

アルミニウム合金の點熔接

—低成本高スピード

—金屬接合法—

澤井善三郎(電気)

カットはアルミ合金 52S
に點熔接をおこなつた表面

I 緒言

金属材料を利用する場合、これを目的にかなつた形にするためには、切削、變形、接合のやうないわゆる金屬加工を必要とするもので、材料の進歩と相まつて、これら加工技術が發達することにより、金属材料の利用の道がひられて來たのである。更に文化の進展につれて、同じ形の製品を如何にして少い資材で、均一に、しかも安くはやく作るかが重要な問題となつた。この意味から板金加工を行うプレスと、これを組立てる熔接とが大きくクローズアップされて來たのである。然しこれらの技術は從來の工學上の分類からみると、冶金、電気、機械材料力學等の各分野に關係しているため、わが國では専門の研究者が少く、實際方面の要求に對し、研究がとかくおくれがちであつた。

アルミニウム合金の點熔接は飛行機の製作に利用されたため戦時中非常に急激に實施に移され、これに刺戟されて研究も、銅板の點熔接よりはるかに進歩したのである。戦後は實際方面からの刺戟がなくなつたが、理論的な面でも程度的發展がみられた。このようにしてアルミニウム合金の點熔接は、終戦後現在に到るまで殆ど利用されていないが、需要があればこれに應じうよう技術がほぼ準備されているといえるのである。

II 點熔接の利點

金屬板の接合にはビス止め、銲接、鋸接及び熔接が用いられているが、點熔接は銲接と比較して論ぜられるのが普通である。今點熔接の利點を挙げると次の通りである。

1. 板接續の簡易化 銲接では孔あけ、銲の挿入及び

銲打ちの3工程を要するのが、熔接では1工程となる。

2. 費用の低減 銲接を點熔接に變えると、工數の減少銲管理の不要等により著しく費用が低減される。1點當りの經費を比較すると、普通の點熔接で銲の10分の1程度、ローラー電極では數十分の一以下にできる。

3. 生産速度の増加 點熔接は工數が少いので當然生産速度の増加が可能である。熔接速度は取扱う品物の種類によつて大きな差があるが、連続作業中には1分間數十點、ローラー電極では1分間數百點にも及ぶものである。但し、一般に熔接前に表面處理を要する上に、品物の取換、電極端の研磨等に時間を要するので、實際には上の數は相當に割引され、所要時間は銲接の1/2~1/10である。

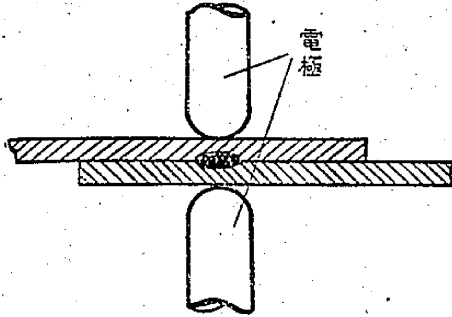
4. 重量の輕減 銲接では銲の頭部が板よりも餘分な重量となるので、それだけ重くなるが、點熔接では特に重量の増す原因がない。又1點當りの強度が銲以上となるような熔接はさほど困難でなく、かつ點熔接では銲のようにピッチの制限を受けないから、非常に効率のすぐれた接手が得られる。従つて板厚を小にしたり、接手の重ねを少くする等間接に資材並びに重量を輕減することもできるのである。

5. 表面の平滑性 一般に點熔接を行つた後には僅かに凹みを生ずるものである。然し片面だけならば、實際上殆ど平滑に保つことは容易である。又上下兩面共突起を生じないことは、場合により非常に重要な役割を果すものである。

その他熔接を行えば騒音を發せぬこと、電氣的接觸が完全になること、點熔接の連続した形である縫合熔接により接手に耐密性を持たせうること等の利點を有している。

III 原理と特徴

點熔接は抵抗熔接の一種で、第1圖のように熔接すべき金属板を重ね合せ、これを電極ではさんで加圧しておき、ここに強大な電流を通ずるのである。この際熔接が如何にして進行して行くかは、後に少しくわしく述べることとし、ここには簡単に熔接の行われる経過を示しておく。



