

## 技 術 資 料

## 放 電 硬 化 法

鈴 木 正 敏\*

## Electrical Spark Discharge Hardening.

Masatoshi SUZUKI

## I. 緒 言

火花放電を利用して金属を電氣的に加工するいわゆる放電加工法は、1938年にソ連のラザレンコ夫妻によつて提唱され、彼らが1946年にスターリン大賞を受けるにおよんで、本格的に実用化され始めた。この新しい金属の加工法は、ソ連はもちろん、米、英、仏、スイスなどにおいても、金属の穿孔、切断、型彫、研磨用の加工機として、市販、実用化され始めている。わが国においても十数年前から、鳳誠三郎博士らによつてその研究が開始され、現在その研究会は関東に2、関西に1を数えており、また放電加工機もすでに二、三社によつて研究、製作されていて、実用面においても逐次その性能を認識されつつある状態である。これら放電加工法は大体において、インパルス発生回路の陰極に加工用電極、陽極に被加工体を結線して、加工液と呼ばれる液体（通常ケロシン）の中で両極間に火花放電を発生せしめ、その際生ずる両極の消耗を利用して加工を進行させるものである。

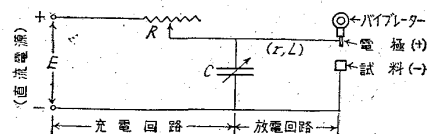
これに対して、火花放電を応用したほかの方法として金属の表面を硬化する方法がある。この“放電硬化法”も放電加工法の一環として、ソ連において始められたもので、この場合火花放電を気中において発生せしめ、その際に生ずる熱的影響ならびに電極物質の移転によつて、試料金属の表面を硬化しようとするものである。特に鉄鋼材料の場合には、この方法によつて従来他の方法では得られなかつたような高硬度の表面硬化層を、しかも簡単に得られることが報告され、その実用例も挙げられている。しかし、放電硬化の機構に関する理論的研究、あるいはその実施面に重要な基礎的研究に関してはソ連の文献にもほとんど発表されていないし、欧米諸国およびわが国においてはほとんど研究も行われていないようである。

筆者<sup>2)</sup>は数年前より六崎賢亮教授の指導と、ジャパックス株式会社井上潔博士らの協力のもとに、放電硬化法の研究を進めてきたが、その結果、この放電硬化法は従来の滲炭、窒化、あるいは高周波焼入といった表面硬化法と同様の目的に十分実用され得るものであり、その適用場所および目的によつては、装置や操作などの簡単さ、およびある時間使用後の修復可能といった点などをも含めてこれらより場合によつてはより効果的であると考えられる。ここにその結果を主体として、大要を記すこととする。

## II. 装置および基礎事項

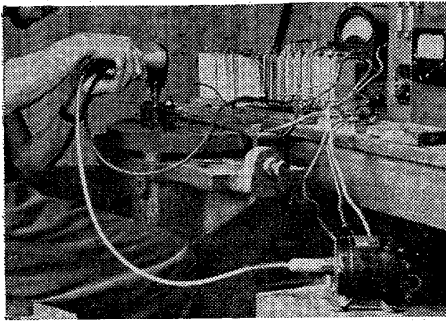
## (1) 基本電気回路と硬化装置

放電硬化に使用される基本的電気回路は第1図に示すごときいわゆるラザレンコ回路（R—C回路）で、これは放電加工の基本回路とまったく同一である。ただ、放電硬化の場合、全体が大気中におかれていて放電間隙が液中でないこと、および電極と試料との極性が通常放電加工のそれと逆な点が異つている。また、電極がバイブレーターに取り付けられていて、火花放電後に両極が短絡する点が著しい特徴である。バイブレーターとしては通常100 $\Omega$ 程度の電磁石式あるいはその他の形式のものが用いられている。第2図は著者らの研究室における実験装置で、手にしているのがバイブレーターである。要するに100V、または200Vの交流電源と、直流発電

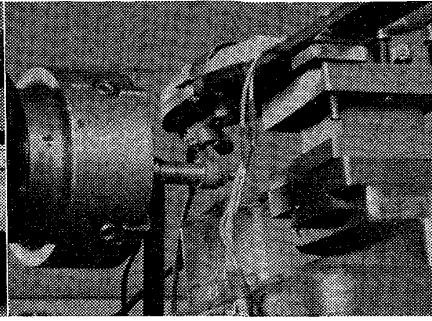


第1図 基本的電気回路

\* 千葉大学工学部 工博



第2図 手動硬化装置



第3図 自動硬化装置

機または全波整流装置とさえあれば、あとは小型の蓄電器と可変抵抗とのみで全体の回路を組み得るし、それにバイブレーターが加わるのみというきわめて簡単な、場合によっては可搬式にすらし得るものである。

通常、放電硬化法の装置においては、このように手をもってバイブレーターを操作しているのであるが、このことは、とかく試料面上における硬化層の生成に不均一性を与えやすいと同時に、大きな品物の表面を硬化するなどの場合、著しい疲労をとまなう。そこで当然作業の自動化ということが考えられねばならない。著者らの試作した自動化装置の一例を第3図に示す。これは旋盤の一部にわずかばかり手を加えるだけで、きわめて簡単に操作を自動化し得ることを示したものである。すなわちまず旋盤の回転部分を減速して3~12 rpm程度に落せるようにしてここに試料を取付ける。バイブレーターはバイト台の部分に旋盤自体から絶縁して取付け、第3図に示すごとく蝶番で止めて、上下方向に自由に動き得るようにする。かくすることによって試料の被硬化面とバイブレーターの相互の関係位置が変動する。たとえばカムのごときものを硬化しようとする時でも、作業は円滑に継続しうることとなる。このような装置により、試料をゆるやかに回転しつつ放電を行わせ、自動送りをかければ電極は試料の各部と放電しながらその位置を移動させていく。試料の回転数と送りの早さを適当に加減することによって丸棒もしくはカムのごときものの表面に美しい硬化面を得ることができる。

(2) 放電硬化法における諸現象

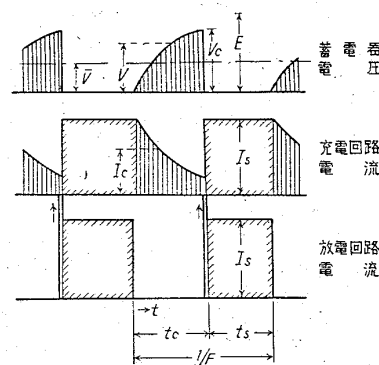
前記のごとき装置を使用して放電硬化を行なうに当り実際に起る諸現象を考えると次のごとくなる。

(a) 回路における電圧および電流の変化

放電硬化をおこなうにあたっては、発電機もしくは整流機からの直流を回路に加え、バイブレーターを振動数  $F$  サイクルに駆動して電極(陽極)を試料(陰極)に近づける。この間に蓄電器は電源電圧  $E$ 、充電時間  $t_c$ 、蓄電器容量  $C$  および充電抵抗  $R$  によって決定されるある電圧  $V_c$  まで充電される。両極の接近にともない、電極と試

料との間の絶縁が破れてその間に火花放電を発生する。かくて蓄電器にたくわえられた電気は放電回路を通じて放電されることになるが、電極はさらに近接してやがて試料と短絡する。空気中における火花放電間隙はきわめて小であるから、火花発生から短絡までの時間はきわめて短かい。短絡が起れば、その間には電源

電圧  $E$  と抵抗  $R$  によつて定まる短絡電流  $I_s$  が流れる。やがて電極はふたたび試料と離れて遠ざかつていく。放電回路が開くと蓄電器  $C$  に充電電流  $I_c$  が流れ、電圧  $V$  を高めていく。かくして全体が最初の状態に戻りこのサイクルを周期  $1/F$  s で繰返すこととなる。この間における各電圧、電流の状態を第4図に示す。



第4図 回路各部の電圧電流

火花放電に際し、蓄電器中に蓄えられた電気は瞬間的に放出されるため、その際の電流値はきわめて大となり、そのため非常な高熱と、その極小部分の急熱による非常な高圧とを

発生する。そして電極および試料の小部分は急激に熔融、蒸発を起し、次で短時間の後には両極が短絡して両極の熔融物質がまざり合つて急冷される。極物質はかかるさいに一方から他方へと移転し、その表面にこれまでほかの方法によつて作られたものと異なる特殊な層を形成する。もちろん一回の放電によつて形成されるかかる層はきわめて小範囲かつ少量であるが、これを繰返すことにより、試料表面全体に比較的均一に、ある厚さの層を形成し得ることとなる。

以上が放電硬化法の操作とそこにあらわれる現象とである。

(b) 回路中の電気的变化に影響を与える諸条件  
放電硬化の操作にあつては、前に述べたごとき諸現象を観察することができるが、これらの現象に影響を与える条件としては次のごときものが考えられる。

まず電気的な回路条件としては、

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{充電回路(電源電圧 } E, \text{ 充電抵抗 } R \\ \text{蓄電器容量 } C, \text{ 蓄電器電圧 } V_c) \\ \text{放電回路(回路抵抗 } r, \text{ インダクタンス } L) \end{array} \right.$$

