

技 術 資 料

誘導加熱の金屬への應用 (II)

石 田 制 一*

ON THE APPLICATION OF THE INDUCTION HEATING TO THE METAL (II)

Seichi Ishida, Dr. Eng.

Synopsis:

Refer to the Report (I) "Tetsu-to-Hagané July (1954) p. ~710

III. 高周波誘導加熱の應用

学理的には高周波誘導加熱法が加熱の総ての方面に使用出来ることは認められており乍ら溶解に利用され始めてから久しく他の分野は研究の域を出なかつた(殊に我国に於ては)のであるが、本加熱法の長所が非常に多い事が分ると同時に加熱法も著しい技術上の進歩をして現在では鋼、その他の金属の加工等には極めて重要な位置を占めて来つゝある。それは一言にして云へば最低の費用で最高の生産が期待出来るからであろうと思う。さうして殆んどあらゆる技術部門、即ち鋼、特殊鋼製造用誘導溶解炉、鋼材の焼入及焼鈍、貴金属、稀金属、半導体溶解炉、銅、亜鉛、アルミその他非鉄金属及合金溶解用高低周波炉、自転車フレームその他機器等のろう接、シャフト、ギヤ等の鍛造、圧延、成型等の誘導加熱装置、ソケット接続、鋳取付け、管溶接装置及焼戻、焼鈍、焼ばめ又粉末冶金に於ける焼結等多方面に本法が応用されつゝある次第である。今之等の現状等を次に述べよう：

(イ) 表面焼入 本法を鋼の表面焼入に実用する事は我国に於いては最近研究も応用も非常に進歩しその実績を上げている。従つてその箇々の問題に就いては小生の著書³⁾その他の文献を見て貰うことにしてこゝでは概括的な事を述べることにしよう。

先づ高周波表面焼入法の特徴とする處を述べると、

(1) 焼入費が極めて安く耐摩耗性が大きいから機械の保全補修に時間と経費の節約が出来ること。

(2) 短時間加熱であるから脱炭なく硬化表面が酸化極

めて少ない、従つて機械荒加工→最後仕上→焼入→実用で硬化後の研磨作業が省ける。

(3) ズブ焼でない為歪が少なく従つて歪直しの必要がない。

(4) 直接加熱であるから熱効率がよい。

(5) 何千何百と流れ作業化出来而も均一な焼入可能。

(6) 滲炭防止剤、その他の副資材不要で任意の必要とする處のみ焼入可能。

(7) 表面は超硬度、内層は靱性を有する為切欠感度は小さいので動的強度には甚だ強く理想的である。

(8) 材質は 0.45 炭素鋼で充分であり特殊鋼の使用を補う事大。

以上の通りで機械金属工業に寄与する處大きい。ここで更に従来の電気炉による焼入と本焼入法による場合の経済上の利益関係を一つの例を以つて示そう⁴⁾。即ち SAE 1340 steel のシャフトでその長さ $8\frac{1}{2}$ 径 0.75' これに対しこの両法による費用として第 1 表 (イ)(ロ) に掲げた通りが必要とすることが示された。

依つて高周波焼入法による 1ヶ当りの節約は (2) — (1) = \$0.027 即ち 1 日の節約は $0.27 \times 1500 = \$40.50$ である。これに依つても 1 日 40 弗の利益は 1 年にして最初の投資 (initial cost) を償却して余りあるものである事を了解出来これによつても我国焼入工業の相当部分が之に置き換えて然るべきで又非常な勢で普及して来た。

然し乍ら本焼入をこの様に成果を發揮せしめるにはいろいろ乗り越えねばならぬ技術的問題がある、殊に実際に

* 東京都立工業奨励館材料部長、工博

4) Kinn: Iron Age, 1948. June 10, 72

3) 高周波表面焼入の理論と実験

第 1 表 (イ)
誘導加熱による原價計算

8 時間/日	=288,00 sec
5 秒×1500 pieces (取扱ひ時間)	=7,500 sec
故に作業時間として	=21,300 sec
作業者の能率を80%として實働時間	=17,000 sec
従つて一本當りの時間	17,000÷1,500=11.3 sec
従つて Scanning Speed	8.5吋/11.3=0.755 ips
故に圖表より (略) 必要装置の容量は	=18 kw
即ち標準規格として	=20kw
20kw の generator を用い 0.85 ips の scanning speed とし 10 sec の作業時間, 5 sec の handling time とすると Generator duty cycle	=67%
Cost of 20kw generator operation	= \$1.09/hr
Cost of one operator	= \$1.75/hr
Cost of work handling equipment	= \$0.17/hr
(\$5,000—30,000hr)	
従つて全操業費として	= \$3.01/hr
1 箇當りの費用は	3.01×8hr/1500 = \$0.016...(1)
75kw の爐を 1 時間使用する費用 1kWh	

行うにしては一番重要な点は被焼入物に対し目的を充分に達する様な加熱方法を行い、而して加熱後適当な時間

第 1 表 (ロ)
電氣爐焼入法による原價計算

	\$0.075 per hr = \$1.12
37kw の爐を 1 時間使用する費用	hr = \$0.55
爐に出し入れするに要する勞働賃金	(10 sec per piece 及び \$1.75/hr) = \$2.13
スケール取りの費用	(1/2 min per piece and \$1.75/hr) = \$6.50
Burr をスプラインから取除く費用	(0.50/100 = 2.25
依つて全操業費は 440 pieces に對して	= \$19.05
従つて 1 箇當り	= \$0.043
(2)

後に均一に冷却剤がかかる様な方法を選ぶべきで前者に對してはワークコイルの設計が問題であり後者に對しては焼入機構的な点を完備すべきである。殊にワークコイルについては被焼入物が形状千差万別であるので夫々の形のものが作られねばならぬ。之等については特許、実用新案が多くある。第 2 表は現在迄の我國のものの一覽表である。

第 2 表
我が國の高周波表面焼入の特許

特許番號	發明名稱	登録年月日	國籍	登録權者
1. 115241	誘導電氣爐		日	株式會社芝浦製作所
2. 118579	表面焼入装置		"	"
3. 130455	誘導加熱装置		"	"
4. 130889	"		"	"
5. 131002	"		"	"
6. 137686	誘導加熱装置方法		"	東京芝浦電氣株式會社
7. 137760	表面焼入装置		"	"
8. 137761	"		"	"
9. 138450	高周波發電機負荷接続變更方法		"	"
10. 134550	誘導加熱方法		"	"
11. 151422	複數焼入装置, 制御装置		"	"
12. 昭26—4353	軌條熱處理方法	26—8—8	"	"
13. " —7202	誘導加熱装置	26—11—20	"	"
14. " —7652	高周波に依る針狀體の焼入装置	26—12—24	"	"
15. " —7653	高周波誘導加熱装置	26—12—14	"	"
16. 151552	電力用高周波發生装置	17—7—14	"	應用科學研究所
17. 168969	誘導電氣表面焼入用集束装置	19—12—20	"	"
18. 169636	ピストンピン又は類似物の表面焼入装置	20—1—30	"	"
19. 172976	電氣による部分焼入法	21—6—22	"	"
20. 172973	先端部電氣焼入法	21—6—22	"	"
21. 174941	内周面焼入方法	22—9—8	"	"
22. 175444	高周波電流による表面焼入方法	23—1—14	"	"
23. 175452	誘導電氣表面焼入装置	23—1—14	"	"
補 172975	部分的電氣焼入法	21—6—22	"	"
24. 175453	誘導電氣表面焼入装置	23—1—14	"	"

特許番號	發明名稱	登録年月日	國籍	登録權者
25. 175451	誘導電氣表面焼入用中子誘導體	23—1—14	日	應用科學研究所
26. 178183	高周波移動焼入装置	24—3—18	〃	〃
27. 179590	焼入装置	24—7—15	〃	〃
28. 177467	衝撃性高周波發生装置	24—1—19	〃	〃
29. 177549	高周波による筒體內面焼入装置	24—1—31	〃	〃
30. 昭26—259	誘導焼入装置	26—1—30	〃	〃
31. 〃—260	高周波表面焼入れ方法	26—1—30	〃	〃
32. 昭27—2556	高周波表面焼入装置	27—7—9	〃	〃
33. 179688	高周波焼入用誘導體	24—1—10	〃	電波企業株式會社
34. 179689	高周波焼入による急冷装置	24—1—10	〃	〃
35. 179690	高周波加熱装置	24—1—10	〃	〃
36. 180132	表面加熱焼入装置	24—3—4	〃	山岡内燃機株式會社
37. 180258	誘導加熱装置	24—5—13	〃	〃
38. 昭25—3108	表面加熱焼入装置	25—9—30	〃	〃
39. 昭26—1107	高周波誘導焼入装置	26—3—5	〃	高周波熱鍊株式會社
40. 〃—4609	高周波誘導加熱方式	26—8—20	〃	〃
41. 昭27—2493	高周波誘導焼入装置	27—7—4	〃	〃
42. 〃—2105	高周波表面焼入装置	27—6—10	〃	〃
43. 〃—2557	高周波電流を利用せる筒體內面焼入装置	27—7—9	〃	〃
44. 〃—4087	高周波誘導均一加熱方式	27—10—8	〃	〃
45. 昭26—3252	高周波誘導加熱用線輪	26—6—22	〃	三菱電氣株式會社
46. 〃—3196	高周波加熱装置	26—6—15	〃	〃
47. 昭27—2654	高周波表面焼入装置	27—7—18	〃	〃
48. 〃—3205	針の高周波焼入装置	27—8—22	〃	〃
49. 179688	金切鋸の高周波焼入装置	27—5—9	〃	梶山日露樹
50. 昭27—2753	鋸の高周波焼入装置	27—7—25	〃	〃
51. 〃—2754	金切鋸の焼入れ送り装置	27—7—25	〃	〃
52. 〃—3204	高周波焼入誘導子	27—8—22	〃	〃
53. 〃—4307	高周波焼入れ金切鋸の縦形焼入装置	27—10—22	〃	〃
54. 〃—3858	高周波焼入線輪装置	27—9—26	〃	鈴木徳彌
55. 昭25—412	高周波加熱處理装置	25—2—22	〃	藤田眞
56. 〃—2814	高周波直接通電に依る表面焼入装置	25—9—22	〃	大野貫二
57. 昭26—5006	高周波焼入装置に関する急冷装置	26—9—4	〃	中日本重工業株式會社
58. 〃—7104	齒車の高周波焼入支持装置	26—11—13	〃	日本國有鐵道
59. 〃—7503	高周波表面焼入装置に於ける小孔内面焼入用コイル	26—12—4	〃	野上辰之助
60. 180267	物品加熱處理方法		米	ザ・オハイオクランク シャフトコンパニー
61. 184720	誘導加熱装置に関する改良		〃	ホワード・エドワード・ソーマス
62. 187526	高周波誘導加熱装置		〃	〃
63. 188235	物品表面焼入装置		〃	ザ・オハイオクランク シャフトコンパニー
64. 145373	中空被加工物熱處理法		〃	ホワード・エドワード・ソーマス
65. 145810	熱處理装置改良		〃	〃
66. 146056	數個・抵抗熔接器……方法		獨	ベルンハルト・ベルグハウス

