

日本機械学会論文集(C編)
50巻454号(昭59-6)

アルミニウム材料の圧接条件に関する研究* (第2報, 圧接限界条件に及ぼす温度と表面処理の影響)

中村 保**, 近藤 一義**
Tamotsu NAKAMURA, Kazuyoshi KONDŌ
杉本 章***, 木原 英雄****
Akira SUGIMOTO, Hideo KIHARA

Key Words: Forming, Pressure Welding, Aluminum, Critical Welding Condition, Temperature, Surface Finish

1. ま え が き

前報⁽¹⁾では, 常温における拘束リング内での円柱端面の圧接試験によって, 接合強度に及ぼす平均面圧 \bar{p} と表面積拡大比 X の影響を検討し, 完全な接合強度を達成するための圧接限界条件式として, 比較的簡明な形の実験式を求めることができた。本報では, さらに試験温度を, 200, 300 および 400°C に変更し, 前報と同様の方法で圧接試験を行う。これにより, 温度を高めることによって圧接限界条件がどの程度改善されるかについて検討する。さらに, 接合面の表面処理方法によって, 圧接限界条件がどの程度影響されるかについても検討する。

2. 実 験 条 件

2.1 実験方法 常温の圧接試験は, 前報⁽¹⁾と同一の工具を用いて行った。一方, 200°C 以上の各温度における圧接試験は, 図1に示すように, 主要工具全体を, 万能試験機に組込んだ恒温槽(電気抵抗加熱炉, 4.3 kW, 最高温度 300°C) 内で加熱したままの状態で行った。常温の場合と同様に, 拘束リング内での円柱の端面圧接を行い, 表面積拡大比 X および平均面圧 \bar{p} を独立に変更し, それらの各条件に対応する接合強度を測定する。表面積拡大比 X の分布については, 3章に詳述する。平均面圧 \bar{p} は 98~784 MPa (10~80 kgf/mm²) の間で変更する。接合強度は, 前報と同様に, 図2に示すように, 圧接後の試験片の各半径位置から引張り小試験片を切出し, その引張強さ S_T として測

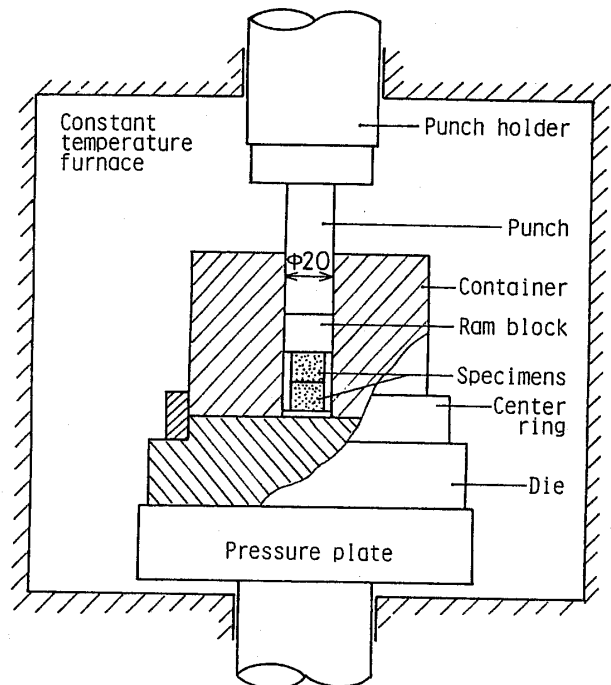
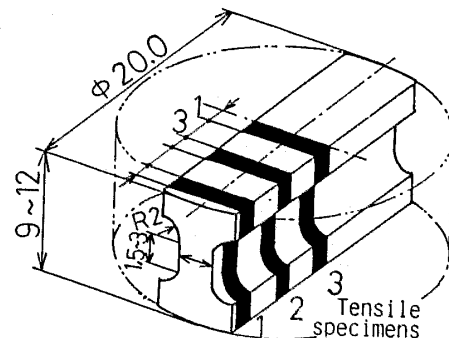


図1 圧接試験装置



Unit: mm

図2 引張り小試験片の切出し

* 昭和58年6月17日 東海支部浜松地方講演会において論文講演として講演, 原稿受付 昭和58年1月12日。

** 正員, 静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北3-5-1)。

*** 准員, 三菱電機(株)名古屋製作所 (〒461 名古屋市東区矢田南5-1-14)。

**** 学生員, 静岡大学大学院。

定する。また、完全な接合強度に達したかどうかを評価するため、継手効率 $\eta = (S_T/S_{T_0}) \times 100\%$ を用いる。ここで、 S_{T_0} は加工硬化を考慮した一体材の引張強さである。

