在没有人直接操作下进行。

目前已经建立了由机械锻压机和感应加热器组成的机组,装有感应加热器和连续自动循环工作的平锻机,毛坯感应加热后自动进入顶锻的自动顶锻机,锯齿锤薄机组,轴承滚珠横轧机组以及其他一系列的机组。

在研究过程中的有供轧制金属、焊接制件和完成其他工艺过程用的各种有趣的感应加热机组。

随着我国电力生产的发展,将愈来愈广泛地应用感应加热来改进各种工艺过程,这将大大提高工业生产水平。

第一章 金属的感应加热

1. 感应加热的原理

电流通过导体，在导体周围就产生了磁场。倘通过导体的是交流电（即大小和方向不断改变的电流），磁场也随之同样地不断变化。

如果把一块金属放入交变磁场中，则在金属内便产生一个电动势，在电动势的作用下金属内有交流电流流动。金属内感应电流频率的变化，与原来从电源通入导体内的电流频率的变化一样。电流通过金属块，使金属块发热^①。

上述在交变磁场中加热金属的方法称为感应加热法，原来通入交流电的导体称为施感导体。

施感导体可以做成各种形状，最常见的是绕成圆柱形螺线管的多圈式感应器。

在锻工车间的感应加热装置中以及在其他生产部门中，金属穿透加热多半利用单层圆柱形螺线管感应器，待加热的毛坯就放在其内（图1）。

在施感导体内和被加热的金属内交流电沿截面的分布是不均匀的，在导体的表面电流密度最大，到导体的心部电流密度按指数定律逐渐下减。为了简化金属感应加热计算，假定交流电只通过某一定的表面层，在导体的心部一般不通过电流。通过交流电的假定表面层厚度称为电流透入深度，可按

① 詳見 H II 格魯哈諾夫著“高頻加热的物理基础”，本丛书第二册。

下式求得:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} \text{ 米,}$$

式中 $\omega = 2\pi f$;

f ——电流频率(赫芝);

μ ——磁导率(亨利/米);

γ ——材料的电导率(1/欧姆·米)。

所有的材料和合金按磁性可分为二类:

(1) 铁磁金属和铁磁合金, 它们的磁导率比真空磁导率高得多;

(2) 抗磁和顺磁金属以及抗磁和顺磁合金, 它们的磁导率接近真空磁导率。属于第一类的有碳钢、镍等等; 属于第二类的有耐热钢、不锈钢、黄铜、铝、铜锌镍合金等等。

在加热抗磁和顺磁金属以及抗磁和顺磁合金的过程中, 只有电导率发生变化, 磁导率实际上保持不变。因此, 在加热抗磁和顺磁金属以及抗磁和顺磁合金时, 由于材料的电导率减小而导致的电流透入深度只增加很少。

在加热铁磁金属和铁磁合金的过程中, 除了电导率减小外, 磁导率也减小。

当被加热的金属达到一定温度时, 磁导率的值下降到与真空磁导率一样, 这就使电流透入深度急剧增大。这个温度称为磁性转变温度或临界点。因此可以区别为两种电流透入深度, 即加热低于磁性转变温度的钢中的电流透入深度和加热高于磁性转变温度的钢中的电流透入深度(“热”电流透入深度)。

在感应加热装置的计算中, 必须引用下面两个电流透入深度值: 加热毛坯时温度达到 $40 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 的感应器钢体内的电

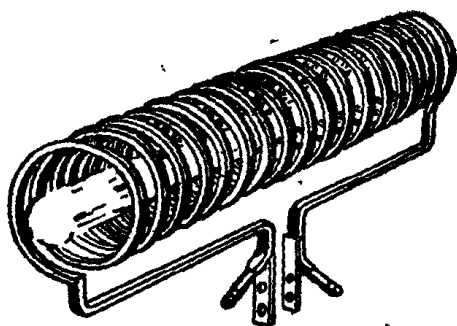


图1 待加热金属在圆柱形感应器中的位置

流透入深度, 以及加热至 $1000 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 的钢体内的电流透入深度。