我が國高周波表面焼入の實用新案

登録番號	名稱	登録年月日	國籍	登録權者
1. 820001	高周波誘導電氣爐の給電装置	17—7—17	日	應用科學研究所
2. 824260	高周波發生用放電間隙装置	17—7—16	〃	〃
3. 310781	電力用高周波發生装置	16—12—19	〃	〃
4. 350609	高周波電流による實用鋼の表面焼入装置	19—10—24	〃	〃
5. 351576	誘導電氣表面焼入用加熱装置	19—12—12	〃	〃

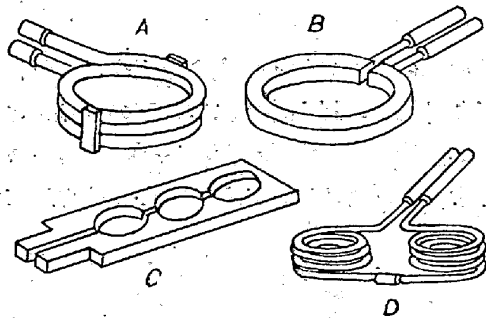
登録番號	名 稱	登録年月日	國籍	登 録 權 者
6. 351575	誘導電氣表面焼入用集束装置	19—12—12	日	應用科學研究所
7. 351577	金切鋸焼入用加熱装置	19—12—12	〃	〃
8. 351574	高周波電源に依る表面焼入装置	19—12—12	〃	〃
9. 352717	放電間隙を利用する高周波焼入装置	20—3—3	〃	〃
10. 352718	〃	20—3—3	〃	〃
11. 352716	誘導電氣による表面焼入用中子誘導體	20—3—3	〃	〃
12. 365044	高周波移動焼入装置	24—7—26	〃	〃
13. 昭25—7184	誘導表面焼入装置	25—10—7	〃	〃
14. 昭26—7512	高周波誘導加熱装置	26—7—21	〃	〃
15. 〃 -12322	誘導表面焼入装置	26—11—2	〃	〃
16. 昭13—14483	圓筒内壁加熱焼入装置	13	〃	東京芝浦電氣株式會社
17. 昭14—4496	表面焼入装置	14	〃	〃
18. 〃 —4677	表面加熱焼入装置	〃	〃	〃
19. 〃 -15029	誘導電氣爐	〃	〃	〃
20. 〃 -18717	連續表面焼入装置	〃	〃	〃
21. 〃 -18985	焼入装置	〃	〃	〃
22. 昭15—477	表面焼入装置	15	〃	〃
23. 〃 —1343	焼入装置に對する制御装置	〃	〃	〃
24. 〃 —1977	焼入装置に對する電氣的制御装置	〃	〃	〃
25. 昭16—18919	電熱焼入装置力率調整装置	16	〃	〃
26. 昭25—10677	高周波誘導加熱装置	25—12—15	〃	〃
27. 昭26—2233	軌條高周波焼入装置	26—3—7	〃	〃
28. 〃 -14688	高周波誘導子	26—9—30	〃	〃
29. 368258	高周波加熱装置	25—9—30	〃	〃
30. 昭25—1954	高周波連續焼入装置	25—3—30	〃	電波企業株式會社
31. 〃 —6142	誘導加熱装置	25—9—25	〃	〃
32. 365232	高周波焼入用誘導體	25—6—30	〃	〃
33. 365231	變形物體等の高周波焼入用誘導體	25—6—30	〃	〃
34. 367595	高周波焼入用誘導體	25—8—28	〃	〃
35. 368678	高周波焼入用誘導體	25—9—30	〃	〃
36. 368679	高周波による齒車焼入用誘導體	25—9—30	〃	〃
37. 昭26—9412	誘導加熱による小なる孔の内面焼入用誘導體	26—8—22	〃	〃
38. 〃 —9413	小なる孔内周面の焼入用誘導體	〃	〃	〃
39. 〃 —9414	高周波焼入用誘導體	〃	〃	〃
40. 366839	高周波内面焼入装置	25—7—29	〃	高周波熱鍊株式會社
41. 366840	高周波焼入環支持装置	〃	〃	〃
42. 367402	齒車等の焼入装置	25—8—28	〃	〃
43. 昭25—10107	高周波誘導焼入装置	25—11—29	〃	〃
44. 〃 -10109	高周波表面焼入装置	〃	〃	〃
45. 〃 -10110	高周波誘導加熱焼入装置	25—11—29	〃	〃
46. 〃 -10823	ミシン中釜邊縁の様な弧狀縁の高周波焼入装置	25—12—19	〃	〃
47. 昭26—2231	クランク軸等の割型高周波焼入装置	26—3—7	〃	〃
48. 〃 —2234	大型齒車面等の高周波焼入装置	〃	〃	〃
49. 〃 —4739	高周波焼入用の調節式誘導子	26—5—18	〃	〃
50. 〃 —4740	高周波齒面焼入装置	〃	〃	〃
51. 〃 —4741	筒物の内面焼入装置	〃	〃	〃
52. 昭27—4031	高周波移動焼入装置	27—7—15	〃	〃
53. 〃 —4035	誘導加熱線輪	27—7—28	〃	〃
54. 〃 —6319	齒面焼入用誘導線輪	〃	〃	〃
55. 〃 —6320	高周波加熱焼入環	〃	〃	〃
56. 367198	表面加熱焼入装置	25—8—28	〃	山岡内燃機株式會社
57. 昭25—10108	高周波加熱装置	25—11—29	〃	〃

登録番號	名 稱	登録年月日	國籍	登 録 權 者
58. 昭26—2232	高周波誘導加熱焼入装置	26—3—7	日	山阿内燃機株式会社
59. 昭27—921	高周波誘導加熱鉸頭又は針頭焼入装置	27—2—1	〃	〃
60. 昭25—8181	高周波誘導加熱装置	25—10—20	〃	樋口東一
61. 〃—10111	高周波誘導加熱装置	25—11—29	〃	稻田虎彦
62. 昭26—4742	紡績用リング焼入装置	26—5—18	〃	大阪機械製作所
63. 〃—4743	高周波焼入自動送り装置	〃	〃	日本高周波株式会社
64. 昭27—6323	割型高周波誘導加熱コイル	27—7—28	〃	〃
65. 昭27—922	高周波焼入装置における水平式移動焼入コイル	27—2—1	〃	中日本重工業株式会社
66. 昭16—3733	高周波表面焼入装置	16	〃	株式会社日立製作所
67. 〃—8333	高周波電流による表面焼入装置	〃	〃	〃
68. 昭27—923	商車用高周波表面焼入誘導子	27—2—1	〃	〃
69. 〃—4035	誘導加熱線輪	27—5—15	〃	三菱電機株式会社
70. 〃—6321	高周波線輪による金切鋸の焼入れ用加熱装置	27—7—28	〃	梶山日露樹
71. 〃—6322	高周波焼入誘導子	〃	〃	横島信太郎
72. 昭16—2266	連続的誘導加熱処理装置	16	米	ホワード・エドワード・ソームス
73. 〃—3732	電気加熱装置	〃	〃	〃

(東京都立工業奨励館材料部)

機械の焼入すべき部品が千差万別であるだけに、そのワークコイルも多種多様であつて、これを一々こゝに述べることは不可能に近い。よつてその要点のみをのべることにする。

第 23 図は普通円棒等の加熱に用いられるワークコイルであるが A の様に多巻コイルになつているもの、又 B のような Solid のもの又 C の様に 3 つの同じ部品が同時に焼けるようなもの、又 D のように 2 つの多巻コイルのものが行列表的に結ばれているものなどがある。これら



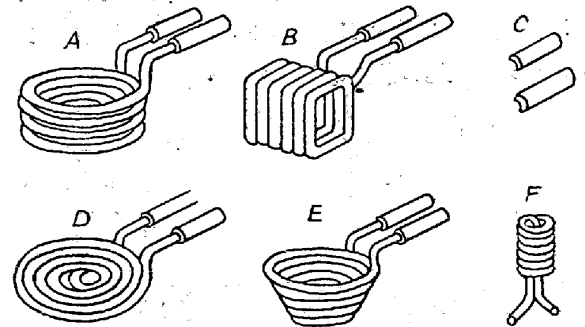
第 23 圖

はそれぞれ特徴を持つているが、ワークコイル選定の大きな規則として次の様な事が云える。

即ち加熱面積が狭い時は単巻のコイルがよく反対にその面積が広く長いときは多巻コイルが良いが、然し、そのコイルの長さがその径の 4 倍以上の長さののでは一様な加熱が不可能になり、むしろ、このときは逐次的に一方から焼いて行く所謂移動式を原則とする。多巻コイルの時のコイル間の間隔は出来るだけ小さくすることがよい。

以上の様な事が大雑把に云える。また以上の様なコイル自身を原則として冷却することが望ましいが、出力 1 kw 以下の場合には冷却しない場合もあるが、これはむしろ例外である。

次に多巻コイルに就いても第 24 図の様にいろいろある。第 4 図はその普通のものでシャフトとか円い物体の加熱の物体に用いられる。B C の様なものはバーとかシ

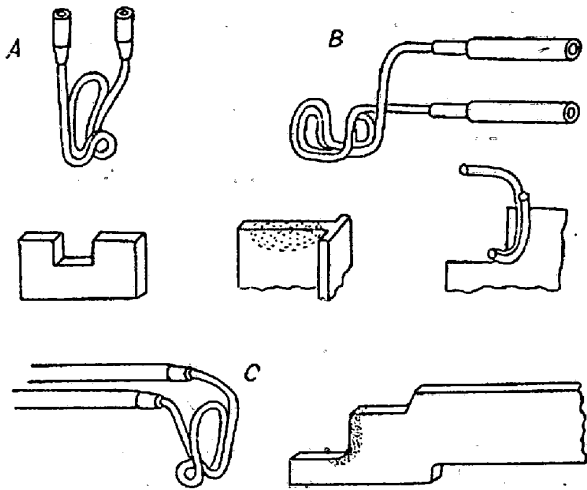


第 24 圖

ャフト類の加熱に用いられ、D はパンケーキコイルと称し平面の焼入に用いられる。E はベベルギヤなどに、F は内面の加熱に用いられる。

さらに第 25 図においては A、B、C それぞれの側に記した様なものの焼入に用いられる。

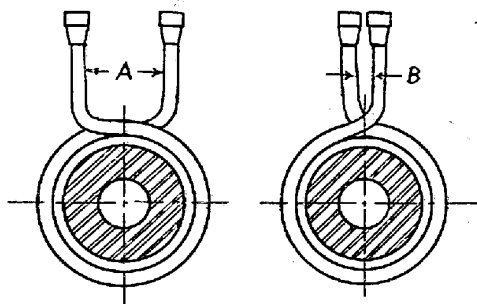
以上のワークコイルに使用される管の太さは 1/8" ~ 1/4" の銅パイプを用いられ、それを円のまま、あるいは平に、角に加工して用いるなどある。それを捲くに渦捲にするのが普通であるが、オフセットにすると一層均一な焼入が得られる。又各コイルはサグを起して接触し