また、機械的な操作条件としては

バイブレーター振動数  $F$  が考えられる。

この内、 $F$ の逆数すなわち1サイクルの時間  $1/F$  は第4図にも示すごとく、

$$1/F = t_c + t_s \quad (t_c \cdots \text{充電時間}, t_s \cdots \text{短絡時間})$$

となる。厳密に考えれば、このほかに放電時間  $t_a$  が考えられるが、その大きさは通常  $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ s}$  の程度で、他の二つの項に比して小さいので省略し得ると考える。

この  $t_c$  と  $t_s$  の内、 $t_s$  は単に  $E$  と  $R$  とによつて定まる短絡電流  $I_s$  を流すにすぎず、火花放電の強さには何らの影響も与えないから、 $t_c$  の方が今後主として問題となつてくる。

次に  $r$  および  $L$  はもちろん、火花放電の波形その他の状態に大きな影響を与えるもので、その影響の検討は重要であるが、後述の実験においては終始これらの値をできるだけ小さく、しかも一定にたもつておこなつた。

したがつて、今後電気的回路条件を変化させるということは、充電回路に関することとなる。これらの内、実際に火花の状態を決定するものは、 $V_c$  と  $C$  との二つであるが、その内  $V_c$  は、

$$V_c = E \{1 - e^{-(t_c/CR)}\}$$

で示されるから、結局電気的回路条件として以下に種々変化させたものは  $E$ 、 $C$  および  $R$  の三つである。

実際の場合に、これら三つはそれぞれ単独に自由に変化せしめ得るが、火花の状態を決定する重要な因子の一つである  $V_c$  は、これをメーターの上から読み取ることにはできず、オシログラフの電圧曲線等からその値を知り得るにすぎない。回路に接続した電流計あるいは電圧計から読み得るものは、一周期間における電流および電圧の平均値  $\bar{I}$  および  $\bar{V}$  となるわけである。

これらの値は、次のごときものと考えられる。

$$\begin{cases} V = E(1 - e^{-\alpha t}) & \text{ここに } \alpha = 1/CR \\ I_c = (1/R)(E - V) = (E/R)e^{-\alpha t} \\ I_s = E/R \end{cases} \quad (\text{第4図参照})$$

なる基本関係式より  
蓄電器の平均電圧

$$\bar{V} = F \int_0^{t_c} V dt = (1/\alpha) E \{ \alpha t_c - (1 - e^{-\alpha t_c}) \}$$

充電回路の平均電流

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \bar{I}_c + \bar{I}_s \\ \bar{I}_c &= F \int_0^{t_c} I_c dt = CE(1 - e^{-\alpha t_c}) F = C \cdot V_c \cdot F \\ &= \frac{E}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha t_c}}{\alpha} \cdot F \\ \bar{I}_s &= I_s \cdot t_s \cdot F = (E/R) \cdot t_s \cdot F \end{aligned}$$

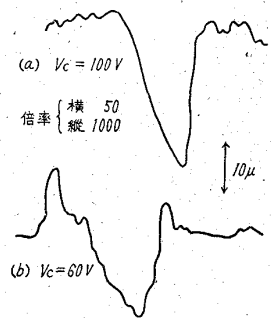
なる値が誘導される。

これら  $V_c$ 、 $\bar{I}$  および  $\bar{V}$  の値の関係は、これらの式からだした計算値の通りに測定されることが確かめられている。

(c) 火花放電の熱的影響

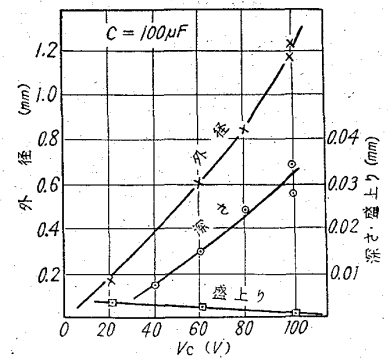
電極と試料との間に火花放電が発生すると、両極間には瞬間的に、しかもきわめて微小な面積の部分に大電流が流れることとなり、その結果通電部は急激に加熱されて、熔融、さらには気化し、その部分の空気および金属ガスは爆発的な膨張を起し、両極の熔融部を吹き飛ばしてその部分を噴火口状にし、一方吹き飛ばされた部分はその周囲に堆積して、ここに噴山が出現することとなる。

この状況を知るために、電極として細い針を使用し、これを徐々に炭素鋼試料面に接近せしめ、ただ1回の放電をそれらの間に起させた後、両極間を短絡させることなく引き離してその表面を検討すると、第5図に示すごとく表面粗さ曲線が求められる。このよう



第5図 放電痕の粗さ曲線 ( $C = 100 \mu F$ )

な曲線から各種の噴山について、その外径、噴口の深さおよび周辺の盛り上りを測定した結果が第6図に示すごとくである。すなわち  $V_c$  が大なるほど噴山の外径は大となり、その深さも  $V_c$  の大

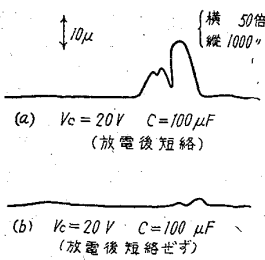


第6図 放電痕の形状

なるほど深くなる。また  $V_c = 100V$  位の高い所になる噴と口の周りに放射状に熔融金属が飛び散っているが、 $V_c$  が低くなると飛散というよりも、むしろ高さを増して盛り上つた感じとなつてくる。

(d) 短絡

放電硬化法においては、前記のごとき火花放電の直後に両極がさらに接近して短絡するという現象が起るのが特徴である。この現象の効果を知るために、前記のごとき単発放電を飛ばしてそのまま直ちに短絡したものと然らざるものとを比較して見た一例は第7図に示すごとく



第7図 表面粗さ曲線

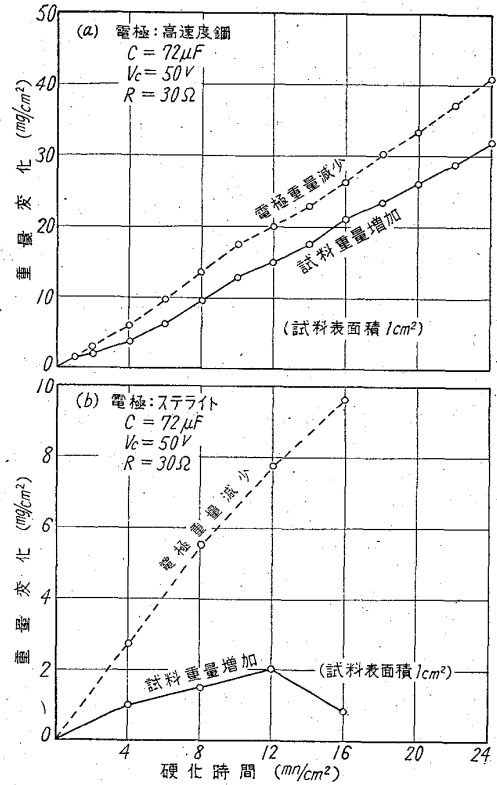
である。これからもわかるように短絡によつて試料の表面に山形の突起を認めることができる。(第6図からもわかるように  $V_c$  の低い場合は短絡しないでも多少の盛り上りが試料側に見られ、噴口は著しくない。)この粗さ計曲線において、 $V_c = 20V$  といった低い場合を例示したのは、 $V_c$  の高い場合は火花放電によつて生ずる噴口が深くかつ大きいために全体の形がくずれて、図に見られるごとき表面の山がはつきりと認められないからである。このように短絡によつて極物質が移転することは、かかる表面粗さ曲線のみではなく、顕微鏡による外観の観察や重量変化からもあきらかに認められる所であり、短絡をともしない場合は、同一放電回数に対して試料の重量変化もきわめて小さいことが測定される。すなわち、放電硬化法においては、この放電後短絡するという現象が重要な役割を占めていることが考えられる。火花放電によつてその一部分が熔融気化した両極はその直後の短絡、急冷によつて混合したまま凝固し、さらにこれが互いに離れるさいに、その部分がいずれかの極に残つた状態となつてしまうため、極物質の移転が起るものと考えられる。

(3) 表面硬化の状態

(a) 電極と試料の重量変化

放電硬化法による表面硬化層の形成状況を判定する方法としては、通常試料の重量変化を測定する方法がもちいられる。すなわち、試料表面に電極物質が移転して被覆層ができていくにつれて試料の重量は増加し、また一旦形成された被覆層が破壊していくごとき現象の生じた際は試料重量の減少となつて示されることとなる。第8図は高速度鋼およびステライトをそれぞれ電極とした場合の試料側の重量増加と同時に、電極側の重量減少の模様の一例を示したものである。これらから見られるごとく、試料が一旦増量した後にはふたたび減量していくごとき場合においても、電極は常に減量を示すこと、電極の示す減量は常に試料の増量より大、すなわち全体としてつねに両極の一部は気化、もしくは飛散によつて消耗していること、およびこれら重量変化の状況は電極によつて大分異なることがわかる。