这两个值相应地等于:

$$\Delta_1 = \frac{7}{\sqrt{f}} \text{ 厘米};$$

$$\Delta_2 = \frac{60}{\sqrt{f}} \text{ 厘米}。$$

2. 电流频率的选择

要使感应加热既有效而在经济上又合算, 必须尽可能提高加热装置的总效率。在金属感应透热时, 效率的高低主要取决于电流频率的选择是否恰当。

感应加热装置的总效率决定于电效率和热效率。感应加热装置的电效率随电流频率的增高而增高, 并逐渐趋近于一极限值。实际上可以认为, 对于任何尺寸的金属截面, 如果加热制件的直径与给定频率的电流透入热金属的深度之比等于10, 则在此电流频率下电效率达最大。

由于感应电流只在被加热的表面层内流动，所以热量也只在这一层内产生。为了使金属的整个截面获得相同的温度（这是大部分工艺操作所要求的），在发热层下面的部分就得靠热传导从表面层取得热量。这样的传热需要很长时间，因此将使热量在周围介质中损失增多，即降低热效率。

在明显的趋肤效应下，金属中靠热传导作用加热的层愈薄，亦即电流透入愈深或电流频率愈低，则感应装置的热效率愈高。

理论计算和实验都表明，对于任何尺寸的加热制件，当制件的直径和电流透入热金属的深度之比等于 3.5 左右时，加热装置的总效率达最大值（图 2）。

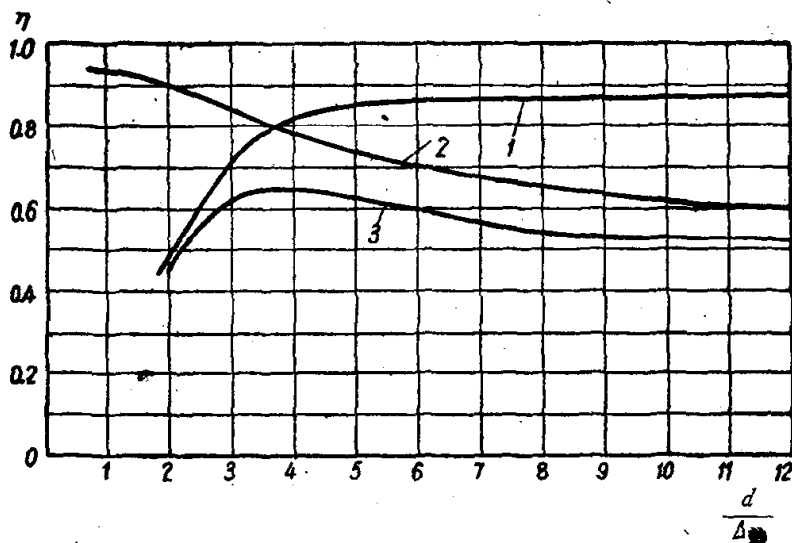


图 2 感应加热装置的电效率、热效率和总效率与毛坯直径对电流透入热钢深度之比的关系

1—电效率；2—热效率；3—总效率

实际上，如果加热制件的直径与电流透入深度之比在 2.5~6 的范围内，则所选的频率可认为满意。应用这一关系，

很容易计算出各种标准电流频率在感应加热不同直径制件时的适用范围。为了提高钢的感应加热速度并减少能量的消耗定额,可以采用两种电流频率。在初期,即在加热到磁性转变温度前,可以使用较低频率的电流(直径超过 50 毫米的毛坯,使用频率为 50 赫芝的电流),以后则采用按上述标准选择的频率。

但用两个电流频率进行感应加热的方法,只有在经济上合算并不致于使设备复杂化的情况下才采用。

表 1 适合于不同直径圆柱形钢坯感应加热用的标准电流频率的范围

电 流 频 率	50	500	1000	2500	8000	射 频
毛坯的直径 (毫米)	150和 150以上	70~160	50~120	30~80	15~40	20和 20以下

3. 加热时间的决定

尽可能地缩短加热时间,有助于感应加热装置达到最高生产能力。在某一定电流频率下缩短加热时间或提高加热速度,主要靠缩短金属内层的加热时间来达到,其加热方式为表面层的热传导,这时就引起制件表面和心部之间的温度差增大。

这种温度差不应超过一定的值。在锻造和轧制生产中,一般以加热结束时,即表面层达到所需温度时,金属心部温度低于表面层 100°C 作为提高加热速度的界限。这一条件也限制了金属感应加热的最短时间。根据毛坯的截面尺寸和加热时应用的电流频率,加热的最短时间也不同。