第 25 圖

たり動揺しない様いろいろな方法で止めを付けるのである。又例へば発生装置とコイルとを連結するリードはその間に望まぬインダクタンスをなくする為、できるだけ間隔をすくない様にすべきで、これは如何なときでもコイルの能率を上げるために考えねばならない事であつて第 26 図 A と B とを比較して B がコイルとして優秀なものであることを示した例である。

次に加熱速度は外面加熱（被焼入物に対し）がもつとも大きく之は磁束の密度分布を見てもわかつておるところであるが平面加熱は外面加熱の大体 75%位の能率で内面加熱はもつとも能率悪く 25~50% である。したがつて内面加熱においてはダストコアによる密度の上昇等いろいろの工夫が考えられている。

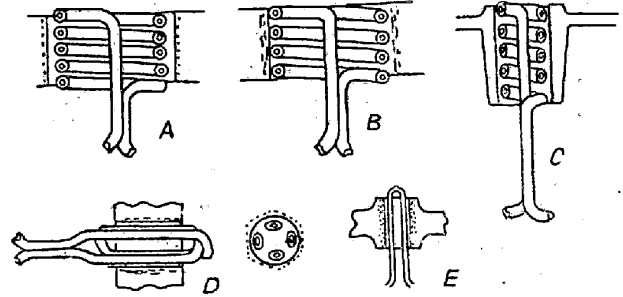


第 26 圖

なお非鉄金属においてはいずれも上の場合はそれぞれの 75% か 50% である。

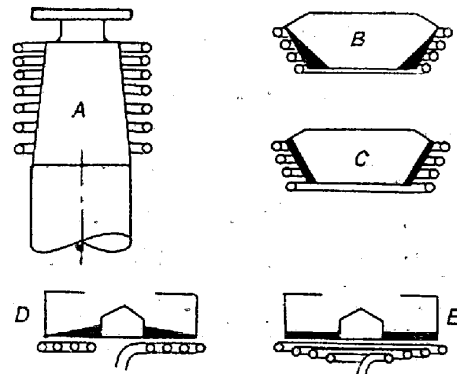
内面焼入の場合考慮されるべき事はコイルと面との gap を出来るだけ小さくする事及びコイルは平にすること、さらに径の小さいものになると鉄心ダストコアを入れたものが効果的であるが、ワークコイルの製作に非常な困難をきたしこの方面の制約を受けてなかなかうまく行かない。又シリンダーライナーのように内面を連続的

に移動して焼入する様な必要のある場合がある。しかも径の小さい場合などは焼入水と移動の送りなどの間にも非常にデリケートな問題が残る苦勞する処である。第 27 図はその一例である。



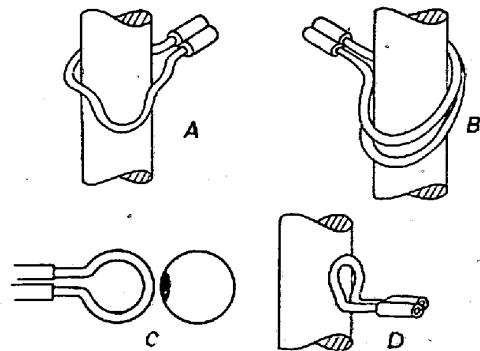
第 27 圖

次にテーバーのついた表面を一樣の厚さに焼入する場合にはコイルのテーバを面のテーバと多少変える必要があり、多捲コイルを用うる場合は第 28 図の様に工夫する必要がある。



第 28 圖

又物体の内の任意の処丈焼入する場合の 1 例は第 29 図に示す通りである。以上簡単に二、三のタイプの焼入法を示したが前述の通り実際の部品は形、大きさ様々であるので研究すべきところは、はなはだ多く残されている。



第 29 圖

次に各種鋼材に対する高周波表面焼入について述べよう。この場合試料の寸法は $\phi 27 \times 20$ のもので材料とし

第 3 表

種 別	記 號	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W
45 炭 素 鋼	イ 00	0.40 ~0.50	<0.35	<0.60	<0.035	<0.035	—	—	—	—
55 "	イ005	0.50 ~0.60	<0.35	<0.60	<0.035	<0.035	—	—	—	—
代用窒化鋼	イ131	0.35 ~0.45	<0.35	<0.60	<0.030	<0.030	—	1.4~1.7	<0.5	0.7 ~1.2
代用肌焼鋼	イ157	0.17 ~0.23	<0.35	0.10 ~1.0	<0.030	<0.030	—	1.0~1.5	—	0.4 ~0.8
85kg Ni-Cr 鋼	イ204	0.25 ~0.32	<0.35	<0.60	<0.030	<0.030	2.5~3.5	0.6~1.0	—	—
100kg Ni-Cr-Mo 鋼	イ206	0.20 ~0.30	<0.35	<0.60	<0.030	<0.030	3.0~4.0	1.0~1.5	0.3 ~0.60	—
110kg Ni-Cr-Mo 鋼	イ207	0.25 ~0.35	<0.35	<0.60	<0.030	<0.030	2.5~3.5	2.5~3.5	0.5 ~0.7	—
低 Cr-Mn-Mo 鋼	イ224	0.30 ~0.37	<0.35	0.50 ~0.80	<0.030	<0.030	—	1.0~1.5	0.15 ~0.25	—
高 Cr-Mn-Mo 鋼	イ227	0.25 ~0.35	<0.35	0.80 ~1.5	<0.030	<0.030	1.5~2.0	2.5~3.5	0.20 ~0.04	—
代用強靱鋼	イ234	0.33 ~0.43	1.8~1.2	0.80 ~1.2	<0.030	<0.030	—	0.8~1.2	—	—
"	イ237	0.25 ~0.35	<0.40	0.80 ~1.5	<0.030	<0.030	1.5~2.0	2.5~3.5	—	0.4 ~0.8
"	イ238	0.15 ~0.22	<0.40	0.80 ~1.2	<0.030	<0.030	1.8~2.3	1.8~2.3	—	0.7 ~1.1
Ni-Cr 鋼	SNC70	0.2 0.40	<0.35	0.35 ~0.65	<0.035	<0.035	1.0~2.5	0.3~0.9	—	—
特殊工具鋼	SKS2	1.0 ~1.1	<0.15	<0.50	<0.030	<0.030	—	0.5~1.0	—	1.0 ~1.3
軸 受 鋼	SUJ1	0.9 ~1.1	<0.15	<0.50	<0.030	<0.030	—	0.8~1.2	—	—

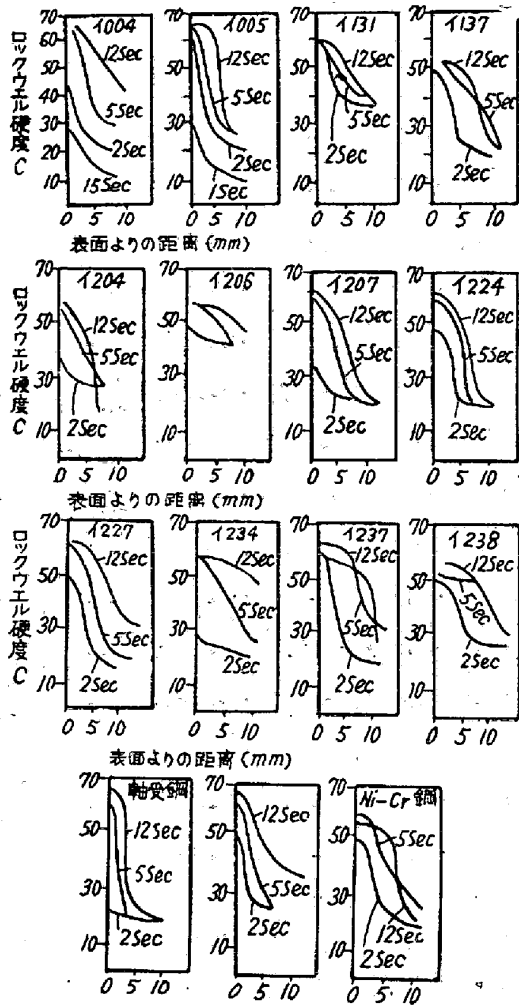
ては、イ004、イ005、イ131、イ137、イ204、イ206、イ207、イ224、イ227、イ234、イ237、イ238、SNC70、SKS2、およびSUJ1の15種でその成分は第3表に示す通りのもので試料に負荷した電力最高温度あるいは電流などは未だ急激な温度上昇を測定する方法が正確でないので我々の処で現在いろいろと研究中であるがそれ等の一応の目安として加熱に際しては第一次側の電圧3100~3300V、電流80~100A、入力65~100KWを決定するだけで満足し加熱時間を12秒、5秒、2秒および1秒と4段階に変えて長時間加熱するにつれて入力を減少せしめる方針であるのが現状でありこの場合もさうである。

先づ硬度であるが硬度計はロックウェル硬度計を用いたのであるが、表面より内面への硬度の分布状態を測定した。之れを第30図に示したが縦軸にロックウェルCスケールを横軸に表面よりの距離をとつたものである。この図面を見てただちに了解することが出来るようにいづれの材料においても1秒では表面にごく近いところといえども不完全な焼入で硬化も完全でなく、したがって図中には割愛した処もあつた。さらに曲線の形状について詳細に見る時は表面から僅か入つた所で硬度が急激に低下するものと、焼が割合奥深くまで入つている場合との2の型のあることを知る。即ち前者に属する型のもの

としてはC、Cr、Wのような炭化物を作るものであつてNi、Mnの様な固溶体を形成するものには後者の型が生じ両成分を含有するものにはこの中間の状態を示す様である。

次に一番この頃問題となつている歯車の高周波表面焼入について述べよう。

即ち本焼入法は歯車の表面焼入にも用いられてその特徴を發揮している。然し乍ら実際には之もいろいろ問題があり殊に焼入前後の歪の問題、焼入層の分布の問題、耐磨耗の問題等根本的には未解決の処が多い。米国では既に量産を開始して焼入単能装置が出来ている。その一例は第31図に示す様に通電から焼入れがボタン一つで進行し完了するものである。(Lapel high frequency Laboratories) 歯車の高周波焼入れは誘導加熱であるので電磁的の理論が適用されることは当然である。先づ周波数は実際問題として最も重要な点はPenetration depth (滲透深さ)である。即ち $S = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$ (cm) で周波数の平方根に反比例する。即ち周波数が高い程焼入の深度は浅い訳である。実際には熱の電導があるので、この理論値よりは深い焼入層が得られているが歯の山と谷とはユイルに対する相関関係が違つたので一様