すなわち高速度鋼電極のごとき場合、少くとも図に示した程度の範囲内においては試料側はどこまでも時間とともに増量を示しているが、ステライトの場合においては、一旦硬化初期において増量を示した試料はある時間



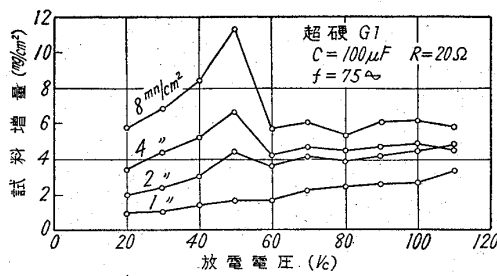
第8図 両極の重量変化

を経過すると、今度は減量を示すようになっていく。この間も電極は減量を続け、結局このような場合、表面層がある厚さに達すと逆に破壊されていく傾向が強くなるということが認められる。もちろんこの最高値の大いさは電気的、機械的なあらゆる条件によつて異なるものであるが、とにかく表面の形成状況が一応は試料の重量測定によつて間接的に判断し得ることが認められる。

(b) 硬化条件における問題点

放電硬化の作業において、その作業条件として、前に述べたごとき電気的な回路条件、および機械的な操作条件が考えられるわけであるが、それら条件によつて決定され、最終的に放電硬化作業に影響をおよぼすものは蓄電器電圧  $V_c$ 、あるいはそれと容量  $C$  とによつて決定される火花放電の大いさである。この中でも  $C$  の値はある程度任意に、しかも一定にすることができるもので、単独に変化し得る値であるが、 $V_c$  は  $C$  をはじめ、多くの因子の影響を受けて定まる値である。ここで今、 $V_c$  が変化することによつて、放電硬化の状態にどのような影響があるかを求めて見る。すなわち  $C = 100\mu F$ 、 $R = 20\Omega$ 、 $f = 75$  と一定にし超硬 G1 を電極として実験した結果の一例を第9図に示す。

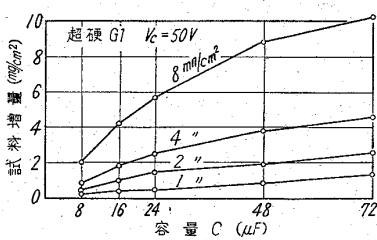
すなわち硬化初期においては、試料増量は  $V_c$  の増大にともなつてほぼ直線的に増加していくが、ある時間後にはこの増量曲線はある極大値を有するようになり、そ



第9図 電圧一増量曲線

の極大点の  $V_c$  は大体において 50~60V であつて、決してそれ以上高い所ではない。放電エネルギーは  $(1/2) \cdot C \cdot V_c^2$  であるから、 $V_c$  の高いほど大であるべきはずであるのにかかる現象が生ずるのは、50~60V 以上の高い所とそれ以下とは火花放電の状態に何らかの変化があるためと考えられる。事実、シンクロスコープによる放電波形の観察によれば、この辺から放電波形の第二半波、すなわち逆方向の電流波形が認められ、これがこの増量曲線に影響してくるものと考えられる。

容量  $C$  の影響としては、 $C$  の大きさを覚えて、しかも  $V_c=50V$  一定に保つようにし、その際における試料の



重量変化を測定した結果が第10図である。すなわち、硬化時間の短い間には試料の重量変化は  $C$  の大きさに對して直線的に変化する。このことは放電エネルギーの大きさと考え合せて当然のことと思われる。しかし時間の経過とともに、この傾向は上方に凸の曲線となつてくる。これは後述のごとく、超硬電極の場合硬化層の厚さに限界があり、それを過ぎると破壊される傾向のあることをあわせて考えるとうなづけるものであろう。

次に前にも述べたごとく、放電硬化法においては、通常放電加工法とは反対に、電極側を陽極、試料側を陰極にしておこなうわけであるが、この極性が絶対に必要なことか否かを試験して見た。すなわち、まず両極を同種の炭素鋼同士としたものについて、両極間の移転は常に陽極→陰極の方向をとることをたしかめ、次に炭素鋼試料と超硬電極との間における移転を測定した。まず通常の場合のごとくに電極側を陽極に、試料側を陰極に結線した場合は今まで通り試料側が増量したが、これを逆の極性にした場合を試みた所、移転は極性に関係なく、前同様超硬→炭素鋼と移ることが確かめられた。

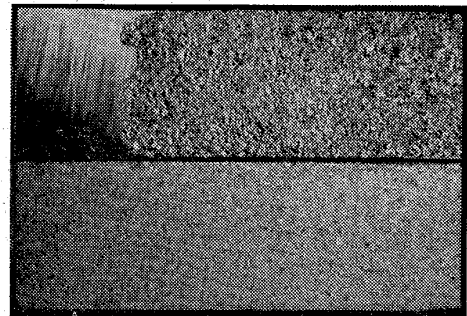
この結果から放電硬化法において、物質の移転は極性

のみによつて定まつてくるのではなく、電極と被硬化材との両者の材質的な関係によつてその方向が定まる場合もあることが認められる。すなわち物質移転においてその極性と同時に、あるいはそれ以上に、両極の材質ということが問題となることを認めた。

以上、放電硬化法において大きな問題となるべき点は  $V_c$  および  $C$  の値と、両極の材質による相対的な関係とであると考えられる。

(c) 試料の表面状態

放電硬化した試料の表面は、要するに放電による噴口とその周囲の盛り上りが全面に行き渡り、更に積み重なつて形作られていくものである。したがつてその表面は細かい梨地状をなして行くことは当然であり、その粗さは電気的回路条件のほか、電極と試料との材質によつて異つてくる。

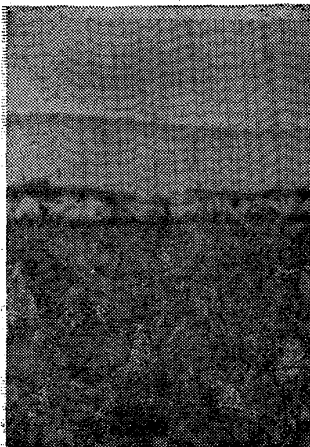


第11図 試料の表面状態

作業初期においては、放電は電極と試料の新鮮な表面との間で起り、その表面は比較的荒い。第11図は巾1cmの角棒試料を2本並べた写真で、その上側の1本は作業初期で未だ左端に新鮮な面を残している状態を示す。表面が一応硬化層で覆われた後は、放電は電極とすでに形成された硬化層との間に起るようになり、それが積重なつて段々と厚い硬化層が作られていく。表面の粗さはそれにつれて漸次改良され、表面は美しい光沢を有するようになってきて、用途によつてはその上に研磨を必要とせずそのまま使用し得る程度になる。第11図の下側の1本の試料は、硬化層がある程度厚く付着した状態を示し、その表面が初期の頃より大分改良されていることが肉眼的にも認められよう。

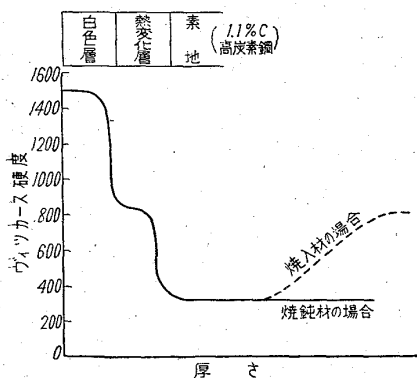
(d) 断面組織および硬度分布

第12図は超硬G1を電極として放電硬化した高炭素鋼の断面組織である。この写真の上部1/3は試料をはさんだ銅板の部分で、その下の白色の部分から下が試料の断面にあたるわけである。この白色の部分は放電に際して一たん熔融した後急冷されたと考えられる表面層で、超硬を電極とした場合のこの層は通常の酸などによつては



第12図 断面組織  
電極超硬 G 1 × 300(2/3)

腐食されることなく、白く光つた状態を示しているので「白色層」と呼ばれる。白色層はまたきわめて硬度が大であり、ヴィツカース硬度約 1500 にも達し、超硬合金それ自体の硬度にほぼ匹敵する。またこれを 1000°C 位まで加熱してもその硬度を減じない。白色層の下部は表面からの熱によつて急熱急冷された層で焼入組織を示し、その硬度は大体マルテンサイトのそれに相当する。これは「熱変化層」とよばれる。熱変化層は大体通常の焼戻過程をたどつて軟化していく。第 12 図において高炭素鋼の試料の例を示したのは、この熱変化層をはつきりと示すためである。この層の下部はやがて素地そのものに移行していくが、この部分にはかならずしも全く熱せられなかつたわけではなく、焼入層の直下は焼の入る温度までは加熱されなかつたのであつて、それ以下のある温度までは加熱されているわけである。すなわちあらかじめ試料全体を焼入れておいて、その表面を放電硬化すれば、前と同様の白色層、熱変化層の下に焼の戻つた層が見られ、それがさらに漸次素材の焼入組織に移行していくのが認められる。すなわちこの焼戻層までの深さをもつて広義の熱変化層と呼ぶことができるわけである。かかる試料の



第13図 硬度分布曲線  
(模式的に示す)