第1圖

電流が流れはじめると、板と板との間に存在する接觸抵抗のため、接觸部は急激に温度が上昇し、間もなく軟化する。接觸部には電極によつて圧力が加わっているから、この部分は直ちに變形をはじめ、接觸抵抗は次第に消滅して行く。然し最初の發熱により接觸部の温度は高く、従つて比抵抗が大きくなつてゐるので、その後も發熱の割合は大きく、板の内部の發熱も手傳つて、接觸部を中心として更に温度が上り、熔融するに到る。電流を停止すると、熱は電極並びに周囲の金属に傳導し、壓力の下で熔接部は一體となつて固化し熔接を終るのである。

この場合電極と板との間にも接觸抵抗があつて發熱するが、電極は電気及び熱の傳導度の大きい銅又はその合金で作られているので、温度は餘り上昇せず、良好な熔接では板の表面は熔接後熱影響を認められないのである。

ここでアルミニウム合金の點熔接に對する性質を考えてみよう。先ず鐵鋼に比して熔點點 (650°C 程度) が低いことは熔接を容易にすることである。特に高温において硬度が低いので、電極端を損傷せず、一定の状態に保ち易いという長所がある。然し高温で硬度が低いということは、同時に接觸抵抗を失い易いということになるわけで、熔接電流が小に過ぎると、接觸部が十分に高温にならぬ中に接觸抵抗が消滅してしまう。アルミニウム合金はもともと電気抵抗小さく、又熱傳導のよい材料であるから、接觸抵抗を失うとその後の發熱で温度を十分に上げることは困難である。

そこでアルミニウム合金の點熔接には、必然的に短時間大電流を通じ、接觸抵抗を十分に利用することが要求されることになるのである。

IV 點熔接装置

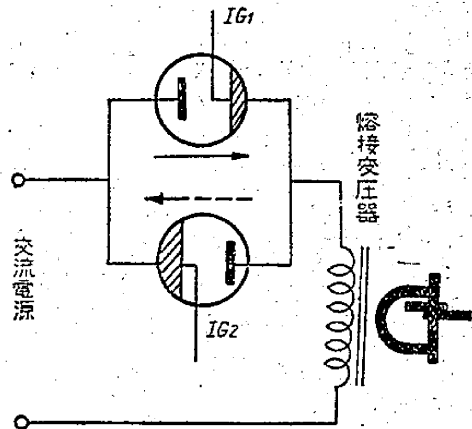
1. 放電管による電流の開閉 熔接装置としては交流電源から 1~10 サイクルだけ、10,000~30,000 A の大

電流を取出すことが先ず問題となる。

實際上に熔接部に電流を通ずるためには、熔接回路のインピーダンスに對して所要の電流を流すだけの無負荷電圧が必要である。普通の熔接機ではこの電圧は 5~15 V 程度であるから、一般に熔接機には熔接變壓器と稱する 2 次巻數 1 又は 2 の遮降變壓器を備えている。これにより熔接電流に對して電源側の電流は相當に小さくすることができ、一次電圧を 400 V とすれば、一次電流は數百、1,000 A となる。

この程度度の電流は電磁開閉器で開閉することも不可能ではないが、普通の開閉操作とことなり、點熔接の場合のように 1 分間に何回というように開閉を行つたのでは、接點の損傷に耐えられない。又毎回の閉路の瞬間が電圧波に對して同じ位相にあるというわけにはいかないから電流波形が一定にならないという大きな缺點がある。

そこで元來整流器である放電管を用いて交流を制御する方法が用いられるようになった。第2圖のように 2 箇の放電管を逆並列に接続し、これを交互に動作させて熔接變壓器の 1 次巻線に交流を通ずるのである。放電管は