在给定的温度差下毛坯透热的最短容许时间可用计算方法求出。不过在实践中还是应用曲线较为方便，这些曲线系根据计算结果作出的，并经高频电流科学研究所的大量试验核验过。

在作这些试验时，用若干种标准频率的电流加热圆柱形毛坯，同时用热电偶测量金属表面和心部的温度。

用一种频率的电流以一定的单位功率输入感应器，把毛坯加热，使其达到上述的温度差。确定与此规范相对应的一个加热时间值，记入图表内。仍以同一频率的电流加热不同直径的毛坯，并在图表上作出新的点。把这些点连成一条曲线，即可据以选择用该种电流频率加热各种不同直径的毛坯时的加热时间。

在试验过程中，曾用多迴线示波器记录毛坯表面和心部的温度升高情形(图3)。从温度升高的示波图上可以看出感应加热时沿毛坯截面的温度分布状况。

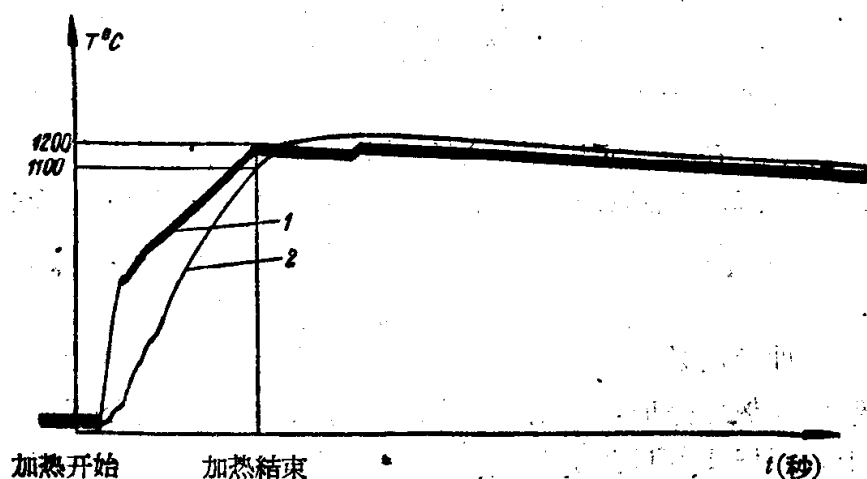


图3 毛坯表面温度升高(曲线1)和中心温度升高(曲线2)的示波图

加热时间也可比图 4 中所示的延长些，不过这会使加热装置的热效率和总效率稍稍降低。

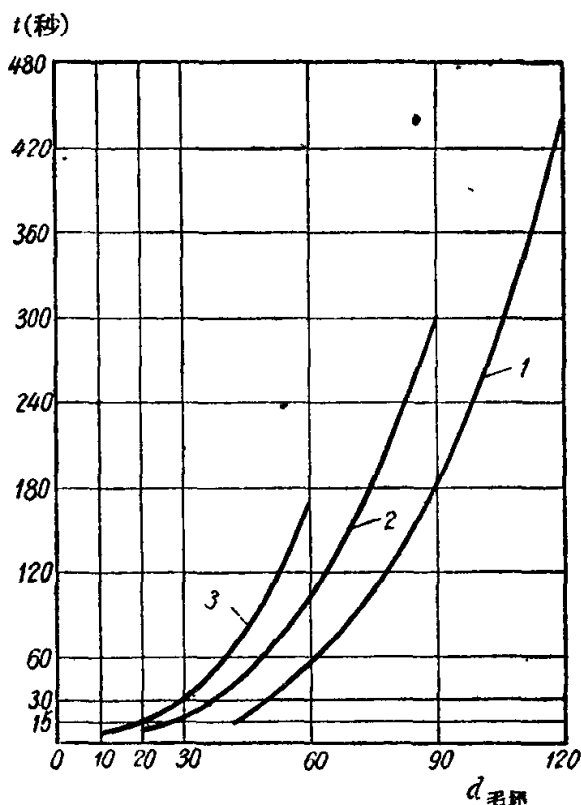


图 4 用感应加热法对钢坯作透热时的最短容许时间与毛坯直径之间的关系（加热结束时面层和心部的温度差为 100°C ）

1—电流频率为 1000 赫芝时；2—电流频率为 2500 赫芝时；
3—电流频率为 8000 赫芝时

4 加热非实心圆柱形毛坯的电流频率和加热时间

在选择非实心圆柱体毛坯的电流频率和加热时间时，也应该依据上述适用于实心圆柱体毛坯的关系，即在毛坯截面上保持容许温度差的条件下，达到尽可能高的效率并使加热

装置有尽可能大的生产能力。

在选择矩形截面毛坯的电流频率和加热时间时，同样适用上述有关圆柱形毛坯的选择方法(由表 1 选择频率，由图 4 决定加热时间)，但这时必须把截面的短边当作圆柱形毛坯的直径。