硬度分布曲線を模式的に示したものが第13図である。図中実線は標準組織の試料の場合、破線は焼入組織の試料に放電硬化した場合の典型的な硬度分布曲線の形を示すものである。これら各層の実際の厚さは、与えられた火花放電の強さ、すなわち  $C$ 、 $V_c$  と作業時間等によつて異なるものであり、また焼入層の厚さは試料の成分によつても変わるものであるが、これらの数値等は後に記すこととし、ここではこれらの層の存在を示すにとどめる。

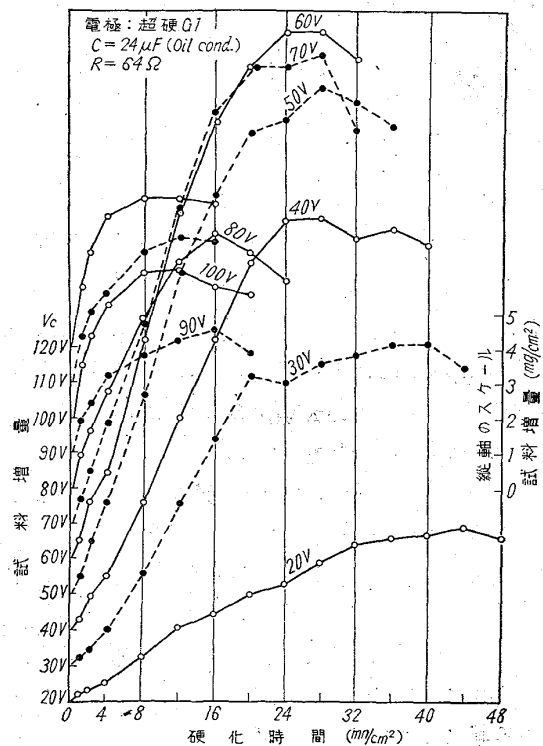
### III. 超硬電極による放電硬化

鉄鋼の放電硬化における代表的な電極として超硬質炭化物合金を使用した場合について考えると、この場合、超硬合金それ自体の硬度に匹敵する値を有する表面硬化層が得られ、これは他のいかなる電極を使用した場合より硬いものである。しかもほとんど無酸化に近い状態で熔融付着した硬化層は、そのまま美しい光沢を有し、耐食性も相当に期待される。しかしこの表面硬化層が、超硬電極の場合比較的薄くしか得られないのが難点で、実際には目的に応じて適当な硬化条件を選ぶことが問題となるのである。

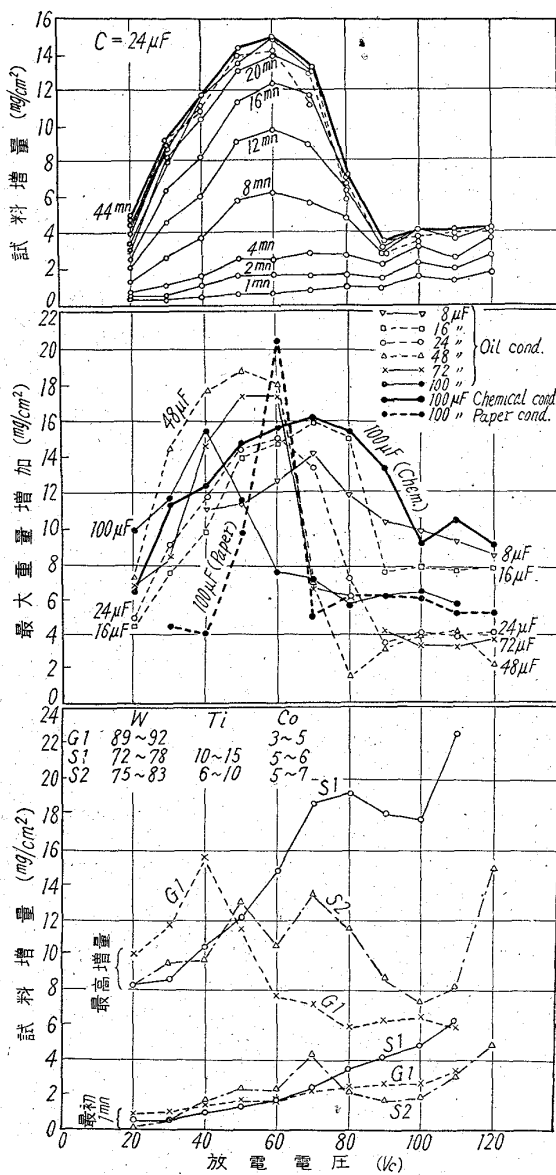
#### (1) 試料の重量変化

試料表面への電極物質の移転付着状況を知るための、最も簡便な手段としては、放電硬化処理前後における試料の重量変化の測定が考えられる。この点は後にも示すが、実験の結果は大体においてこの手段が正しいことを示している。

第 14 図は電極に超硬 G 1 を使用した場合の一例を示すもので、 $1\text{cm}^2$  当りの硬化時間と試料の重量変化量（この場合増量）との関係を各放電電圧  $V_c$  について示したものである。ただしこの場合、縦軸（増量）の原点は混雑をさけるため、各  $V_c$  毎に移動させてあり、その大いさは図中に示した scale のごとくである。また第 15 図は、 $V_c$  を横軸として、試料の増量との関係を各硬



第14図 硬化時間と重量変化



(上) 第15図 最高増量曲線  
 (中) 第16図 各種最高増量曲線  
 (下) 第17図 電極の種類による影響

化時間に対して示したものであつて、実験の結果各  $V_c$  に対して最高の増量を示した値を太線をもつてつらねてある。すなわち、この太線が最大付着量に対する放電電圧  $V_c$  の影響を示したものとなる。

これらからもわかるごとく、試料が最高増量を示す  $V_c$  の値は 50~60V 位であつて、火花放電の第二半波、すなわち逆向きの放電電流が顕著に認められるそれ以上の電圧においては、むしろその最高増量は小さな値を示している。このように超硬 G1 は放電電圧の影響を極めて敏感に受けるようであり、しかもこの傾向は、蓄電器の種類によつても大いに異なるようである。第16図は oil condenser, chemical condenser, および

paper condenser の三種類に対し、容量 100 μF までの場合の各種最高増量曲線を比較して示したもので、この影響が認められる。

Chemical condenser の大容量のものを使用すればこれらの例より遙かに速かに、厚い硬化層を得ることも可能である。例えば  $C=1000 \mu F$  の場合、 $2 \text{mm/cm}^2$  程度で 0.1mm 程度の厚い表面層を得ることができる。しかし、このような大容量の場合、電源電圧を目的の放電電圧よりも相当に高くするかまたは充電抵抗を非常に小さくするのでなければ、バイブレーターの一周期間に蓄電器を十分に充電することは不可能となり、作業能率が落ちることとなるし、またもし上記のごとき処置をとるならば、放電電圧の不一致もしくはアーク放電の発生といったいずれかの結果を招く恐れを生じてくる。これらの原因とともに、元来が大容量であるために、必然的に表面の荒れが大となり、従つてかかる条件の採用にはさらに検討の余地がある。ただし、多少の荒れはかまわないごとき場合においては、十分に実用され得るであろう。

次に第 16 図のごとき最高増量曲線は電極の種類(成分)によつても大きい差を生ずる。第 17 図はその影響を示したものである。これまでに示した結果は、WC と Co とのみから成る G1 級の超硬合金を電極として使用した場合であるが、これは G 級のものが放電電圧  $V_c$  の影響を著しく受けることを認めたので、C および  $V_c$  の影響を検討する上に最も好都合と考えたからである。しかしながら超硬合金としては当然 TiC を含む S 級のものをも考えに入れねばならないわけで、ここにこれらと比較して見た。この図は超硬 G1, S1 および S2 の 3 種類の電極に対する試料の増量の状態を最初の  $1 \text{mm/cm}^2$  と最大増量曲線とについて比較したもので、Ti 含有量の少ない S2 は G1 と S1 との丁度中間に入ることが認められる。

一般的に、S1 と G1 との大きな差異は、 $V_c=70\sim 80 \text{V}$  の辺でその最大増量が前者は著しく大きく、後者は著しく小さいことであつて、このことから、S 級となつて TiC を含むことにより、火花放電の第二半波の影響を余り受けず、したがつて一般に  $V_c$  の増大にともなつてその最大増量もまた増加することが考えられる。

(2) 放電硬化層の表面状態  
 (a) 表面の外観

放電硬化層は、一発づつの火花放電による微細な噴山および噴口、さらにその直後の短絡による電極物質の移転によつて形成される表面変化層が積み重なつて生じてくるものである。したがつて、処理時間の短かい間はこ

の放電痕が未だ全面に行きわたらず、表面には未処理の面が所々に露出し、その間に噴火口状の放電痕が認められる状態となる。この素地の部分が一応肉眼的に認められなくなるのは、放電条件によることはもちろんであるが、 $100\mu\text{F}$  程度の容量の場合、最小  $1\text{cm}^2$  当り  $1\sim 2\text{mn}$  位は必要なようである。