第2圖

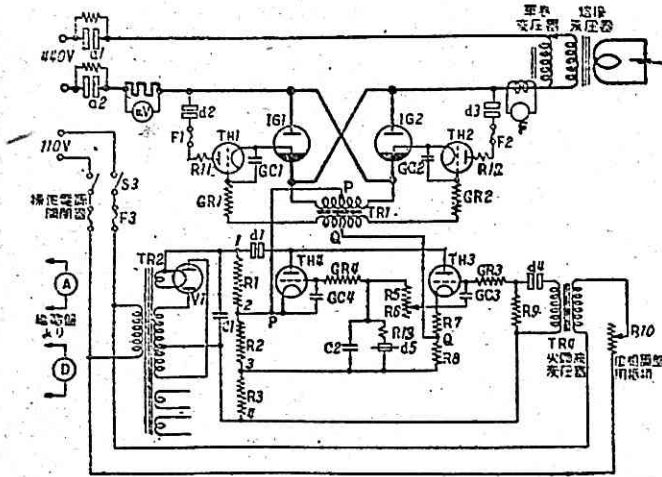
交流の半波が終れば、自然にその放電を停止するから、電流値が放電管の規格以内ならば何等心配がない。半波を單位として所要の回數だけ放電管を動作させれば、目的を達することができるわけである。アルミニウム合金の點熔接では電流が大きいから、主放電管は水銀溜陰極のイグニトロン又はセンザイトロンを用いる場合が多い。

2. 制御回路の實例 放電管制御の交流點熔接装置は工業に對する電子管應用の代表的な例で、様々な工夫が施されている。第3圖に示したのはよく用いられた制御装置の結線圖である。

圖において IG 1 及び IG 2 は主放電管たるイグニトロンを示し、TH 1 及び TH 2 は各半波の最初にイグナイターに電流を通じ、IG 1 及び IG 2 を動作させるサイラトロンである。圖のような結線では、サイラトロン TH 3 が放電を開始してから、TH 4 が放電を開始する

までが溶接電流通過時間になるのであつて、この時間は抵抗 R6 によりコンデンサ C2 の充電時定数を變化させることによつて調整することができる。実際には開閉

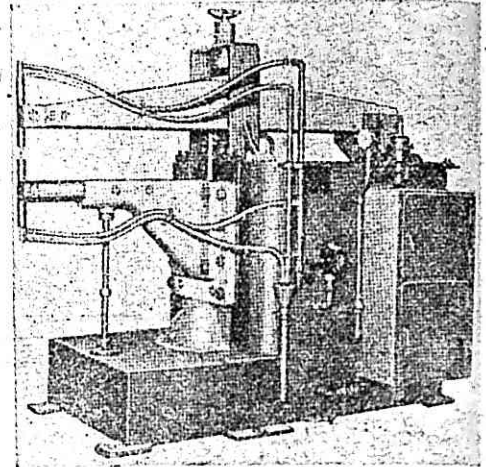
電極加壓力は數百 kg に及び、又溶接には溶接電流によつて大きい電磁的機械力が加わるから、溶接部附近の



第3圖
點熔接制御回路

器 S3 及び接點 d1, d2, d3 を豫め閉じておき、加壓装置により加壓力が適當になつた時接點 d4 を閉じて通電を開始するのである。なお、接點 d5 は平常閉じられているが、溶接時には開かれるのである。

3. 溶接機本體 溶接變壓器、二次導體及び溶接用電極は通常電極加壓装置と共に溶接機の本體をなしているアルミニウム合金の點溶接機では殆どすべて空氣壓による加壓装置を用いているが、加壓機構により第4圖のよ



第5圖

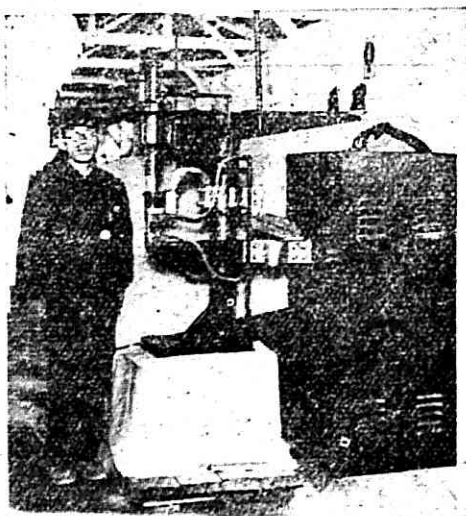
機械的強度を十分にしておかないと、溶接中に撓みやすべりを生じて、溶接物にひずみを残すことになる。然し電極附近に出張りがあると、溶接操作が不自由になるから注意を要する。