在选择管子感应加热的电流频率时，必须遵守以下两个条件：

$$f \geq \frac{30000}{d_{\text{管子}}^2}, \quad 0.35 \Delta_{\text{热}} < a < 2.0 \Delta_{\text{热}},$$

式中 $d_{\text{管子}}$ ——管子的外径(厘米)；

a ——管子的壁厚(厘米)；

$\Delta_{\text{热}}$ ——电流透入热金属的深度(厘米)。

决定管子的加热时间时，可以利用上述有关实心圆柱形毛坯的一些图表(图 4)，但这时把管壁的厚度当作实心圆柱形毛坯的半径。

对于可变截面的毛坯，选择电流频率和加热时间是极困难的问题。

由于这种毛坯的形状极其多种多样，所以对如何选择电流频率和加热时间不可能作出概括性的建议。

在大多数情况下应该根据截面的最小尺寸选择可变截面毛坯加热用的电流频率，而在此频率下的加热时间，则根据截面的最大尺寸选取。

电流频率和毛坯加热时间决定加热装置的主要参数，因此选择时必须重视。

5. 感应加热装置的原理图

感应加热装置高频电路的最简单形状，如图 5 所示。

在此电路包括下列一些元件：

1 高频或增高频率的电源 这种发电机的型式决定于电流频率和在规定生产率下加热一定尺寸毛坯所需的功率。

感应加热装置的供电电源可以是电子管振荡器（如果加热直径小于20毫米的毛坯）和机械式发电机或离子变频器（如果必须加热直径大于20毫米的毛坯）。

在需要加热金属的锻造、轧制和其他一些车间内，使用电子管振荡器是困难的，因此应尽可能不使用它。

2. 用来直接加热毛坯的感应器 其形状和尺寸决定于毛坯的形状和尺寸、毛坯的容许加热时间和需要的加热装置生产能力。

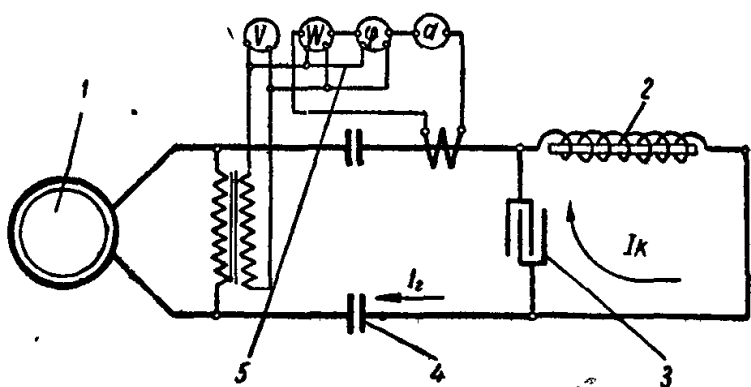


图5 感应加热装置的电路图

1—发电机；2—感应器连同置于其中的毛坯；3—电容器组；
4—接触器；5—全套测量仪表

3. 电容器 所以要在电路中接入电容器，是因为感应器和加热金属这一系统的功率因数($\cos \gamma$)低。功率因数数值取决于电流频率、感应器和毛坯的尺寸比例以及加热金属的性能；在某些情况下，功率因数数值可能只有0.05。

为了使发电机发出额定的有效功率，感应加热装置的功

率因数必须提高到 1 或接近 1, 这就需要电容器。

4. 接触器 用来接通和切断热源。

5. 带变流器和变压器的全套测量仪表 这套仪表一般包括: 伏特计、安培计、瓦特计、高频相位计和测量高频发电机激励电流的直流安培计。

在高频感应加热装置中, 电路的各个元件有大小不同的电流载荷; 发电机的电流 (I_g) 通过电容器组之前电路中的发电机、接触器以及导线; 而流过电容器组之后电路中的元件 (感应器、母线等) 和流过电容器组的电流要比流过发电机的电流大, 其倍数即整个振荡电路的功率因素大于感应器-加热金属系统的功率因数的倍数。这个电流叫做迴路电流 (I_K)。