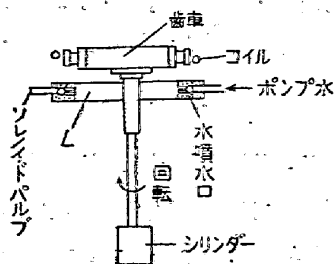


第 30 圖

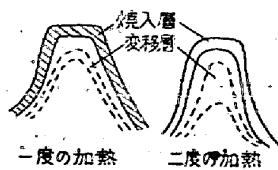
でなく谷底部には焼が入らぬことが多い。

又周波致がどの様にその分布状態に影響するか、実験の結果は精度の要求の高い小型歯車の焼入には、100KC以上の周波致がよく焼入層の深さも歯車の周辺に均一の深さで焼入される。発電機による3KC程度の周波致では小型歯車に対しては相当深い処まで硬くなり、歯は殆んど全部が硬化してしまう。

次に焼入にはワークオイルの形状が大切で歯車の焼入のキーポイントはここである。又加熱も一度丈の加熱又は二度加熱等の方法に依つて第32図の様な硬化層の変化が得られる。



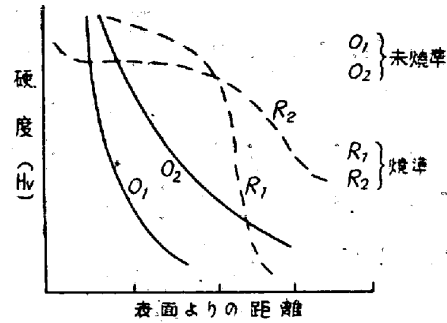
第 31 圖



第 32 圖

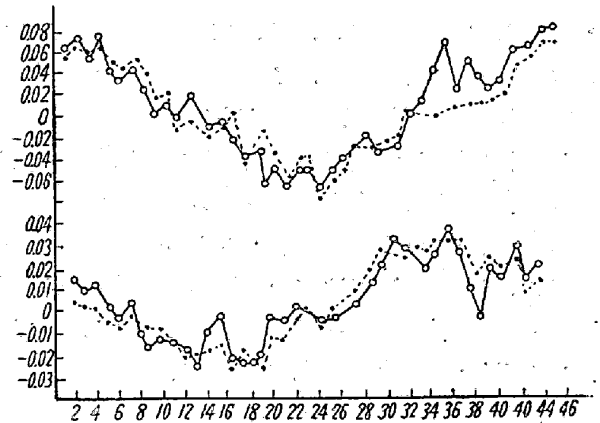
又高周波表面焼入もマルクエンチ、マルテンパー等が行われてよい結果を得られるが之等の熱処理が現場で容易に実用化するためには測温が正確に速かに出来ると云う事が必要である。

次に歪の問題であるが高周波表面焼入であるので、然もその加熱は焼入硬化せんとする処丈の加熱に限られているので歪は理論的に少ない筈である。殊に調質した歯車に対しては特によい結果を得る筈である(第33図)。

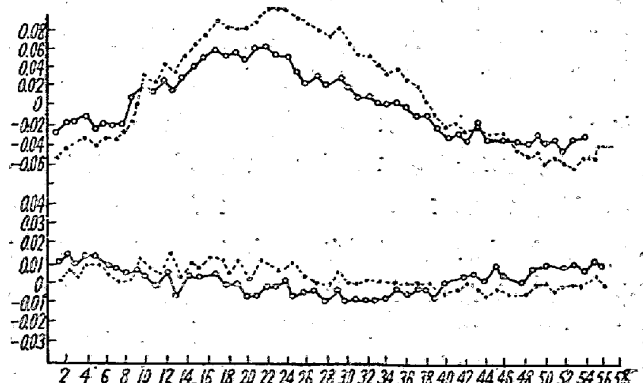


第 33 圖

処が歯車に於いてもこれが非常に問題となるのは加熱が表面丈に限らず又之の場合の塑性、弾性の変形の最後の歪に及ぼす影響が研究されていない為焼入法をあやまる為である。而もこれが又周波致にも大きな影響を持つて

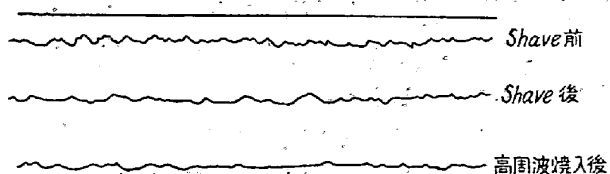


第 34 圖 a



第 34 圖 b

いる。第 34 図 a は、400KC の周波数のもので焼入した場合の偏心誤差と法線刻み誤差であり、又同図 b は 30KC のギャップ式高周波発生装置で焼入した場合のものである。第 35 図は Shaving の前後焼入後の歯車の歯の凹凸の一例である。



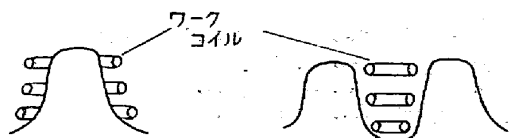
第 35 圖

次に滲炭と高周波焼入との間はこの歪の問題の他に経済的に第 4 表の様な相違がある。(一例 Curtis 著 High freq ind. heating p. 239)

第 4 表

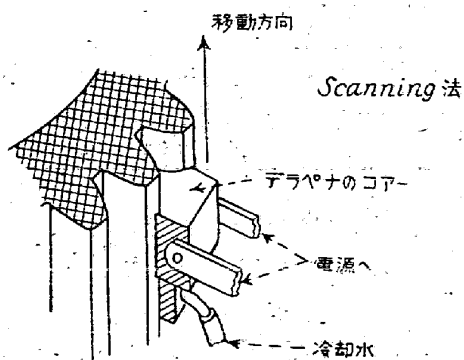
各工程に於ける價格	SAE 1020	SAE 1045
鋼の價格	\$ 0.40	\$ 0.43
1封度當り滲炭費 0.039	0.319	
硬化費	0.041	0.01
清淨に要する費用	0.02	
總計	0.78	0.44
Saving		0.34

以上述べた焼入法は一発で全歯車を焼入する場合であったが容量不足とか又は技術上から one shot で焼入することが出来ず歯を一枚づつ焼入することも出来る。それにも第 36 図に示す様に二つの方法がある。即ち歯を一つづつ焼く方法と相対する歯の間にコイルを入れて二枚の歯を半分づつ焼く方法である。これは何れも又歪を



第 36 圖

少なくせしめることが出来る。更に大型の歯車に対しては第 37 図に示す様な scanning 法がある。



第 37 圖

(ロ) 鍛造への応用

鍛造とか Spinning とかの变形加工に際してその加熱法として高周波誘導加熱を使うことは米、獨に於いては非常な勢で実用化して来た。我国に於いては今後の問題ではあろうけれど多くの利点を持っているので当然盛んになつて来るものと思う。先づそれらの利点、欠点というものを考えて見よう。

利点

(1) 被加熱体が急激に鍛造、変形温度に加熱されるので(従来は1時間もかかった)スケールの出来る暇がない。従つてスケールの生成によつて生ずる表面部の欠陥が生じないし、又加熱が均一の為ファイブフローが非常によくなり不良が少なく且丈夫なより均一な鍛造が得られる。

(2) スケールが出来ない為、ダイの寿命が長くなり且鍛造代が緻密に出来、精密鍛造には有効であり、従つて機械加工費が低減出来る。又材料自身にスケールが出来ないから加工費以外の材料費の節約が出来る。

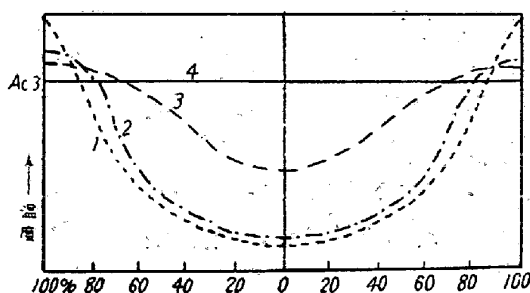
(3) 設計を適当にすればどんな温度勾配のものも容易に出来る。

(4) 従来の炉に比し、床面積が少なくて済み(従来の1/2程度)仕事が綺麗に出来、自動又はコンベヤ化して生産能率を上げることが出来る。

欠点

装置が従来の炉に比して(重油炉等に比して)高い。従つて設備費は高く、又大体に於いて操業費も多少高めにつくが之は時間の節約、労力の節約そして生産量の増加とか製品の品質の向上とかによつて遙かにうめあわせられるものであろう。結局非常に利点を有するものと考えられている訳である。

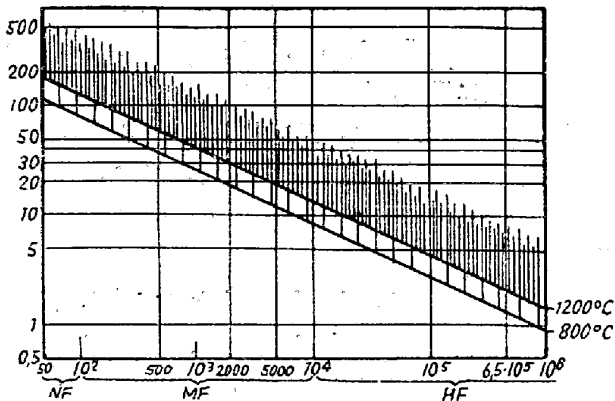
さて以上でこの装置の有利なことが分つたと思ひが、誘導加熱によつて誘起される電流は既述の Steinmetz の式による様に表皮作用ではあるが然しその場合周波数は一定としても被加熱体の μ, ρ は温度上昇に従つて各瞬時変化しており而も熱の伝導の影響も多く Steinmetz



第 38 圖

の理論式は實際の加熱状態とは非常にかげ離れたものである。第 38 図 1 はその理論曲線であり、2, 3, 4 は實際の温度分布の状態で、3 は電力を下げ加熱時間を長くしたもので、4 はその極端な場合である。熱加工の場合は表面焼入の場合と異つて全体加熱を目的とするもので S は寧ろ大きい方が望ましいので f は低くてよいのであるが、然し之も能率と経済上の理由から制限がある。

第 39 図は鋼の丸棒に対し 800°C と 1200°C に完全加熱する場合の周波数と夫に対応する経済的最小半径を示したもので例えば 800°C に於いて 50kc/s を用いたとすると直径が 10cm 以上でなければ経済的に不利であり、10cc/s なら直径 80mm, 1mc/s なら 1mm 以上でよいということになる。