4. 電 極 電極には冷却作用が良好なこと及び硬度の高いことが要求される。これは材料の一般的性質としては矛盾した要求であるが、比較的傳導度をおとすことなく硬度を上げるため、銅と Cd その他の合金が用いられた。然し電極材料の研究は我が國では非常におくれ、又合金電極の入手も困難であり、現在では殆ど純銅が用いられている。粉末冶金の應用として今後の開拓が要望される次第である。

5. 配 電 點溶接機に對する配電の問題は、十分な理解と準備をしておかないと往々思わぬ失敗をすることがある。

一般に交流點溶接機の kVA 容量は溶接電流の自乗と2次回路のインピーダンスに比例する。従つて電流値の大小が最も大きな問題であるが、溶接部のふところ、即ち2次導體で形成する電極保持腕の長さとおきが大きくなると、2次回路のインピーダンスが大きくなり容量を増すことになる。但しこの點については設計の良否も大きな要素となつてくるのである。第4圖に示した溶接機は、腕の長さ 300 mm、腕の開き 150 mm、溶接電流 20,000 A のもので、容量は約 150 kVA、第5圖のものは腕の長さ、800 mm、腕の開き 300 mm、溶接電流 30,000 A で、容量は約 380 kVA である。但しこれはいずれも最大容量を示している。

このようにアルミニウム合金用交流點溶接機は大容量負荷であるが、電氣的に考えるとその使用率はすこぶる低く、上の例の 150 kVA のもので 3.5%、380 kVA のもので 1.5% 程度というような尖頭負荷である。従つて



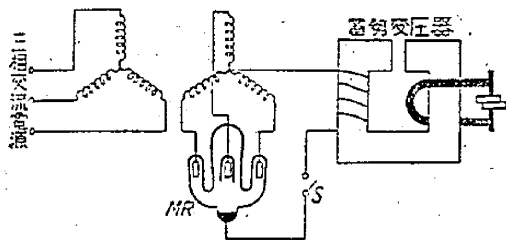
第4圖

うな直上加壓式と、第5圖のような槓桿加壓式とに分けられる。

溶接機及びその電源を考える場合、通常の電氣的負荷とことなり、熱容量は餘り問題とならないが、大電流を確かに流すため電壓変動率という點から相當大容量の變壓器及び受電設備を要するのである。一般に通電時の電壓降下 10% 以内ならば十分である。然し单相低力率の尖頭負荷であつて、配電設備が不經濟となり易いから、他の連続的な負荷と適當に組合せて使用するとよい。1/10 秒程度の電壓降下であるから、工場の他の負荷に對して問題を起すことはあまりない。

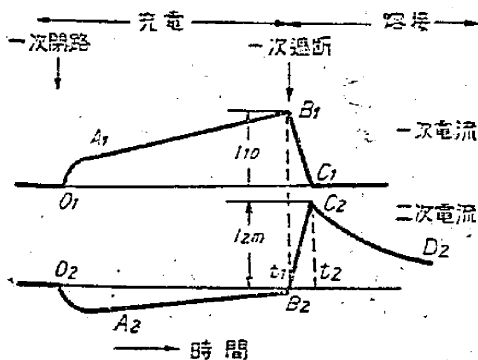
6. 低電力型點溶接機 交流點溶接機が单相低力率の尖頭負荷という缺點を持つているので、これを免れるため尖頭入力の小さい低電力型溶接機が考案されている。

電磁蓄勢式溶接機は第 6 圖のような鐵心に空隙のある蓄勢變壓器を有し、その 1 次巻線に 3 相交流を整流して



第 6 圖

得た直流を通ずるようになってゐる。開閉器を閉じると 1 次電流はインピーダンスのため第 7 圖に示すように徐々に増加し、この電流の自乗にほぼ比例した電磁エネル



第 7 圖

ギーが鐵心の主として空隙の部分に貯えられる。1 次電流が所定の値に達した時開閉器を開くと、圖の $B_1 C_1$ の如く 1 次電流は強制的に遮断され、貯えられたエネルギーにより $B_2 C_2 D_2$ のように 2 次電流、即ち溶接電流が流るのである。この方法によれば 電源入力が少く、3 相平衡負荷となり、又力率もよくなる。然し交流溶接機に比し多少大型となつて資材を要し、溶接速度が小となり、遮断器が問題となるほか、溶接電流波形が場合によつて不適當となる等の缺點がある。