図1に示すように拘束リング (SKD11, 硬さ $H_{RC} \approx 60$) の内径は 20 mm で一定とし、ポンチ (SKD11, 硬さ $H_{RC} \approx 60$) のくい付きを避けるため、ラムブロックを介して圧下を行う。また、材料の流出を避けるため、下面にも円板工具を装入し、拘束リングとこれらの工具のはめ合い公差を $\pm 5 \mu\text{m}$ 程度とした。上下工具の加圧面は研削仕上げで、表面あらさ $R_{\text{max}} = 2 \sim 3 \mu\text{m}$ となっている。加圧速度は低速で一定 (約 0.05 mm/s) とし、所定の面圧に達したのち、標準として約 10 秒間負荷面圧を保持した。しかし、高温の圧接では、拡散接合の影響が考えられるため、5分および30分間保持した場合についても検討した。工具面の摩擦条件は無滑潤状態 (トルエン脱脂) とし、拘束リング内面のみ二硫化モリブデン粉末にて潤滑した。

圧接試験用素材としては、前報と同様の工業用純アルミニウム A 1050 熱間加工終了材を用い、試験片形

状に旋削後、 400°C 、1時間の焼なまし処理を施した。各試験温度における圧縮試験によって得られた応力-ひずみ曲線を図3に示す。表1に、圧接試験片の初期寸法、充満時圧下率 R_e および平均表面積拡大比 \bar{X} の値を、まとめて示す。

2.2 試験温度の設定 圧接加工中、接合面が所定の温度に達していることを確認するため、あらかじめ、実際の試験の場合と同様の状態で圧接試験工具全体を加熱し、熱伝対を用いて接合面の温度変化を実測した。

図4は、試験温度 200°C を目標とした場合の加熱時間 t min に伴う恒温槽内温度および接合面温度 $T^\circ\text{C}$ の変化を示したものである。初回の加熱過程では、恒温槽設定温度を 300°C 、入力を 3 kW としたが、恒温槽内は約 40 分で 300°C に達するのに対し、接合面は約 70 分後にはほぼ 200°C となることからわかる。実際の圧接試験では、初回の加圧後の試験片の取出しおよび次の試験片のセットに約 10 分間を要するため、その間加熱を中断し、2回めの加熱は設定温度 215°C として再び入力 3 kW で行った。再加熱後、約 30 分で接合面は所定の 200°C に達している。同様に 10 分間加熱を中断したのち、3回めの加熱過程では、同一設定温度 215°C で約 20 分間加熱することによって接合面は 200°C に達することがわかる。この方法によって、接合面温度は、圧接加工中 $200 \sim 210^\circ\text{C}$ の範囲内にあることが保証される。

試験温度 300°C 以上の場合には、恒温槽のみでは所定の接合面温度に達しないため、図1のダイスより上部の工具全体を別の大形電気炉 (6 kW, 最高温度 600°C) にて、あらかじめ加熱 (大気中) し、接合面温度が所定の温度

表1 試験片寸法, 充満時圧下率, 平均表面積拡大比

| Temperature T °C | Diameter do mm | Height ho mm | Reduction Re % | A.S.E.R.* \bar{X} |
|---------------------|-------------------|-----------------|-------------------|------------------------|
| Room Temperature | 10 | 10 | 71.1 | 3.48 |
| | 11 | 11 | 64.8 | 2.88 |
| | 12 | 12 | 58.1 | 2.42 |
| 200 | 12 | 12 | 64.0 | 2.78 |
| | 13 | 13 | 57.8 | 2.37 |
| 300 | 14 | 12 | 51.0 | 2.04 |
| | 15 | 10 | 43.0 | 1.78 |
| | 17 | 8 | 27.8 | 1.38 |
| 400 | 17 | 8 | 27.8 | 1.38 |
| | 20 | 5 | 0 | 1.00 |