與へられた同波数で 800°C 及び 1200°C に完全加熱する場合に於ける経済的な素材の徑

第 39 圖

然し又上限の方にも制限があるのであるが、之も正確なものではなく大約の処は第 39 図の縦線の示す範囲を各周波数に対する実用範囲と一応考えてよい。

次に誘導加熱法に於ける所要電力は取扱う素材の量と要求温度及び完全加熱か表面加熱か等によつて異なることは勿論であるが、又要求加熱時間の長短にも影響し正確には以上述べた要因の何れを最大に考えられるかによるものであろう。然し一応の基準として N を容量 (kw) とし D を毎時の取扱量 (kg) とすると次の様なものと考えられる。

完全加熱の場合

1200°C $N = 0.5 \sim 1.0 \text{ Dkw}$

500°C~700°C $N = 0.3 \sim 0.6 \text{ Dkw}$

表面加熱

800°C~900°C $N = 0.5 \sim 1.5 \text{ Dkw}$

又加熱に必要な熱量 A kwh を示すと

完全加熱

1200°C $A = 0.4 \sim 0.6 \text{ kwh/kg}$

500°C~700°C $A = 0.28 \sim 0.45 \text{ kwh/kg}$

表面加熱

800°C~900°C $A = 0.5 \sim 1.5 \text{ kwh/kg}$

である。

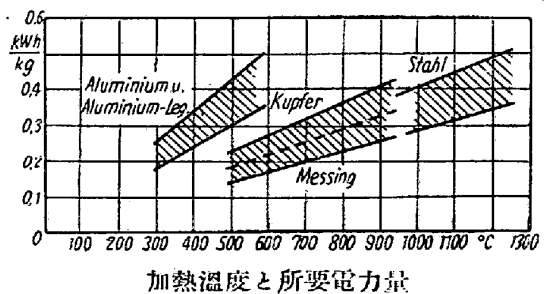
以上によつて夫々の物体に適応した熱加工に必要な容量とか又原価計算とかを算出する基準を求めることができる訳である⁵⁾。更に詳細な点については以下その応用別に述べることにしよう。

さてこの場合に於いても焼入の場合と同様に選定する周波数が問題となる。適用周波が直接使えば非常に便利であつていろいろの研究が行われたが遂に成功しなかつた。そして第 39 図に示す様な周波数と大きさとの関係が常識として考えられている。然し乍ら米国に於いて Loftus E. Co. に於いては 60~Thermo-induction Heating に成功して extrusion, forging に急速に均一に正確な温度調整を行つてスケールが出ない熱加工に成功した。L.E.C. の Thermo-induction Heater は単相、三相に対して組立てられており、又 60, 50 及 25~の周波数に対して設計されており Al, Mg その他合金の forging, extrusion 用の他 soldering, brazing hardening にも使われる。然し一般には最も多く使われる素材の 20~80mm の大きさを目標として 2kc/s~

第 5 表

周波数	鋼 1200°C	真 鍮 800°C	アルミ及びアルミ合金 500°C	銅 850°C
商用周波 50c/s	150~*)耗	100~*)耗	52~*)耗	
500 "	60~250 "	37~440 "	16~820 "	
2,000 "	30~120 "	18~210 "	8~410 "	
5,000 "	20~85 "	11~130 "	5~260 "	
10,000 "	14~60 "	9~100 "	3.5~180 "	
450kc	2.5~8 "	1.5~15 "	0.5~26 "	
1.0MC	1.5~6 "	0.8~12 "	0.35~18 "	

*) 實用から見れば制限はない。



加熱温度と所要電力量

第 40 圖

5) VDI Arbeitblatt Induktive Erwärmung VDI 5-3131 (1952)

10kc/s の範囲、即ち発電機式のものを用いられている訳で第5表にその基準を示す。

又供給電力量は被加工物体によつて当然異つている。その基準としては第40図の通りであつてこれによつて必要とする電力量を求めることができる。

例えば 1200°C に鋼を加熱する場合、kg 当り 0.43 kwh/kg 必要で1時間の作業量を 200kg/h とすると $0.43 \times 200 \text{kw} = 86 \text{kw}$ が必要電力量となり之は変成器の作用度を 100% としたものであるが、実際は matching 其の他からその程度に応じ、0~80% となるのであるからこの点を考慮に入れる必要がある。又更に導入されたエネルギーの内被加工体の加熱に利用されるものは50~60%である。

そして温度の上昇速度は他の加熱法に比し、非常に急速であるので特に表面の過熱を防ぐために $N = (W/cm^2) = \frac{300}{d}$ (d=被加熱物体の直径 ϕ を cm 単位で表わしたものを) を超えない様にするのである。そして鋼を 1200°C に加熱するに要する時間 t は

$$t = \frac{1}{11} d^2 \text{ で計算出来る。}$$

加熱炉はいろいろに工夫されている⁶⁾⁷⁾。

要するに一般には加工機械の近くに置くか或は加工機械の一部に組む様にして置くか或はコンベヤ化してチェーンで送る途中に加熱して待時間を極力少くして能力一杯に活動させておる。独逸エロテルム社ではテルタクトと称し2つの誘導炉によつて待時間を少くし任意の部分の加熱に直ちに應ぜられる過熱の心配もない多くの利点のある装置を発売している。

次に鍛造の二、三の実際の例を述べる⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

1) 棒材、棒材管材末端の鍛造 素材は末端だけが加熱される。棒の鍛造は1日の加熱で1工程又数工程の鍛造が行われるがこれは仕上げの長さや工程の時間によるもので、加熱部の長さも1回の加熱で出来る仕上げの長さ及び工程数を考えて決めねばならぬ。第41図、第42図のようにハンマーで型打をした場合に注意しなければならぬことは出来たものを切り離した時に棒の末端が拡くならぬようにすることである。

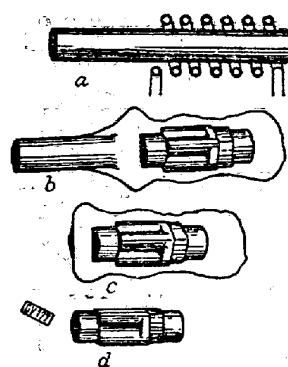
6) Seulen: Technische mitteilungen Heft 6/1953, 10

7) Curtis: High freq. ind heating. p 315~319

8) Caley: Steel Processing Bd 32 (1940)

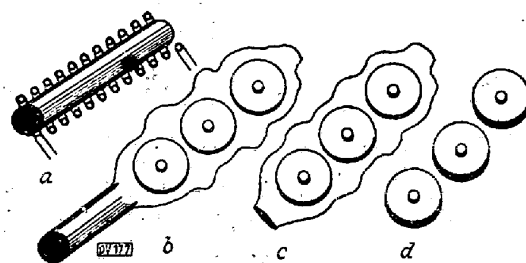
9) Eiländer: Schmid-technische Mitt 1951 Nr 4

10) Seulen: machine u. Werkzeug 1951 Nr 12/13 u. 15



巻取機の部品、棒材から型打で作上げたもの
a. 棒末端の誘導加熱, b. 型打後,
c. 切取, d. 仕上

第41図

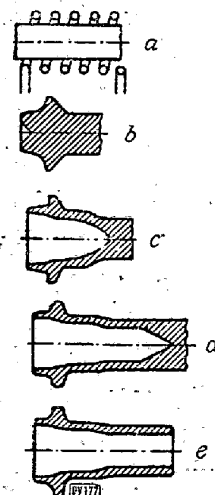


孔のついた盤、型打一回加熱で3個

第42図

棒の鍛造はハンマーだけでなく第43図の鍛造機や第44図の鍛造ロールにかける場合にも用いられる。

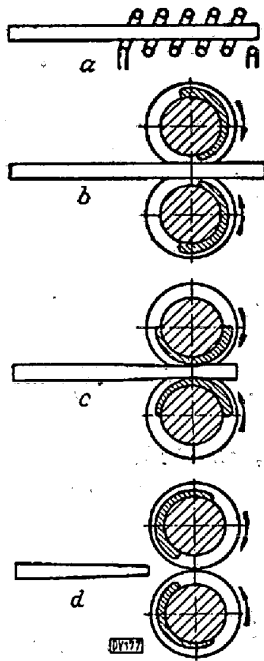
管の末端加工では鍛造即ちプレス、ハンマーで肉厚の変化をし又は中径の短縮拡張等が出来る。曲げ込んだり締付けたりして閉じることにも出来る。環状形の誘導子は



棒より中空體を作る

a. 誘導加熱, b. 先端押しつぶし,
c. 先端孔あけ, d. 孔を深める, e. 製品

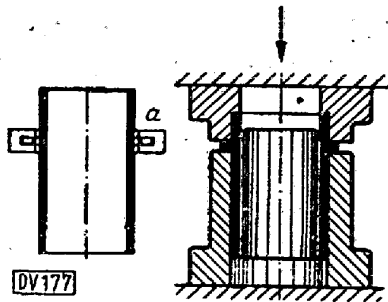
第43図



鍛造ロールにかけたもの
a. 誘導加熱, b. ロールに挿入,
c. 次のロール, d. 製品

第 44 圖

管に対しては非常に便利で急速な加熱が可能である。所望の長さの加熱には固定又は移動式誘導子が使われ、加熱温度は必要に応じて平等にも局部的にも任意に出来る。第 45 圖に示すように狭い範囲を加熱してリング

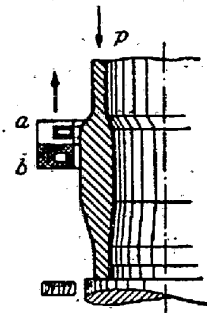


鑄 っ け
a. 誘 導 子

第 45 圖

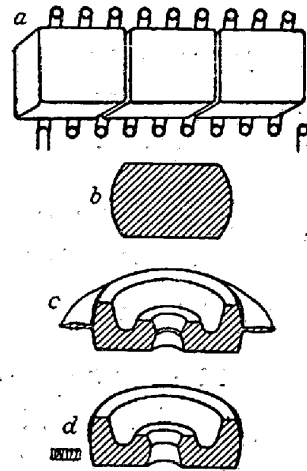
(鑄)をつけるとか、或は一部の隆起を作るような加工も容易である。此の場合には単捲線の誘導子が用いられる。特別な場合には第 46 圖の如く誘導子を加工機械に装置し任意形状の圧出しを誘導加熱しながら作って行くことも可能である。