溶接に必要なエネルギーを或時間をかけて蓄積する方

式では、電磁蓄勢式以外にも靜電蓄勢式、機械的蓄勢式、水冷蓄電池式等が紹介されているが、いずれも未だ廣くは用いられていない。又最近放電管を利用して溶接電流の周波数を 4~10 サイクルに遅減するか、又は乾式整流器により直流に変換し、溶接回路のインピーダンスの影響を少くすると共に 3 相平衡負荷として、電源の容量を減少させ取扱を容易にする方法も考案されている。

V 點溶接の實際

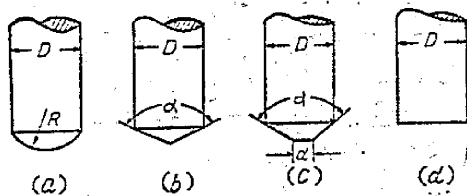
アルミニウム合金の點溶接は實際には次の作業を必要とする。

1. 板切斷並びに板加工

2. 溶接部の表面處理 溶接部並びに電極と溶接物との接觸部に存在する油、塵埃、酸化膜等はいずれの場合にも溶接に害がある。特に材料が熱處理材である時は丈夫な酸化皮膜が出来ているから、溶接前にこれを除去しておかなければならない。溶接物が小さい場合にはワイヤブラシで機械的に研磨したものが好成績であるが、大型のもの又は數多くものを扱う場合には、通常 5~10% の非酸洗滌液に短時間浸し、水洗する方法が用いられている。

3. 假組立 表面處理後治具上で假組立を行う場合は治具から取外して點溶接を終るまで、變形を防ぐため假止用ボルト、ピン、アルミニウム錐等で要所々々をとめておく。この際板の汚れや板間の夾雜物がないよう、又溶接部が隙間なくよく合うように注意すべきである。

4. 電極の成形 點溶接では溶接前に電極の成形を行う必要がある。溶接物の形に應じ、電極や電極保持部は邪魔にならぬよう適當な形を考える必要があるが、電極端の形狀としては通常第 8 圖のごときものが用いられて



第 8 圖

いる。但し (d) は片側のみに限つて用いられる。同圖 (a) の形を採用するとすれば、アルミニウム合金の場合には、R は 15~40 mm としている。

5. 溶接條件の設定 溶接電流値、通電時間及び電極加壓力を通常點溶接の 3 要素と稱し、溶接すべき板の材質、厚さ等に應じてこれらを溶接前に設定しておく。第 1 表はスーパーデュアルミンに對する適當な點溶接條件を示している。表中の剪斷強度は比較的容易に得られる値であり、普通はこれより強いものと考えてよい。

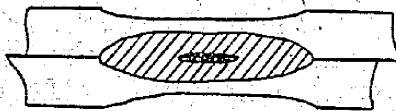
第1表 スーパージュラルミン (SDH)
の點熔接条件並びに得られる強度

板厚 mm	熔接電流 A	通電時間 サイクル	加圧力 kg	剪断強度 kg
0.4	16,000	2	100	100
0.5	17,000	3	120	125
0.6	18,000	4	150	150
0.8	19,000	5	200	200
1.0	20,000	6	250	250
1.2	21,000	7	300	300
1.4	22,000	8	350	350
1.6	23,000	9	400	400
1.8	24,000	10	450	450
2.0	25,000	10	500	500
2.5	28,000	15	600	625

VI 點熔接結果と各要素の影響

點熔接部の機械的強度試験と断面の顯微鏡検査の結果並びにこれらの結果に對し熔接条件たる各要素が如何に影響するかはかなり多くの人々によつて研究されたが、ここにはごく要約して述べておくこととする。

先ず代表的な熔接點の断面をしらべると、上下の電極に接觸する附近は組織が母材と何等變る所なく、全盛として第9圖のような形を呈する。このように金屬組織の變化を受ける部分が小範圍に限られることは、ジュラル