* Average Surface Expansion Ratio

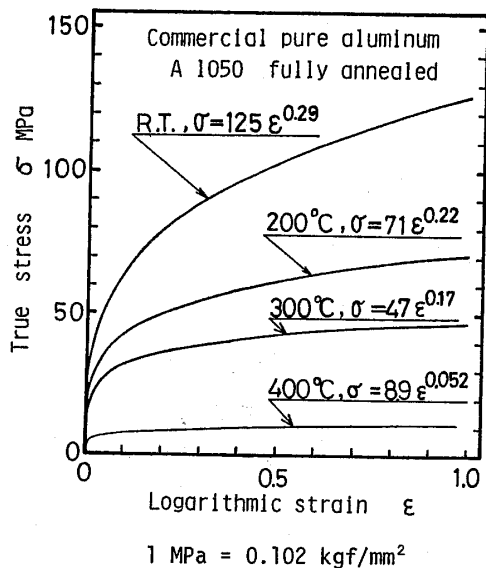


図3 供試材の応力-ひずみ曲線

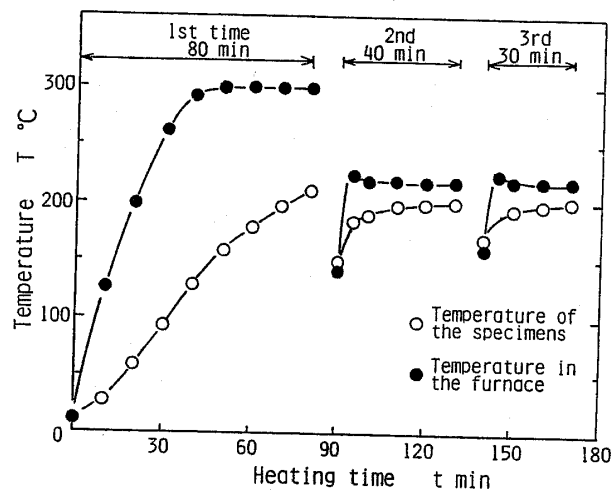


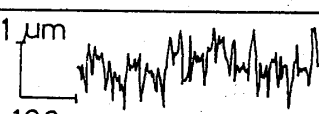
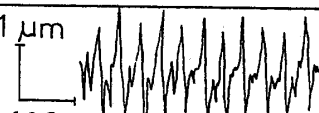
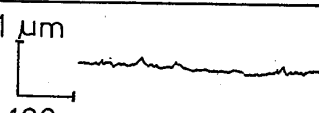
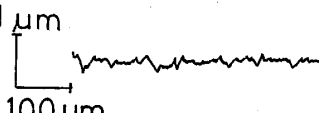
図4 加熱時間に伴う温度の変化 (200°C の場合)

以上に達したのち、これもあらかじめ300°Cまで加熱しておいた恒温槽内にす早く戻して圧接試験を行う。加熱時間 t min に伴う温度の変化の一例として、試験温度300°Cを目標とした場合の結果を図5に示す。初回の室温からの加熱過程では、大形炉の設定温度350°C、入力6kWとしたが、接合面温度は約150分後に340°Cに達する。約5分間で工具セットを恒温槽へ移動すると、接合面温度は急激に低下し、15分後には

約300°Cになる。圧接試験後の試験片の取出しおよびセットの時間を考慮し、約10分後に大形炉にて2回目の加熱を開始すると、約50分後に接合面温度は約340°Cに達する。3回以後もほぼ同様の温度変化を示す。この方法により、接合面温度は、圧接加工中300~330°Cの範囲内にあることが保証される。

400°Cの圧接試験も300°Cの場合とほぼ同様の方法で行った。ただし、大形炉設定温度を450°Cとした。この場合、接合面温度は、圧接加工中380~420°Cの範囲内にあることが確認された。

表2 試験片供試面の表面処理方法

| Surface Finishing Process* | Surface Roughness |
|--|---|
| Turning without Any Lubricants Velocity 30 m/s |  Ra = 0.25 μm** |
| Turning with Cutting Oil and Cleaning with Toluene |  Ra = 0.50 μm |
| Buffing with Al ₂ O ₃ Powder #8000 and Supersonic Cleaning with Toluene |  Ra = 0.08 μm |
| Electrolytic Polishing (1A/cm ² , 15s) after Buffing and Supersonic Cleaning with Toluene |  Ra = 0.10 μm |

* All specimens are fully annealed at 400°C during 1 hour
 ** Traversing length : 5 mm
 Cut off length : 0.75 mm