ロ) 部品の鍛造 物の鍛造と云うことになるとブロックとか金属塊とかの一つ一つに分割されたものから出発するのが一般である。第 47 圖, 第 48 圖はこれを示



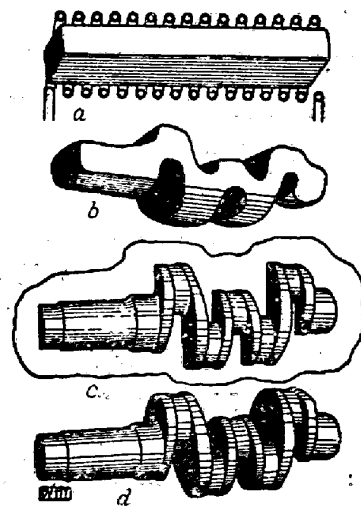
誘導加熱をしながら長い部分の成型をする方法
a. 誘導子, b. 冷却噴射, p. 型つけの圧力

第 46 圖



型打で仕上げた齒輪
a. 誘導加熱, b. 型押し,
c. 型打をしたもの, d. 仕上品

第 47 圖



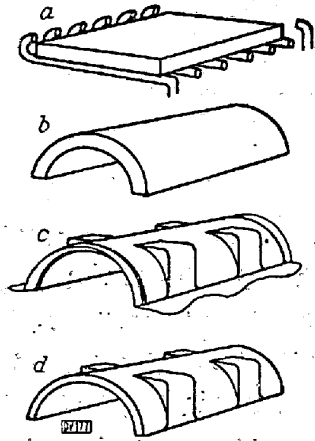
曲 軸

第 48 圖

している。

素材としてはホワイト・メタルが取上げられる。第 49

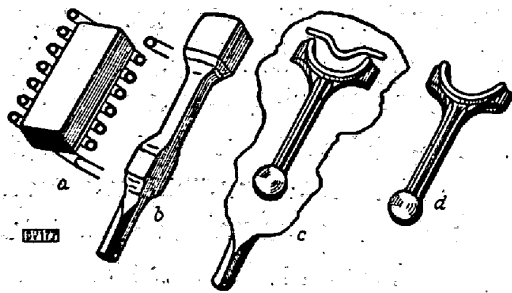
図はホワイトメタル軸受を鍛造する1例である。これは形が一定しているから誘導加熱は容易であるが、途中で加熱を繰返すことが出来ないで1回で鍛造出来るように完全加熱されねばならぬ。



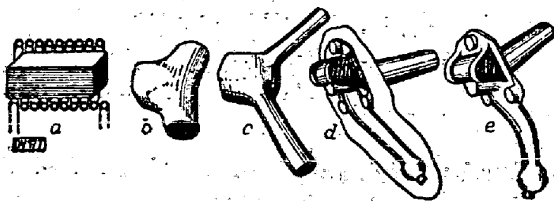
軸受のカバーの型打鍛造
a. 誘導加熱, b. 曲げる,
c. 型打, d. 仕上品

第 49 圖

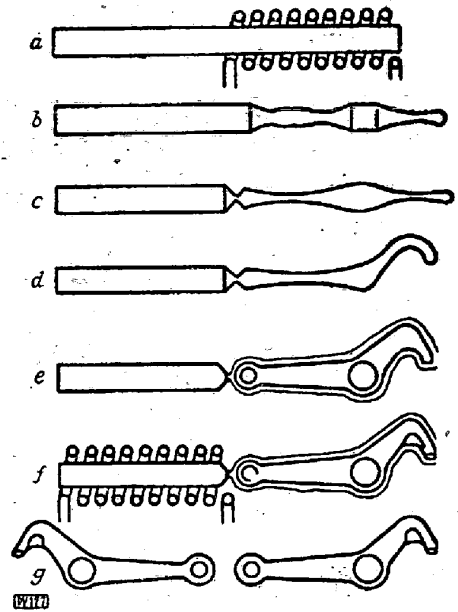
(イ) 及び (ロ) 作業で型による加工の場合特別な作業工程がある。これは鍛造でよく知られていることで型打ちの予備作業として押出し、引伸し、曲げ、打ち拡げ等の諸作業が必要なのである。誘導加熱が適しているのはこの事前の変形と型打ちとが1回の加熱で出来る様な場合である。第 50~52 図がこの例である。



ピストン桿
第 50 圖



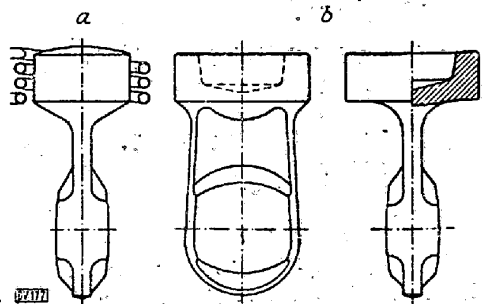
前軸の腕木
第 51 圖



横杆を二組同時に鍛造する

第 52 圖

ところが型打の場合には屢々型打で出来たものを今一度加熱しなければならぬ様な時がある。そして型打をし又はプレスで仕上げる場合がある。第 53 図は関節金物の1例であるが、これを誘導加熱するには断面が一樣なもの。一部を加熱する場合にしか推奨出来ない。そして加熱が一樣に行われ、しかも他の整形完了部分は冷却状態にあるようになければならない。こう云うことが出来る場合にはエネルギー損失も、焼痕も又変形も少なくてすむが、そうでないと危険である。



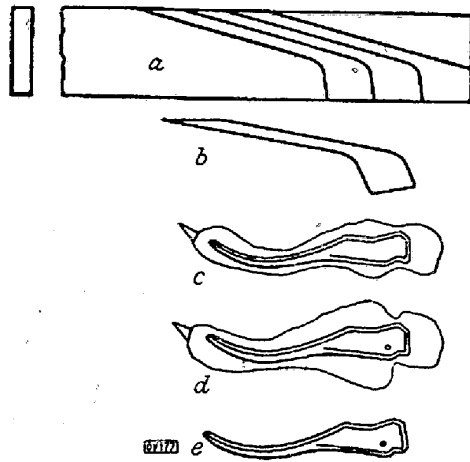
関節金物で一度形が出来上つた後鍛造機に入れて仕上げる

第 53 圖

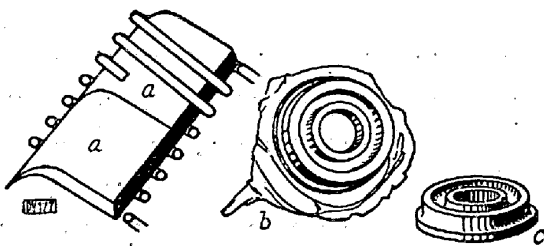
ハ) 鋳金の鍛造 (型に切取つた鋳からの鍛造)

素材としては予め型に従つて冷間で切り取つた鋳物を用いる。第 54 図はこれである。この場合には鋳には摺めるように端を残しておかねばならぬ。この為形が不規則になつて誘導加熱に適するようにする事の出来ない場合がある。時には鋳金が切取つた後に正しい形状の断

面を持つ第 55 図のような場合もある。斯の如き場合は誘導加熱は容易に出来る。



板金よりハサミ部品の型打
第 54 圖

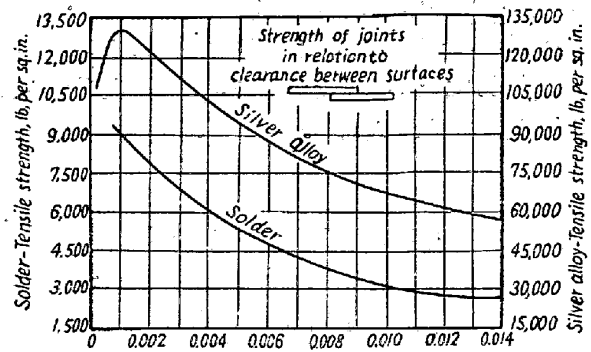


板金より車輪を型打
第 55 圖

二) Soft soldering and Silver brazing に対する応用。誘導加熱による Soldering, brazing には次の様な特徴及利点がある。

- 1) 常に確実な丈夫な接合が得られる。作業が迅速で自動的に均一に出来る。
- 2) Liquid 及 gastight にできる。
- 3) 衝撃や振動に耐える。
- 4) 電気電導度が高い。
- 5) 電気鍍金が長く出来る。
- 6) 接合部を加熱すればよいので経済的であり、急速に加熱が出来量産的であり、grain growthの心配がない。

本法に使用される周波数は外径 15mm 以上のものは 3000c/s~500000c/s の回転変流機による中間周波数を用いられるがこの外径以下のものは火花式又は真空管式の 150kc/s~500kc/s の高周波も使われている。戦後盛んになった自動車工業に刺戟されて急速な発達を遂げたもので 3kc/s~6kc/s の周波数のもので出力 30kw の回転変流機を用いて 非常な成果を挙げている。第56図は半田鍍及び銀鍍の接合距離と接合力との関係であつて



第 56 圖

0.02mm~0.07mm の Clearance では銀鍍付の強度が 100kg/mm² にもなつている。然し 0.02mm 以下の Clearance では流動性を失つて強度が落ちる。

銀鍍付：先づ接合部の設計に工夫すべきで機構的に接合部の強度が保てる様にし誘導加熱時に接手が容易に行われる様にすべきであることは論をまたぬ。銀鍍は線状薄板、又は粉末のものがあるが大体線状のものが多い。その太さは大体 1/32'~1/16' であり又 Shim の場合は 0.002~0.003' の厚さのリボンである。

又銀鍍成分によつてその融解点及流動点が異つて来るが一般には 50%Ag に 18%Cd, 16% Cu と 16% Zn を含有したものが推奨される。それで接合に先ち接合部分を加熱前に充分清浄にすることが必要で失敗の大半はこの清浄の不完全によるものであることは他の方法の場合と同様である。そして flux を用いると鍍の流動を助け酸化を防ぐ等、この flux の除去等の方法を従来知られた方法通りにやればよいので省略する。

加熱の方法は焼入と大体同様であるが、例えば加熱帯が狭い時は一捲であり、広くなると又非鉄金属の場合は多捲であるが唯被加熱体と Coil の Coupling は少しゆるくてよい。実際の応用例は実に枚挙にいとまないで Curtis の著書¹¹⁾にたくさん出ているのでここに之を再録することを控えるが二三の例について説明しよう。

一方独逸に於いても非常に盛で自転車工業に於いて¹²⁾¹³⁾フレームの組立に非常な勢で普及している¹⁴⁾。作業状況を図示することは出来ないが二つの装置を一人の作業員が受持ち一つが作業中に他を取付る様にして装置四つを二人で操作し、その電源としては 30kw 500c/s の一つの廻轉變流機で供給されておつて二人の作業員が一つの完全なフレームを組むに要する時間は 1分12秒で

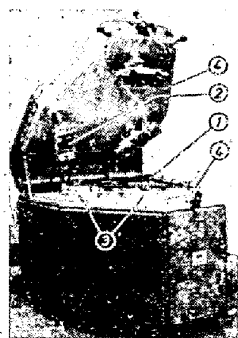
11) Curtis: High freq. Ind. heating 151~162
 12) Seulen: Tech. mitt. Heft 6/1953 Bd 3 S 306
 13) Seulen: Elektro techniker
 14) Seulen: Machine u. Werkzeug 35 (1952)