第9圖

ミンのような熱處理材では特に重要な条件である。熔接条件が悪く熔接部が過熱されると、第10圖のように表面まで組織の變化を受けるが、これは強度を損じ腐蝕を



第10圖

著しくするほか、電極端をもいためるので熔接作業を不圓滑にするものである。第9圖の豆形の部分の周辺は熱影響による再結晶部、その内側は中心へ向つて成長した柱状晶部、中心附近は鑄物組織と類似な自由晶部である。又自由晶部の中心部には共晶が混在している。

一般に他の条件を適當にととのえてやれば、熔接電流が大きい程熔着面積を増し、強度が大となるが、餘り電流を大きくすると、条件をととのえることが困難になり熔接時に熔融金屬の「散り」を生じ、又第10圖のようなとけ過ぎを起し易くなる。通電時間に對する熔接強度は飽和曲線を畫き、或程度以上電流を繼續しても、強度

を増さない。但し餘り通電時間が短いと、熔接部が急冷されるため龜裂を生じ易い。電極加圧力は熔接後の變形や残留應力を少くするためには小さい方がよいが、とけ過ぎや龜裂なしに強い熔接を得るためには加圧力が大きい方が結果がよい。又電極材料及び電極端の形状は熔接部の冷却状態を支配するので、大きな影響を持つている。

VII 點熔接機構に関する考察

上に述べたように熔接結果に及ぼす各要素の影響は、多くの實驗により次第に明らかにされて來たのであるが、要素としては電流、時間、加圧力のようにはつきり數値を決定できるものばかりでなく、熔接前の接觸状態、各部の抵抗電流密度、これらの熔接中の變化等適確に捕え難い要素を含んでいる。従つて従來の實驗は設定すべき熔接条件を一應決定する役目を果たしたのであるが、點熔接が如何にして進行して行くか、又これに對して熔接条件をどうすべきかという觀點からすると意外に重要な點を見落していたともいえるのである。

これに對し、熔接部が熔接前にどんな状態にあり、電流を通ずると如何に變化して行き、最後に如何にして熔接が完了されるかという熔接現象の機構がわかれば、理想的な熔接を行うためにはどうすればよいか理論的に結論されるので、研究的にも技術的にも一段の飛躍をみるわけである。この點に關しては近く「生研報告」に筆者の研究を發表するので證明その他詳細はこれに譲り、ここには點熔接機構につき簡単にふれておく。

點熔接では熔接の進行に伴つて次の5段階を經過するものと考えることができる。

第1段階 熔接電流通過前の時期で、電極により接觸部が加圧された状態である。加圧力を増して行くと接觸抵抗は次第に減少するが、一度減少した接觸抵抗は加圧力を減しても一般に増加しない性質がある。

第2段階 これは通電開始直後の時期で、接觸抵抗による發熱が、板の内部の抵抗によるものよりも非常に大きい期間である。

一體接觸抵抗といつても、これは表面の酸化皮膜による皮膜抵抗と、凹凸によつて電流の通路の有効面積が減ずるために生ずる狭流抵抗との和であつて、この兩者の發熱様式は非常にことなつていのである。狭流抵抗は熔接にせひ必要であると同時に、温度の上昇につれて加圧力のため消滅して行くので、過熱をおこすこと少く理想に近い發熱を行うものである。ところが酸化皮膜は非常にうすいにも拘らず、非常に抵抗が高いため、皮膜の部分は通電開始と共に著しく急激に温度が上昇し、たちまち熔融點に達するものと考えられる。これは通電開始後半波の10分の1即ち1/1,000秒程度の短時間で、接觸抵抗が急に大きく減少しはじめることからわかるのである。

このような短時間では板の内部は未だ温度が低く硬

も高いので、接觸部が軟化又は熔接しても加圧力が有効に作用せず、更に狹流抵抗による發熱がこれに續くので接觸部附近は過熱せられ、熔融金属が板の間から飛去り、いわゆる「散り」の現象をおこすのである。