この表面層が一応形成されると、試料表面はこまかい梨地状となり、さらに処理をつづければ、電極とすでに形成された表面層との間で放電がおこなわれていくこととなる。表面はやがて段々と白味を帯びたこまかい表面となつて、きれいな状態ではあるがその光沢はやや失われる。

このような状態を続けつつ試料の重量は増加し、表面層は厚くなつていくが、超硬電極の場合、前述のごとく増量にはある極限值があり、それを過ぎるとむしろ減量する傾向がある。この状態になると、肉眼的にもその表面は荒れてきて、色も多少黒ずんで酸化の様子を示したり (S級)、あるいは表面層がきわめて微細な片状となつて剝離してくる (G級) のが認められる。

次に示す表面粗さにおいてもわかるごとく、大体において肉眼的に表面が一番こまかく一様に見える辺の所が重量的にも相当大きな増量を示す点になるものと考えられ、実際に作業を進める上での一つの指針となるようである。

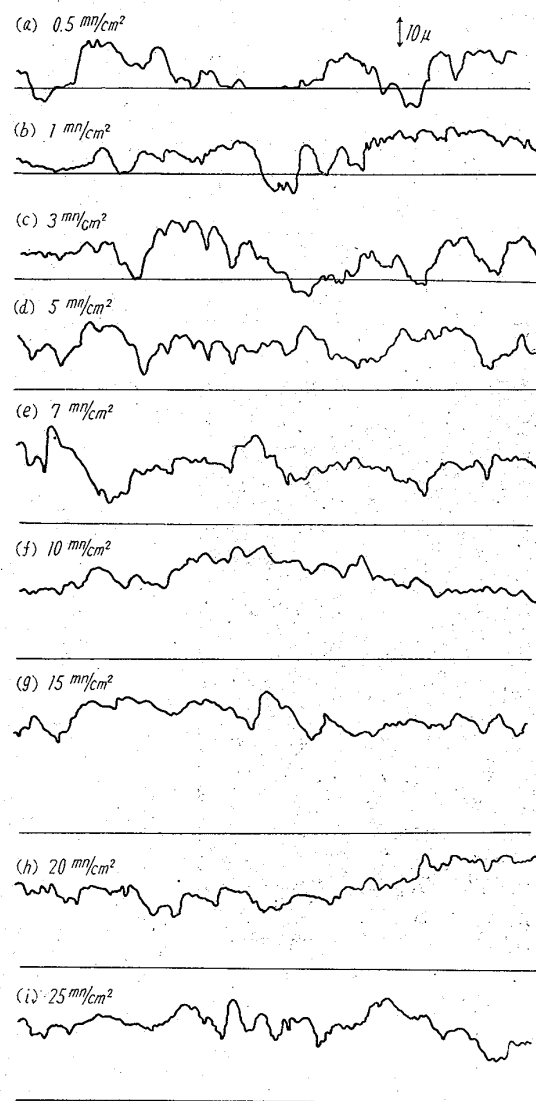
#### (b) 表面粗さ

上記各段階における試料の表面粗さを触針法によつて測定した結果は第 18 図のごとくなる。

電極は超硬 G1,  $C=72\mu\text{F}$ ,  $V_c=75\text{V}$  である。なお図の各々に示す水平の直線は処理前の試料の表面の位置を示している。

同図 a) を見るに、この曲線の中央部に、基準面と殆んど一致する部分が存在する。この処理時間は  $0.5\text{mn}/\text{cm}^2$  であるから、肉眼的にも放電痕が全面にいき亘つていないで、表面には斑点状に見える痕が存在しているがこの曲線からもこの部分が未だ放電を受けていない部分であることがはつきりと認められる。この曲線の左右の部分はすでに放電を受けている部分で、放電点はえぐられて陥没するとともに、その付近に放電と短絡によつて移転した物質が山状となつて存在するのが認められる。この場合突起部は最大  $15\mu$  位、陥没部は  $4\sim 5\mu$  位の起伏を示している。

$1\text{mn}/\text{cm}^2$  位になると、試料表面は大体において硬化層で覆われてくる。一般に火花放電は突起部に対して起りやすいと考えられるから、一旦生じた突起部は次の機会には放電点となりやすく、突起部は削られて周囲の低



第18図 表面粗さ曲線の一例

部へ飛散していく。かくして時間とともに表面層は形成されて厚くなつていくが、表面粗さは初期のころとほとんど変わらない程度である。

g) の  $15\text{mn}/\text{cm}^2$  で試料の増量は最大に達している。このとき表面層の隆起高さは最大  $48\mu$ 、最小  $33\mu$  位で平均して約  $37\sim 38\mu$  位の比較的なだらかな層である。さらに処理を続けると今度は表面の剝離が起つてきて、試料の重量は減少を示し、表面も荒れてくる。

このように試料の増量が最大となつた所で比較的表面の粗さがよくなることはきわめて都合のよい点であるが、一般に放電硬化によつて生じた表面は、その突起部の頂上は丸くなだらかで、かえつて凹部の方が鋭い感じとなる。

とにかく、これらの表面粗さ曲線で最も著しい点は、最大高さと最低深さとの間の距離が処理時間によつてあまり変化しない点である。この大きさは結局放電エネルギー



ギーによつて定まるものと考えられ、電気容量および放電電圧の増大につれて大きくなる。

したがつて、ある程度以上の平滑さを要求される場合は、大条件で処理した表面を研磨するか、あるいはもつと小さな放電条件で仕上処理をしてやれば、相当に良好な表面を得ることが可能である。

(3) 放電硬化層の断面状態

(a) 断面組織と硬度分布

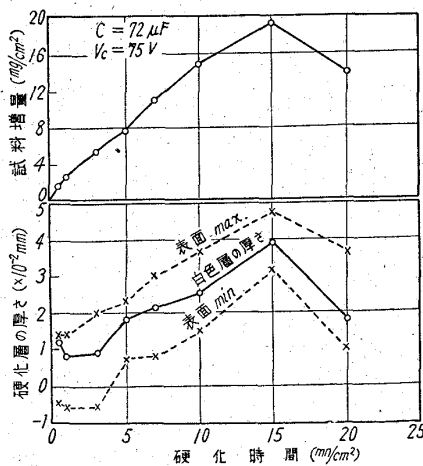
前にも述べたごとく、放電硬化層は白色層および熱変化層から成つてい

る。白色層は酸に腐食されず、ヴィツカース硬度1500にも達するきわめて硬い層である。通常のピクリン酸あるいは硝酸によつては侵されず、顕微鏡下で白色に輝いて見える所からつけられた名前である。しかし、これを苛性ソーダ水溶液中で電解的に腐食す



第19図 白色層の組織

(NaOH 電解)  $\times 1000(4/5)$  ると侵されて、表面に対してほぼ平行の片状をなした組織が認められる。第19図の写真はこの組織を示したものであつて、個々の結晶粒は極めて微細なものと考えられ、顕微鏡的にはその本質が何であるかを認め難い。



第20図 試料増量と白色層の厚さ

が知られることがわかる。ごく大まかに見て、超硬電極の場合、試料の重量増加  $1\text{mg}/\text{cm}^2$  によつて厚さ  $2\mu$  程度の硬化層が得られることがわかる。また、この図中に示す表面層の max. および min とは、前記触針検査法による表面粗

この白色層の厚さと試料の重量増加量との関係を示すれば、第20図のごとくならず、ほぼ比例的な関係を示していることが認められ、この点からも、試料の重量変化の測定によつて大体の表面硬化層生成の状況

の検査結果から、その山および谷の部分の、もとの試料表面に対する高さを大体とつたものであつて、実際の表面の粗さは、この両曲線の間の距離が目安となるものである。そしてこの粗さが同一のCおよびVcに対しては、硬化時間を変化しても余り変わらないことは前記の通りである。この白色層は  $1100^\circ\text{C}$  位までの焼戻によつて顕微鏡的にも、また硬度の上からもほとんど変化は認められない。X線的な変化については後述する。

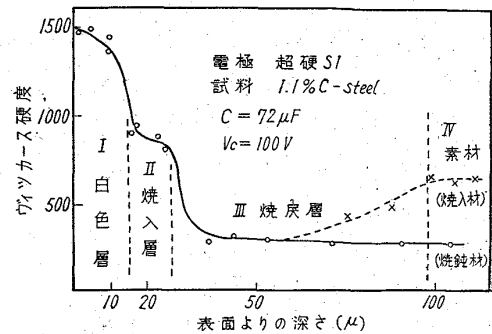
白色層の下部は熱変化層である。火花放電が起ると、その火花の起るきわめて小さな範囲は急激に非常に高温にさらされ、次で火花放電の消滅とともに、その周囲の冷たい部分によつて急激に冷却される。その結果、鋼は焼入された状態を示す。この層は大体マルテンサイト的なものと考えられ、その厚さはCおよびVc、すなわち放電エネルギーによつて決定され、ある一定時間を経過した後はC、Vcによつて定まるある一定の値に落ち着く。(勿論、試料のC%が異なればその厚さは大きく変化する。)

第21図はこの硬度分布の一例を示すものである。この中の焼戻層とは、放電の影響で加熱はされるが、焼入の温度までは達しない部分で、広義の熱変化層に属するものと考えられる。この部分の深さは、予め焼入れておいた試料を放電硬化することにより確かめられる。