電力は 0.6 kwh である。

写真第 1 は此の鑢付の装置の写真であつてフレームを合上に固定し各鑢付部を次から次と自動的に仕上げて行く装置である。この装置を二台装置して交互に使用し取付、取外しの待時間をなくす様に作業すれば一人の作業員で 1 時間 45~60 台のフレームが組み、所要電力も 44 kwh であるとのことである。従つて之を基準にして我国の電力費 1 kwh 10 円、賃金を 1 日 600 円 (8 時間) としても 1 台組合せ賃が 4 円位であろうと云う事である。

半田鑢付: 大体強度的には弱いものであるから若し強度が要求されるなら設計に注意すべきで鑢の厚さは 0.001'~0.004' 位がよい。flux, coil の設計についても大体銀鑢付のときと同様な趣旨及従来の方法の場合の注意を踏襲すべきである。又鑢付性も材料によつて色々異つてゐるし、熱の伝導の高いもの程誘導加熱は有効である等特性を考えに入れて作業をなさねばならぬ。鑢は錫と亜鉛との合金であるが、誘導加熱の時に使用する鑢はその組成は丁度共晶組成にして所謂鑢の塑性範囲のないものが適當の様である。然し一方 Setting period の間に振動とか温度の間隔等がある様な場合には 30% の半田を使用することもある。flux には $ZnCl_2$ を含む acid type と resintype とある。鑢付の応用例としては矢張 Curtis の著書にたくさんある。

即ち一つ一つ鑢付するもの Conveyor set によつて逐次行ふもの、或は回転デスクの上に乗せて Solder も



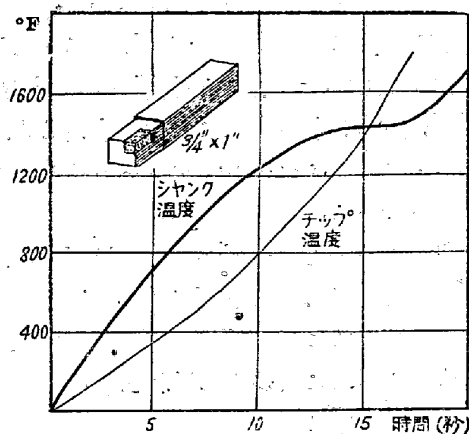
写真第 1. Löttisch zum induktiven Löten von Fahrradrahmen

- ① Fahrradrahmen; ② obere Induktorhälften;
- ③ untere Induktorhälften; ④ auswechselbare Platten

自動的に出して来て一ヶ所で誘導加熱を次々とやるもの等いろいろあるが、要するに Solder する処を均一に又変形等なく鑢接温度に到達する様に周到な工夫が必要であろう。例えば覆を管に鑢付するとき内外から Coil を以て加熱しないと管が開いてうまくつかなくなつたりして

しまふ。又真鍮とか銅合金の鑢付には High impedance を使つて即ち 2 巻 3 巻の Coil を使つて被加熱体に充分熱が入る様にせねばならぬ (抵抗は小さく μ は 1 であるから)

工具の鑢付: タングステン カーバイト tip を鑢の Shank に鑢付するにこの誘導加熱はよい方法である。然しこの二つの加熱のされ方には当然第 57 図に示す様な相違があるが丁度 Brazing temperature に於いては大きな温度の開きがなく一致することは都合がよい。



第 57 図

そして銀鑢付の方法としてもいろいろの方法が考案され又ミールリングカッターにカーバイトチップを装入すること、又酸化を防止する為不活性瓦斯気流中で行われてゐる方法等がある。

又石英の管の中で水素を入れた中で Braze する Hydrogen Brazing 等もある。

以上 Silver brazing 及 Soldering に関することを略記したが我国に於いてもその発展が望ましい。

(ホ) 焼鈍へ応用: 管ボイラー等強度を要求する容器の熔接部の焼鈍には高周波誘導加熱が有効である。それは温度の調節も 1% 以内で保たれるので完全焼鈍、歪取り焼鈍も同一のコイルで出来る。被加熱体とコイルの間はアスベストで絶縁するとかコイルを水冷して長時間移動式にやるとがある。

一例として直径 3600mm 肉厚 34mm のものを焼鈍中 1200mm にして中間周波で温度 600°C に加熱するには電力 200kw 10 時間で 400kg が処理されるので、1kg 当りの電力は 5kw でよいことになる。直径 200mm 以下のものには 10,000~ を使用し大きなものには 2000 を使用する。

(ヘ) 熔接に應用 熔接鋼管を作る場合に接目を熔接するのに試験的に使用して好成績を上げてゐる。矢張接合目丈を誘導加熱して次いでロールによつて締めつけ接

の目的を達する事で鋼管のみに限らず AI 管等にも応用されている。但し鋼管, AI 管によつて適用周波数等が異なるのは当然であるが, 何れにしても研究時代であるが, 電気溶接と共に発展するものであろう。

(ト) 鋼材の切断 棒鋼を適当な長さに切断しようとするとき切断部分を誘導加熱法によつて部分加熱をして之を切断すれば極めて容易に而も迅速に作業出来る。之は高温切削の一つの方法である。

(チ) シンダーリング 粉末冶金工業の粉末のシンター炉として誘導加熱を多く使用されている。而もこの場合炉の内部は真空にでも特定のガス気流にもなし得るので非常に便利である。適用する周波数は 200°C/s の中間周波のものが多くが中の粉末によつて決定せられるべきであらう。現在ではタングステンカーバイドのシンターに多く使われている。

(リ) 熔解への応用 熔解への応用は高周波誘導加熱の一番最初の応用であつて我国に於いては既に諸々で実用化されているのでここに詳述する必要ない程であるので現在特筆する様なことのみに触れよう。先づ高周波誘導加熱の特徴を挙げると、

(イ) 被加熱体を直接誘導加熱する。

雰囲気其の他に影響されぬが, 被加熱体の固有抵抗, 透磁率に加熱は左右される。

(ロ) 被加熱体の加熱温度は原理的に制限はない。

(ハ) 他の加熱法に較べ大きな加熱エネルギーを加える事が出来る。従つて急速加熱が可能であり, 被加熱体自身内部に熱が発生するので輻射による加熱に較べ急速加熱の際, 被加熱体内部の温度勾配は少ない。

(ニ) 電磁攪伴作用があり, 溶湯はよく攪伴され, 均一の成分の湯が得られる。

(ホ) 多くの鋼は常温にて強磁性体であり, これを誘導加熱すると急速に加熱されるが, 磁気変態点を過ぎれば, 常磁性となり, エネルギー吸収は減少, 加熱速度は急減する。

概念的に誘導加熱には上の様な特徴があるので, 均一な溶解及び真空装置と併用して高級な純粋な性能を要求するものに使用されておる。次に

(イ) 電源周波数の選択は厳密のものでないが, 最初溶解始まるまで, チャージが適当に加熱され, しかも溶け落ち後, 能率よく電力が加わる周波数を選ぶ。

(ロ) 高周波溶解炉の利点の一つは, 短時間溶解であるので, 短時間溶解に必要な大きな高周波電力を得られる電源を選ぶ。

大容量の溶解は溶解後の能率がよく, 大きな電力の得

られるMG式 1000 サイクル電源が使用される。電圧は普通 800 ボルト特に 6000 キロワット以上のものは 1600 ボルトが使用される。溶解過程の電力は変化するが, 炉は溶解後規定電力が加わる様設計されている。

一般に溶け落ち前が電力が掛り難いので, 溶解材料の形状を電力が掛り易い様扁平な材料を挿入するとか, 所謂残し湯をするとかすれば, 溶解は容易になる。

又材料が磁気変態点以上加熱されると電力が掛り難くなるので, 溶解温度が磁気変態点と離れて居るニッケル等の材料は普通鋼より溶解仕難い。

溶解方法として, 溶解室を塩基性或は酸性耐火材料で直接ライニングし, この内に被溶解物を挿入, 直接誘導加熱を行う方法, 即ち直接溶解法と, 導電性黒鉛坩堝を使用, まずこの黒鉛坩堝を誘導加熱し, これにより, 内部に挿入された被溶解物を加熱溶解する方法, 即ち間接溶解法がある。後者は黒鉛坩堝の材質(固有抵抗)厚み, 周波数により必ずしもその内部にある被加熱物が間接加熱されるとは限らず, チャージも同時加熱されるので場合によつては半間接溶解なる言葉も使用される。これらの溶解法は溶解金属により選択されるが一例を示せば第 6 表の如くなる。

第 6 表

金 属	坩 堝 種 類
鐵 又は = ツケル 鐵	非 導 電 質
錳 鐵	導 電 質
真 鍮(銅70, 亜鉛30)	非 導 電 質
銀 (純)	導 電 質
銅	非 導 電 質
鋳 金	導 電 質
金	非 導 電 質
白 金 屬	導 電 質
イ リ ジ ュ ム	非 導 電 質

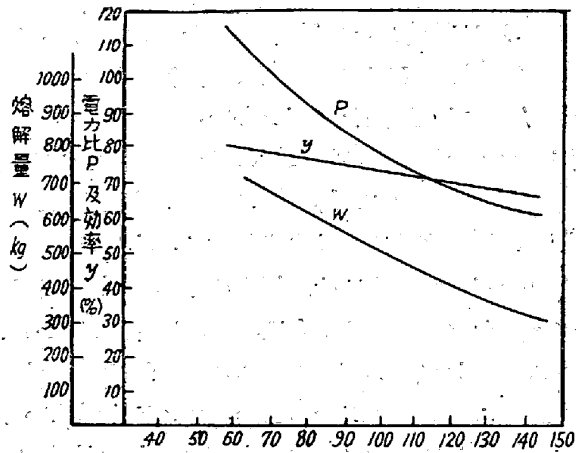
直接溶解の際のライニングはマグネシヤに多少バインダーをまぜた耐火物をつき固め, 溶解により焼結させ使用する場合が多い。

これら塩基性耐火物の他に珪砂を主として使用した酸性ライニングも多少使用される。最近中性耐火物も研究使用されて居る様である。これらライニングの厚さは溶解室の寿命(炉材の性質, 撞き固め方法, 炉の大きさ被溶解物に左右されるが, 50 回乃至 250 回程度である)に大きな影響を持っているのであるが, 炉の電気特性にも重大な関係がある。