非酸處理を施したアルミニウム合金板の表面には通常酸化皮膜が残っているので、散りが多く、熔接後断面に龜裂を生じていることが多いのである。

いづれにしても第2段階は接觸抵抗による發熱が大きいので、熔接部附近の熱傳導はほぼ接觸面から兩側に向う1次元の問題として考察することができる。

第3段階 板の内部の温度が次第に上昇して硬度が低下すると、板は電極加圧力によって變形し接觸抵抗を失うに到る。熔接部は既に温度が高く、比抵抗が2倍程度以上になつているので、接觸抵抗を失つてもなお發熱の割合は大きい。但し發熱箇所は最初よりも範圍が廣くなつている。この時期には電極と板との接觸部も既に抵抗が減少しているが、未だ電極の食い込みは不十分で、電極による冷却作用は熔接部全體に及ばず、熱は主として周囲の板に傳わつて行く。従つてこの場合は、熱傳導は2次元の問題として取扱うのが適當であろう。この状態では熔接部の温度はなお上昇し得るのである。

第4段階 熔接部が更に加熱され、電極が次第に板に食い込むと、板との接觸面積が増加し、電極による冷却作用が大ききいてくる。それでこの時期に達すると、熱傳導は3次元の問題となつてくる。冷却が3次元になると、物體の一部に一定の熱を極限して加えても、温度は或値以上には上昇せず、定常的な温度分布になつて落付くことが證明できる。従つてこの時期になると、通電を繼續しても最早熔接部の温度は上昇せず、実際にはかえつて多少低い温度に落付くようになる。

アルミニウム合金は高温における硬度が低いので、第3段階はごく短く、短時間で第4段階に達するので、通電時間を長くしても熔接強度を餘り増すことができないのである。この段階の終りに熔接部が如何なる温度分布になつているかは未だ明瞭でないが、冷却がよくきくため、熔接部は外周から柱狀晶が成長しつつあるものと考えられる。

第5段階 この期間は電流停止以後で、熔接部は電極並びに周囲の板によつて冷却され、結晶が成長して、比較的速かに固化し、熔接を終るのである。

以上の點熔接機構は理論と實驗並びに作業中に経験した多くの事實から推察したものであるが、このような機構が明らかになつていると、實際に熔接を行つて結果が悪い場合に直ちにこれに應ずるようによつて熔接條件をととのえることができるのである。

VIII 點熔接電流の波形制御

點熔接の進行して行く経過の中で、熔接結果に最も大

きな影響を與えるのは第2段階である。點熔接は接觸抵抗による發熱と電極を通じての加圧とが、數量的に又時間的に都合よく作用する所に妙味があるのであつて、この二つの組合せが不適當であると強度不足となるか又は極部的過熱のため缺陷を生ずるのである。

ところがアルミニウム合金板の點熔接では、大電流を用いること及び表面に酸化皮膜が残っていることのために、第2段階において熔接部の温度上昇が急激に過ぎ、加圧が遅れがちである。従つて接觸部附近は過熱され、散りを生じ、又熔接後の金属組織を劣化させ、龜裂を残り、熔接強度を不揃にする。

そこで熔接電流を従来用いられていた第11圖のよう



第11圖

な正弦波形とせず、第12圖のように最初小さい電流を流し、次第に電流値を大きくすると、接觸部が熔融點に



第12圖

達する時期はややくれ、その時には既に板の内部も熱傳導によつて相當に熱せられ、接觸部によく壓力が加わるようになる。板の材質、厚さ等に應じて電流波形を適當にすれば、過熱を避けて良好な熔接結果が得られ、強度の不揃も少く、熔接の信頼性を高め得るのである。このような電流の制御は板の表面處理、電極端の成形等の面倒を少なくすると共に、加圧力が少なくてすむので、壓力装置が簡單になり、又熔接後構造物に残留する歪及び應力を減少させる利點を持つている。この方法は放電管制御によつて實現できるが、未だ實際に利用されてはいない。今後の活用を希望する次第である。

IX 結 言

アルミニウム合金の點熔接は戦時中相當に發達し、又廣く實施されたもので、これは實驗、理論、裝置、應用等各方面から論ぜられなければならない。ここには概説的な意味でこれらの各方面にわたり一通り述べたが、個々の問題については説明が非常に不十分であつたことを御諒承願いたい。

今後アルミニウム並びにその合金の利用の道がますますひろかれようとしているが、構造物の組立には設計現場共點熔接について十分な理解を持ち、高度の技術を活用して生産の合理化をはかられるよう希望してやまない又その際この概説がなんらかの御参考になれば幸である

(1950. 1. 23)