この熱変化層を焼戻して行くと、大体通常の焼戻過程をたどる。

(4) 放電硬化層の本質

放電硬化法においては、火花放電にさいし、両極は非常に高温と高圧下にさらされ、かかる状態に瞬間的に急熱されて熔融したごく微量の極物質は、ついで起る短絡によつて試料表面に移転することとなる。このさいの加熱はきわめて急激かつ短時間であるため、ほとんど周囲の部分に対して断熱的に近いと考えられ、そのため加熱された部分は周囲から急冷されることとなる。かかる高温に急熱急冷されることは他の手段によつてはほとんど不可能に近いと考えられ、したがつて表面層は特異な不



第21図 断面硬度分布

安定状態になつていて、これを適当な温度に再加熱することによつて安定状態に変化していくことが期待される。

#### (a) G系超硬電極による放電硬化層

W-C系においては、独立化合物 $W_2C$ と包晶化合物WCとが存在する。 $W_2C$ は軸比 $1.57 \sim 1.58$ の稠密六方晶で、WCは軸比 $0.975$ の六方晶といわれている。G系の超硬合金はこのWC(以下 $\alpha$ 相と呼ぶ)を少量のCoで焼結したもので、平衡状態ではそのX線回折像は $\alpha$ 相のみを示す。

この電極を使用した際の放電硬化層は、 $\alpha$ 相とは異つた一つの稠密六方晶を示す。この相を $\epsilon$ 相と名付ける。この相の格子常数は( $a = 2.98 \text{ \AA}$ ,  $c = 4.74 \text{ \AA}$ ,  $c/a = 1.59$ )と概算され、これは $W_2C$ ときわめてよく似た結晶構造である。

この不安定な稠密六方晶 $\epsilon$ を $700 \sim 900^\circ\text{C}$ に加熱すると、次第に炭化物WCの安定状態である $\alpha$ 相に変化していくことが認められる。この変化の過程において、ある新しい相が出現することが認められ、この新しい中間相は全体が $\alpha$ 相に変化し終ると消失する。この新相の詳細は現在のところ不明である。

硬度および顕微鏡組織からは、これらの変化を認めることはできない。

#### (b) S系超硬電極による放電硬化層

WCのほかにTiCを含んでいるS系の超硬合金においては、TiCは多量のWCを固溶し、広範囲にわたつて面心立方晶の固溶体 $\gamma$ 相を作る。WC( $\alpha$ 相)にはTiCは固溶せず、 $\alpha + \gamma$ の二相が存在するようになる。

使用した電極S1は大體 $13 \sim 14\%$  TiCを含むものと考えられ、平衡状態において二相共存の状態を示す。これを用いて放電硬化をおこなうと、その硬化層は $\alpha$ を過飽和に固溶した $\gamma$ 相となり、これを焼戻すと $700^\circ\text{C}$ 位から過飽和の $\alpha$ を析出し始める。この析出は $900^\circ\text{C}$ 位で大體完了し、 $\alpha + \gamma$ の二相共存状態を示す。

### IV. その他の各種電極による放電硬化

代表的電極としての超硬合金に関して検討した結果は前記のごとくであるが、以下にそのほかの各種電極を使用した場合をまとめて記す。ここに使用した電極は、ステライト、高炭素鋼、高速度鋼、鑄鉄、炭素棒、およびフェロクロムである。

#### (1) 試料の重量変化と表面状態

##### (a) ステライト電極

ステライト電極によつて鋼の表面を放電硬化することは、超硬合金を電極とする場合よりも、その作業を順調

に進めることも、また厚い、良好な表面を得ることも遙かに困難である。

一般に容量Cおよび放電電圧 $V_c$ の小さい時は、最初の短時間においてわずかな重量増加を示すが、その後時間の経過とともに試料は減量を示し、やがてもとの重量よりも減少するにいたる。このような状態になつても表面に硬化層は認められ、その厚さはCおよび $V_c$ にはあまり関係なく、最大で $20 \mu$ 以下程度である。

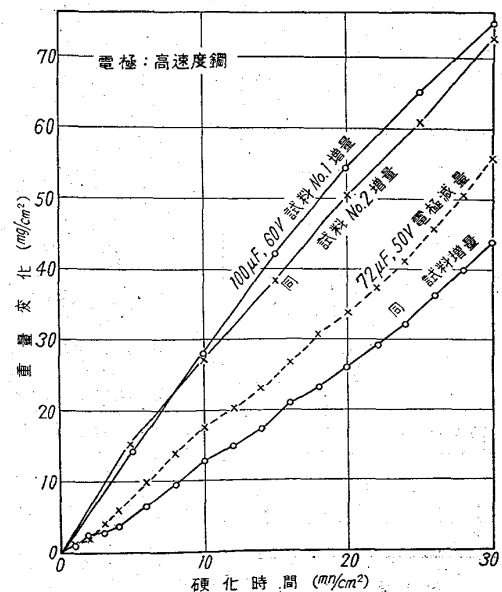
Cと $V_c$ とを大きくしていくと、電極と試料との間に融着が起り、そのため作業の順調な進行は困難となる。このような場合、試料の重量は著しく増加するが、その表面は荒れてきて、しかも作業結果も不安定となる。

したがつて全般的に見て、ステライトは放電硬化用電極としてはあまり適当でないと考えられるので、今後の検討から除外することとする。

##### (b) 高炭素鋼および高速度鋼電極

この両者は似た点が多いので、一緒に検討する。これら両者共、硬化時間とともに試料の重量は直線的に増加する。その高速度鋼の場合の一例を第22図に示す。この図において、 $72 \mu\text{F}$   $50\text{V}$ の場合は電極側の減量をも同時に示す。この両曲線の差が、硬化の際における両極の消耗量の和に当る。また $100 \mu\text{F}$   $60\text{V}$ の場合は二つの例を示してある。これからもわかるごとく、各実験値間の誤差は少いもので、熟練した作業者によるか、あるいは自動的な硬化法によるならば、一応の試験で大體の傾向を察知し得る。

これら両種の電極においては、硬化時間を長くすればそれだけ厚い硬化層を得ることが可能と考えられる。そ



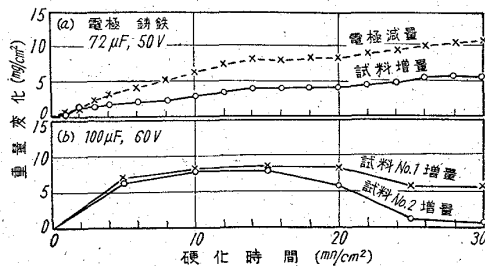
第22図 硬化時間と重量変化

して、試料の表面状態は平滑な面となり、十分にそのまままで实用し得る。しかし、あまりに長時間の作業をおこなうときはその表面の所々に突起部が発生してきて、やがて表面は必づしも良好とはいえなくなってくる。そしてこの点で作業時間に限界が考えられる。この突起部の発生は偶発的なものと考えられるが、一旦発生すると、放電は突起部において起りやすくなり、益々その高さを増加していくこととなる。この発生は作業を自動化することによりある程度防ぎ得る。

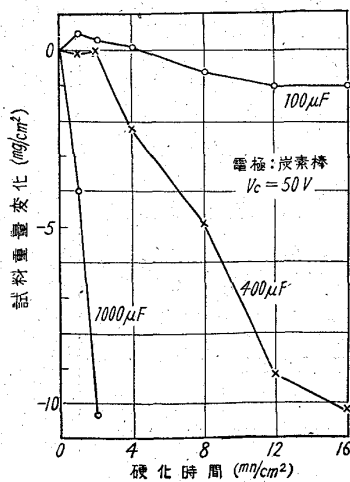
(c) 鋳鉄および炭素棒電極

C 3% 程度の普通鋳鉄を電極とした場合は第 23 図に示すごととき重量変化をする。ここに示すごととき放電条件の場合、試料表面はきわめて平滑で、十分にそのまままで实用に供し得るが、試料の増量はきわめて僅かでも限界があり、したがって表面層の厚さも薄い。放電条件をもつと大きくすれば、この限界値は相当に大きくなり得るが、前項の場合と同様な突起部が発生してくる。ただしこの場合、高炭素鋼などの場合よりも放電条件をかなり大きくしなければ発生してこない。

炭素棒を電極とした場合、第 24 図に示すごとく、試料はほとんど増量を示さないのみか、むしろ大きく減量を示す。しかしながら、後記のごとく、これらの場合も表面の硬化層は形成されている。鋳鉄と炭素との電極の



第23図 硬化時間と重量変化



第24図 硬化時間と重量変化

場合は、これまでのごとく電極それ自体が硬質のもので、その硬質合金による表面の被覆を目的としているのと異つて、これ等両者は軟質でそれを電極とすることによつて滲炭効果を狙っているものであり、その目的は達せられているようである。したがって、

特に炭素電極の場合、これまでのごとき試料の重量変化の測定は、生成される表面層の厚さに対して直接の参考とはならない。しかしある作業条件に対して重量変化と表面層の厚さとを一応測定しておけば、以後は重量変化が一応の目安とはなり得る。