即ち, ライニング厚さを増せば一般に寿命に延長されるが, 電磁結合は悪化する。

例えば 300kW 500kg 炉についてライニング厚さを要

化させた場合の電気特性を第 58 図の如くなる。これは大きな電源に接続した場合で一般にはインピーダンス整合の具合で更なる。



第 58 図

次に誘導加熱を伴った真空溶解について述べよう。用途別に分類すれば大体次の如くなる。

- (イ) ガス分析用真空溶解炉
- (ロ) 研究用小型真空溶解铸造炉
- (ハ) 真空溶解炉
- (ニ) 真空溶解铸造炉

其の外高温にて極めて酸化仕易いチタン、ゲルマニウム等については特殊な炉が用いられ、必ずしも一定の方式が定まつて居るわけでないののでここには省略する。

(ニ)項の工業用真空溶解铸造炉では、一操作毎に真空を破る所謂バッチシステムより真空を破らず連続操作が出来る半連続或は連続真空炉が開発されつつある。

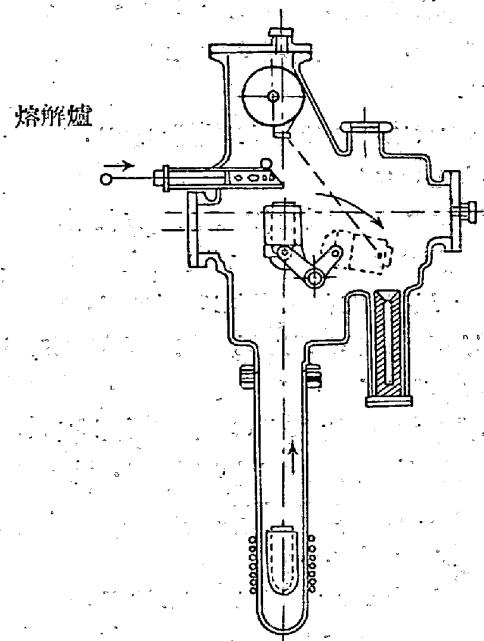
ガス分析用真空炉について述べると、方法はあらかじめ脱ガスした黒鉛ルッポ内に試料を入れ、加熱溶解してこの際放出するガスを集め分析する。

従つて黒鉛ルッポは充分脱ガスされねばならぬが、これは最初黒鉛ルッポを高温に加熱する事によつて行われる。これをブランクテストと云い、実技的には鉄鋼の場合は 2000°C 、チタンの場合は 2300°C が採用される。炉としてはこのブランクテストが出来る設備であればよい事になる。炉は気密を保ち不導電性の不透明石英管を用い、この内に黒鉛坩堝を置き、真空に排気外部のコイルを通电して使用する。加熱は火花放電式発振器、例えば 35KVA 水銀間隙式変流装置或は真空管式発振器を用いる。

或る電源を用いて何度まで加熱出来るか。これは、一次コイルと黒鉛坩堝と電磁結合の具合と坩堝よりの放熱を如何にして防ぐかにより定まる。 2000°C までの加熱

にはモリブデン遮熱板が使用されるが、モリブデンを更に高熱に使用することは機械的に困難なので、 2300°C 級のものはカーボン粉末が使用される。カーボン粉末は熱絶縁が良好で、接触抵抗が高いと云う特性があるが、多量のガスを吸着仕易いので取扱に十分な注意が必要である。又研究用小型真空炉は真空中で溶解铸造する方式で色々の構造方式のものがある。電源も高周波加熱抵抗加熱或はガスで加熱するものがある。米国 N.R.C の代表的研究用真空炉は半球状ベルジャー内に加熱コイル、鑄型等を納めてある。通常タングステン抵抗加熱で入力 7.5kW のとき 2000°C まで加熱出来る由である。又高周波電源を用いる事も出来る。

真空槽内へ饋電する部分の構造は特に電気的知識を要する。ガス分析用真空炉の如く不透明石英管を用い、第 59 図¹⁵⁾の如く坩堝を引上げ傾動铸造する方式のものもある。この炉は溶解量 1kg で 3MC の高周波電源を用いて居るので殆んど攪伴作用が認められるが、陽面は非常に静かである。



第 59 図

工業用大型真空炉となると電源、真空排気ポンプ、或は炉の連続操作等考慮しなければならぬ面が多い。溶解量数 kg 程度の炉も大体この範囲に入ると考えてよい。工業炉では高周波電源を用い、一次コイルは真空槽内に入れた形式のものを用いる。不導電性大型真空槽は工業的に考えられず、真空槽は不銹鋼或いは鋼で製作される故、一次コイルを外部に置く方式は採用されぬ。一次コ

15) 長島, 電気試験所々報 17 卷 10 號

イルを真空槽内に入れ高電圧を加えれば真空放電を起し、更にアークに發展する。

それで電圧はおのずと制限され、且つこの電圧は真空度によつて異なるが、實際問題として熔解炉の真空度は被熔解物ガス放出により局部的に相違する故、最悪の真空度（条件により異なるが $1\sim 10^{-1}\text{mmHg}$ ）で真空放電を起さぬ電圧でなければならぬ。周波数は熔解、攪伴作用の点より $1,000\sim 10,000$ サイクルが使用される。真空管式のものゝ周波数が高すぎ放電を起し易く、ギャップ式のものゝ波形が減衰波なので最高電圧を安全値にとれば、実効値は極めて低くなり実用にならぬ。

最近の排気真空ポンプは著しく發達したので小型炉では、充分の容量のものが容易に得られるので大した問題はないが、大型炉では充分考慮する必要がある。

最近の真空炉では、真空槽自身の内容積の大小は殆んど問題にされず、熔解すべき金属自身のガス放出量で所要ポンプ容量が定まる。それ程金属包蔵ガスは多量である。

工業的真空炉は熔解中の真空度を $10^{-3}\sim 10^{-4}\text{mmHg}$ としたものが多い。研究用のものは更に真空度をねらつたものもある。

真空排気ポンプは次の三種類が使用される。

(イ) 油回転ポンプ

大気圧より 1mmHg 程度までの排気に使用され、到達真空度は使用する油の蒸気圧に著しく左右されるが一般に 1mmHg 以下では排気能力が減少する。排気能力は $20\sim 3000\text{l/min}$ のものがあゝ、電動機で駆動される。

(ロ) 油拡散ポンプ

10^{-3} から 10^{-5}mmHg で其の能力を發揮するポンプで油分子の拡散を利用排気するものである。油を加熱する電熱ボイラーと油蒸気の噴出口及び冷却部分から成り、油を循環して使用する。

$20\text{liter/sec}\sim 3000\text{liter/sec}$ 位のものがあゝ。

(ハ) ブースターポンプ

油回転ポンプと拡散ポンプとの間に充分其の性能を發揮しない範圍があり、またこの範圍が真空熔解炉としてガスの放出が最も多いので、最近發達したこのブースター

ポンプを使用する。原理はきり吹の如きものでやはり電熱を使用する。 $300\sim 1000\text{liter/sec}$ 程度のものがあゝ。

以上三種のポンプを組合せ使用するが、特に高真空を要せぬものには拡散ポンプを省略したものがあゝ。排気量はガス容積と其の時の真空度（圧力）を掛け合せた量 $L\mu\text{Hg/sec}$ で最近表わす事が多い。

真空ポンプを接続する排気管の口径及び長さは重要で、殊に高真空ではこの排気管の設計が適當でないといふ、排気管端の排気容量は容易に半減する。それで排気管径は $200\text{mm}\sim 250\text{mm}$ 或はそれ以上のものゝ採用される。

次にバックキングであるが之は真空には非常に重要なものでゴムバックキングが実用的である。それは弾性である殊に人造ゴムブナNNが一番よい。ゴムは変形はいくらでもするが容積は圧力によつて変らぬ。之を利用して相手の面に非常に大きな圧力で常に押付けられている。然もゴムの弾性により元に戻ろうとする為その圧力は何時迄も加わつており鉛其の他の様に塑性変形によつて固定してしまわず密着後に於ける変形に対しても隙内が出来ない。従つてこの性質を極度に利用する為バックキングゴムの印を強度的に持ち得る範圍で出来る丈細くする。殊にこのゴムの強性変形と更にグリースを添加したウィルソンシールは移動廻轉部分を持つた処の真空の部分に絶対に必要で本装置には非常に用いられている。

IV. 結 論

以上高周波誘導加熱の應用に対して現状を述べたが高周波の金属への應用範圍は非常に広いけれど然しそれには充分その特徴を發揮出来る丈の技術と又補助となる材料等が發達しなければならぬことを痛感している。事實熔解以外の應用が非常に遅く取入れられたのは矢張他の技術水準が低い為で真空熔解等はその一番よい例であらう。又真空管式装置（高周波發生）にしても真空技術の問題となつておる現状で相関聯した技術の向上を必要とすることを痛感する次第である。最後に米国 Ajax Co の推奨する下表を示して筆を擱く。

應 用	商用電力	發 電 機 方 式				火 花 方 式		眞 空 管 方 式	
		無 制 限	20~1200 kW				水 銀	瞬 減	5~100kW
	25~60 サイクル		1000 サイクル	3000 サイクル	10,000 サイクル	3~40kW	3~30kW	5~15 Mc	1~5Mc
						20~80kc	100~500 kc		
溶 解	—	—	B	B	A	B	—	—	
30ポンド以下	—	—	B	B	A	B	—	—	
30~300ポンド	—	B	A	—	B	—	—	—	
300ポンド~4トン以上	—	A	B	—	—	—	—	—	
鍛造・成形等									
直徑 1/2吋迄	—	—	—	B	A	A	A	C	
1/2~2	—	—	A	B	B	B	B	C	
2~4	—	A	B	C	C	—	—	—	
4以上	—	A	C	—	—	—	—	—	
焼入—薄層	—	—	—	—	—	—	—	—	
焼入—一般									
直徑 1吋迄	—	—	C	A	A	A	A	A	
1~2	—	—	B	A	C	B	B	—	
2以上	—	B	A	A	—	—	—	—	
焼入—厚層									
直徑 2~4吋	—	A	A	B	B	C	—	—	
4以上	—	A	B	C	—	—	—	—	
焼入—全體									
板・管	—	—	—	—	A	A	A	B	
直徑 1/2吋迄	—	—	—	B	A	A	A	B	
1/2~2	—	—	A	B	B	B	B	—	
2以上	—	A	A	B	—	—	—	—	
ろう付・半田付・熔接									
小部分	—	—	—	B	B	A	A	B	
大部分	—	A	A	A	—	—	—	—	
焼 結	—	A	A	A	B	A	C	—	
高 温 (グラフアイト等)	—	A	A	A	—	C	C	—	
槽加熱	A	B	B	C	C	A	C	—	
眞空管の排氣	—	—	—	—	B	—	A	—	
誘電加熱	—	—	—	—	—	—	—	A	
シント加熱	—	—	—	—	B	B	B	—	
シリンク加熱	A	B	B	B	B	B	B	—	
焼 鈍	A	B	B	B	B	B	B	—	
焼付, 乾燥仕上	A	B	B	B	B	B	B	—	
ダイ加熱	A	B	B	B	B	B	B	—	
マツフル加熱 (不良導體)	B	B	B	B	B	B	B	—	