第二章 鍛造生产用的感应加热器

6. 毛坯的分类

在鍛造生产中经受加热的毛坯可按形状和加热性质分为三大类:

(1) 匀整毛坯, 即长度一定、要在其全长上同时加热的毛坯;

(2) 棒形毛坯, 即长度不定、只在一定长度上同时加热的毛坯;

(3) 只在一端一定长度部分进行加热的匀整毛坯。

此外, 毛坯可以有各种形状截面: 圆的、方的、矩形的、环形的等等。

毛坯也可能具有全长经过周期轧制的可变截面。

为了保证各种各样毛坯的加热，必须应用不同形状的感应器。

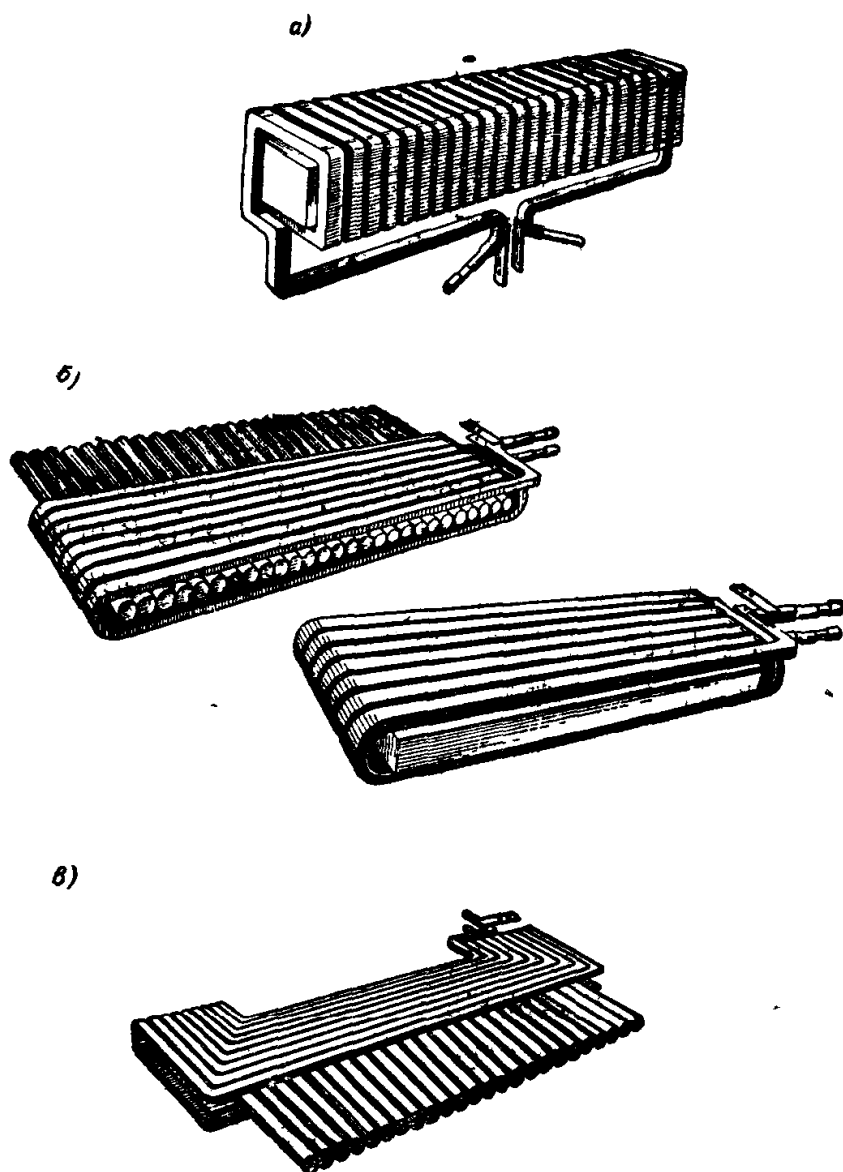


图 6 待加热金属在感应器内的装放位置
 a—方形感应器；b—椭圆形感应器；c—缝槽形感应器