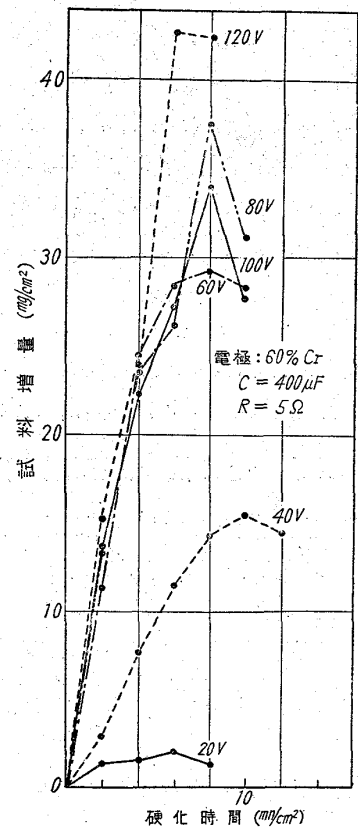
(d) フェロクロム電極

ソ連においてもフェロクロムを電極とした場合はよく使用されているようである。この場合は、単なる被覆以外に窒化の効果を狙っており、炭素電極の場合と同様に蓄電容量は大きいものが使用されている。

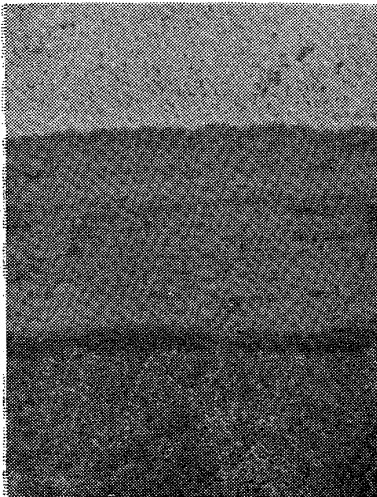
電極として Fe-Cr 二元系の各成分のものについて試験した結果、同一放電条件下において、各種電極とも重量増加値には限界があるが、その値は Cr% の小なるもの程大であり、したがって厚い硬化層を期待し得る。しかし容量 C が大になると Cr% の小さい程試料と粘着するようになって、作業は困難になってくる。Cr% の大なる場合でも容量 C を大にすればかなりの増量が得られる。これらの点を総合して、放電硬化用電極としては Cr 60% 位のものが最も適当であると考えられる。

第 25 図はこの 60% Cr の電極を使用した場合の増量曲線の一例を示したもので、 $V_c$  が 60V 以上になるとその増量は相当に大となる。これらの曲線で電圧の高い場合 ( $V_c \geq 60V$ )、初期の  $4mn/cm^2$  程度まではいず

れもほとんど同一の増量を示し、電圧による差は重量増加の面からはほとんど認められない。これは附着傾向の増加と同時に破壊傾向も増加するためと考えられ、事実高電圧となるにしたがって試料表面の凹凸が著しくなり、かつ酸化して表面は黒色となってくる。したがってかかる状態は实用に適したのではなく、その点から 60V ( $C = 400 \mu F$ ) が推奨される。この場合試料の表面は最後まできれいな光沢を有



第25図 硬化時間と試料増量



第26図 断面組織  
電極高炭素鋼 ×300 (4/5)

し、かつ重量の増加も約  $30\text{mg}/\text{cm}^2$  に達し、 $0.1\text{mm}$  程度に達する厚い表面硬化層を有するものとなる。なお、 $C=100\mu\text{F}$  においては  $80\text{V}$  程度の放電電圧が同様の意味で推奨される。

(2) 断面組織  
放電硬化作業の結果得られる硬化層の断面組織中、主要なものを示すと次のごとくである。

第 26 図は高炭素鋼電極の場合の断面組織で、最上部は試料の縁辺部のダレを防ぐため使用した銅板，中央部が硬化層である。高速度鋼の場合もこれと同様な組織を示す。これらの場合，その表面層は便宜上白色層と呼ば

れるが，実際は酸に侵されること写真に見るごとくである。

第 27 図は炭素電極による硬化層を示したもので，層の状態をはつきりと示すためにアーク放電を加えた場合の写真をも示してあるが，本質的には火花放電の場合も変わらない。同図 (a) は熱変化層まで加えた硬化層全体を示している。これの白色層の部分をよく観察するために強く腐食して拡大したものが (b) で，白色層の部分が木の葉状の組織をしているのが微かに認められる。

(c) はピクリン酸ソーダで煮沸してさらに拡大したもので，上記葉状組織がはつきりと認められる。中央部は白色層と熱変化層との境界部である。(d) は (c) の白色層の部分を  $800^\circ\text{C}$  に焼戻したものであつて，葉状部の形がくずれて，周辺部が地へ拡散した形を示している。検討の結果，この白い葉状部はセメントタイトで，この部分は過共晶白鉄の形をなしているものと考えられ，この層と焼入層のマルテンサイト部との中間は亜共晶白鉄組織と考えられる。

第 28 図は  $60\% \text{Cr}$  のフェロクロムを電極とした場合の断面で，参考のため硬度測定痕を入れてある。

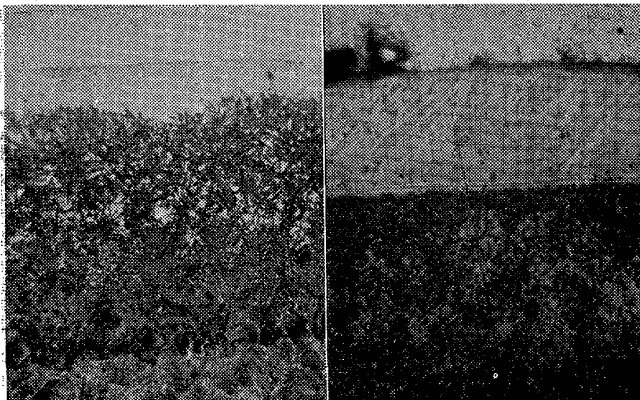
これらの断面硬度分布は超硬電極の場合にしめたものと大体おなじ傾向を有し，表面層は高い硬度を有してその厚さは大体において重量変化から測定でき，熱変化層の厚さは放電条件と試料の熱処理特性とによつて定まつてくる。表面層の硬度値については下記を参照されたい。

(3) 硬化層の焼戻硬度  
これまで述べてきたとき硬化層の硬度が，その後の加熱によつてどのような変化をするかということは，耐摩耗性の点から見ても重要な問題である。

これら硬化層は結局非常な速度で急冷された焼入層と考えられるので，これを加熱，すなわち焼戻した時の変化は知る必要がある。

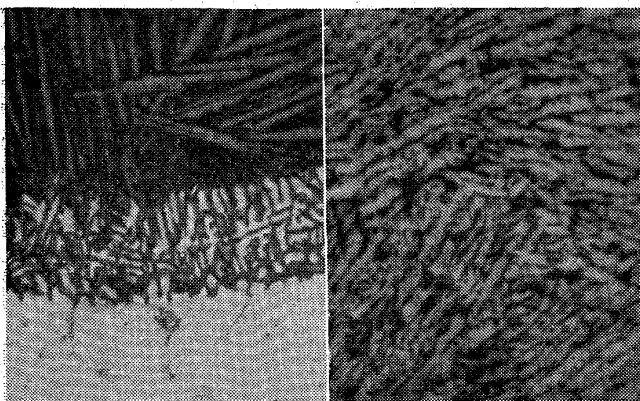
第 29 図～第 33 図はこれまでにあげた各種電極を用いた際の表面硬度の焼戻しによる変化を示す。

第 29 図は高炭素鋼電極フェロクロム ×300(4/5)



(a) ×320 (2/3)

(b) ×650 (2/3)



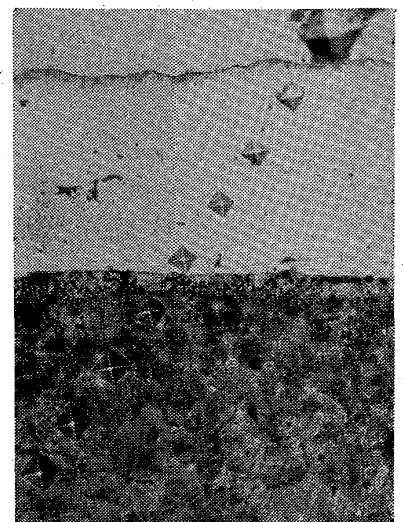
(c) ×1400 (2/3)

(d) ×1400 (2/3)

(ピクリン酸ソーダ)

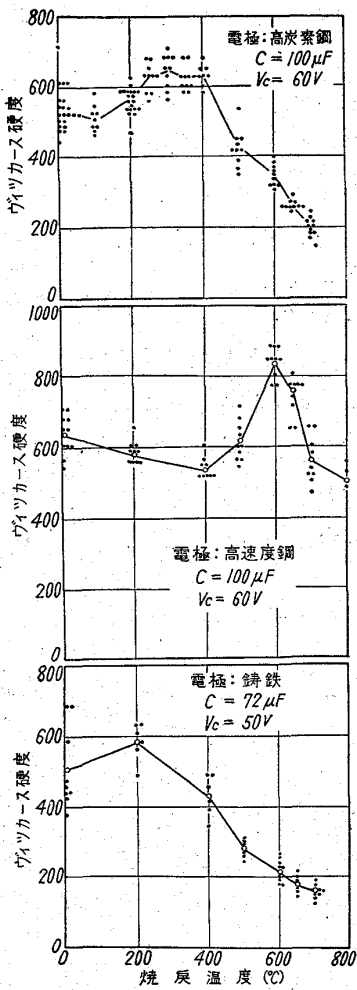
(ピクリン酸ソーダ)

第27図 炭素電極による硬化層

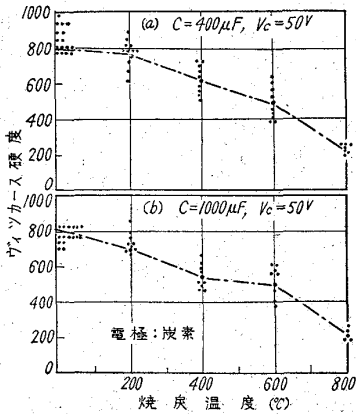


第28図 断面組織

第 29 図は高炭素鋼電極フェロクロム ×300(4/5)



(上) 第29図 焼戻硬度変化  
(中) 第30図 焼戻硬度変化  
(下) 第31図 焼戻硬度変化



第32図 焼戻硬度変化

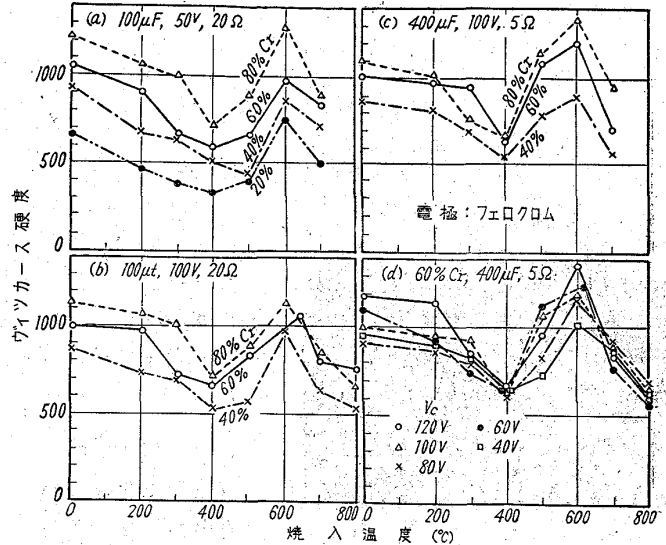
V. 実用上の問題点

以上、われわれの実験室的なデータから放電硬化法について述べてきたが、実際に機械類の硬化をおこなう場合には、相当に大きなもののできるだけ短時間で硬化することが必要である。

第 30 図は高速度鋼の場合で、何れも普通のこれらの材料の焼戻曲線と全く同じような変化を示している。ただ第 29 図の場合、残留オーステナイトのマルテンサイト化による硬化が普通の時よりやや高めに、約 300°C に最高硬度を示している。第 30 図では 600°C 付近に明らかな二次硬化が見られる。これらのことから、炭素鋼の場合 300°C、高速度鋼では 600°C に焼戻してから使用することも考えられる。

第 31 図の鋳鉄電極および第 32 図の炭素電極の場合は特にとり上げる程のものはないようである。

第 33 図はフェロクロム電極の場合で、これも 600°C 付近に非常に大きな二次硬化を示している。電極中のクロムの量の多い程表面硬度も焼戻硬度も高くなっている。これらの点と、得られる層の厚さの点とから考えて大体 60%Cr 程度のもが電極として最も適当ではないかと考えられる。



第33図 焼戻硬度変化

硬化速度を増すために考えられる一つの手段は、パイプレーターの周波数を上げてやることで、これは硬化速度を直線的に上げることとなる。現在の所 400 位まで周波数を上げて試みたが、同一回路条件ならば硬化速度をそれだけ上げ得るし、また回路条件を小さくしてもそれほど長時間を要しないで非常にきれいな表面を得ることが可能である。ただ、あまりこの周波数を高くすると、回路条件および電極の種類によつては、連続的なアーク放電に移行する場合があります、場合によつてはこのアークが非常に表面状態を損することがあるので、その点には十分に留意しなければならない。

もう一つの手段としては、電極を何本か同時に使用する多極式の採用である。パイプレーターに数本の電極を取付け、それぞれに蓄電器を結線しておこなう。もちろん、装置の容量はそれだけ増大するが、この方法はむしろ最も安全確実な方法として実用化し得るのではないかと考える。

VI. 実 用 例

ソ連においてはすでにいろいろな実用例が文献に見られる。それらの主なものを次に列挙する<sup>8)</sup>。

(1) 貨物用蒸気機関車の車輪のタイヤの最も痛みやすい所に対して、フェロクロムで硬化したものは、しないものの 2~3 倍の走行距離を可能にする。

(2) 機関車の火室から出るガスを吸い出すファンブレード (280~300°C で使用) をフェロクロムで硬化し、走行距離を非硬化のもの約 2.5 倍に当る 80,000 km にし得た。

(3) フェロクロムによる硬化により、炭素鋼, Mn-Ti 可鍛鋳鉄, Cr 鋳鉄で作られたショットブラスト装

置のローターブレードは4~5倍の寿命を保ち、またタービンブレードは650~750°Cのガスコロージョンの条件下で一年以上使用して、著しい腐食を起さなかつた。すなわち、数倍の耐熱性を示した。

(4) 大型超硬旋盤バイト用高速度鋼製チップブレードをフェロクロムで硬化した所、耐摩耗性は5~6倍に達した。

(5) 熱間圧延ロールをフェロクロムで硬化し、1.5~2倍の寿命を得た。

以上は何れもイワノフ<sup>4)</sup>の報告にあるもので、フェロクロムを電極としたものである。

(6) 重条件で使用されるカムを超硬電極で硬化した後、砥石かエメリー紙を用いて手でラップしたものは、実用試験後ほとんど全部がマイクロメーターの精度内で完全にはじめの寸法を維持した。これに対し、硬化しないものは平均0.17mm、最大0.32mmの摩耗を示した。しかも硬化層は必要に応じて再生し得るから、これら部品の使用期限は何倍にも伸ばすことが可能となる<sup>5)</sup>。

この他キチュキン<sup>6)</sup>は火花放電による表面硬化の後、回路から蓄電器を取り外し、試料面にアーク放電を与える組合せ硬化法を推奨し、その例として、

(7) クロム鋼製の、煉瓦プレスの型込み板を硬化して、従来の滲炭による板の50万~100万個に対し、修理なしで400万~500万個の煉瓦製造を可能にした。

(8) ポンプドレッチャーの強力ポンプの羽根の硬化により、その耐摩耗を2.5倍にまで高め得た。

以上がソ連の文献に見られる実用例である。わが国においてはまだほとんど実際に応用されておらず、われわれの知っている範囲ではつぎのごときものがあるに過ぎない。

(9) われわれの教室では木工用丸鋸の刃に放電硬化して実際に使用した結果は非常に良好であつた。すなわ

ち、実動9時間位で研ぎ直しをおこなつていた丸鋸の刃に超硬合金で放電硬化したところ、研ぎ直しまでの時間が100時間以上に延びた。

(10) ジャパックスが放電硬化法を応用したものの一つに、ジャパックス・グリッドがある。これは特殊加工法によつて鋼の円板に多数の突起をつくり、その先端に火花放電で超硬合金などをつけた歯のない丸鋸で、合成樹脂等の切断に、その寿命は10倍あるいはそれ以上になるといふ。

(11) 銀行券1000枚束の廃棄に当り、焼却に先立つてそれに穿孔するドリルの外面を超硬合金で硬化したところ、通常の調質した工具鋼、窒化鋼、あるいは硬質クロムメッキしたものなどに比して、はるかにすぐれた耐久性を示した。

## VII. 結 言

放電硬化法に関する研究はまだ日も浅く、ことにわが国ではほとんど研究もおこなわれていないが、耐摩耗性あるいは耐侵食性を必要とする部分には有効な表面硬化法であることは明らかである。今後はいかにこれを実際に応用するか、いかにして目的にかなつた電極材料と硬化条件を選択するかが問題となる点であろう。

## 文 献

- 1) 鳳誠三郎, 倉藤尚雄: 「放電加工」改訂版. コロナ社 (1961)
- 2) 鈴木正敏: 千葉大学工学部研究報告, 12 (1961) 21, p. 57~197
- 3) 井上 潔「ソ連における放電硬化」機械と工具, 4月~9月号 (1958)
- 4) ゲ・ペ・イワノフ: ベストニークマシノストロエニヤ (1954) No.10 および マシギズ (1957)
- 5) ア・ヴェ・ポリヤチェンコ: ベストニーク マシノストロエニヤ (1954) No.7
- 6) イ・イ・キチュキン: 同 上 (1954) No.5