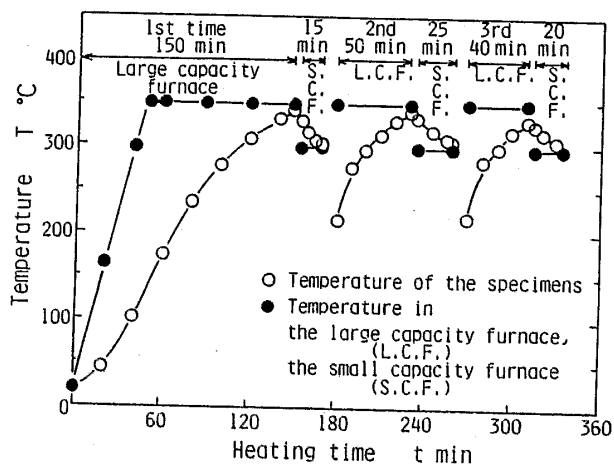


図5 加熱時間に伴う温度の変化(300°Cの場合)

2.3 試験片接合面の表面処理方法 前報と同様に、標準の表面処理方法として、無潤滑切削法を採用するが、その表面あらさは表2に示すように $R_a \approx 0.25 \mu\text{m}$ となっている。さらに、表面処理の影響を調べるため、表2に示すような潤滑切削、バフ研摩および電解研摩による表面仕上げについても検討する。ここで、潤滑切削の場合の表面あらさは、 $R_a \approx 0.5 \mu\text{m}$ で無潤滑切削の場合よりもややあらくなっている。これに対して、アルミナ研摩剤(平均粒径 $0.05 \mu\text{m}$)を用いたバフ研摩およびその後電解研摩した場合には、表面あらさ $R_a = 0.08 \sim 0.1 \mu\text{m}$ とかなり平滑な面となっている。

無潤滑切削以外の表面処理を施した試験片は、切削油あるいは研摩液をトルエン中で超音波洗浄した。いずれの試験片も、最終的に400°C、1時間の焼なまし処理を施して、試験に供した。

3. 表面積拡大比および一体材の引張強さ

接合面の表面積拡大比 X の半径方向分布を実測するため、一方の試験片端面に半径1mm間隔の同心円をけがき、圧縮加工の前後でその直径を測定した。高温での接合を防ぐため、界面に二硫化モリブデン粉末を塗布した。図6に各温度における表面積拡大比 X の分布を示すが、いずれも再現性は良好で $\pm 10\%$ 以内のばらつきにおさまっている。工具面を無潤滑としたため、表面積拡大比 X の値は中心部ほど高くなっている。4章で示すように、高温ほど小さな表面積拡大比で完全な接合強度に達するため、図6のように、200°Cでは $X = 1.9 \sim 5.9$ 、300°Cでは $X = 1.2 \sim 3.8$ 、400°Cでは $X = 1 \sim 2$ の範囲を取りうるように圧下率が選ばれている。

継手効率 η を求める場合の基準の強さとなる一体材の引張強さ S_T を求めるため、圧接試験と同等の圧下率および工具面摩擦条件(無潤滑)下で圧縮加工し、その一体材の各半径位置における引張強さの分布を測定した。図7に、各温度における測定結果の一例を示す

が、圧下率が変わっても、 S_{T_0} はこれらの図とほとんど同様である。200°Cの場合には、中心部ほどやや大きくなる傾向を示すが、その値は $S_{T_0}=95\sim 105$ MPa{9.7~10.7 kgf/mm²}となっており、常温の場合の $S_{T_0}=127\sim 145$ MPa{13~14.8 kgf/mm²}に比べ、3~4割近く低くなっている。さらに高温の300°Cおよび400°Cの場合には、半径位置によらずほぼ一定値75 MPa{7.7 kgf/mm²}および65 MPa{6.6 kgf/mm²}を示し、常温の場合のほぼ半分程度の値となっている。これらの引張強さは、400°C、1時間の焼なまし処理を施した素材の引張強さ $S_{T_0}=73.5$ MPa{7.5 kgf/mm²}にほぼ等しく、圧縮加工と同時に完全な再結晶が生じたものと考えられる。図7において、常温の場合と同様に、 S_{T_0} のばらつきは±10%程度存在することから、本報でも継手効率 η が90%以上において完全な接合強度が達成されたものと判定する。

4. 圧接限界条件におよぼす温度の影響

4.1 継手効率の分布 本章では、試験片接合面の表面処理法として無潤滑切削の場合を検討の対象とする。

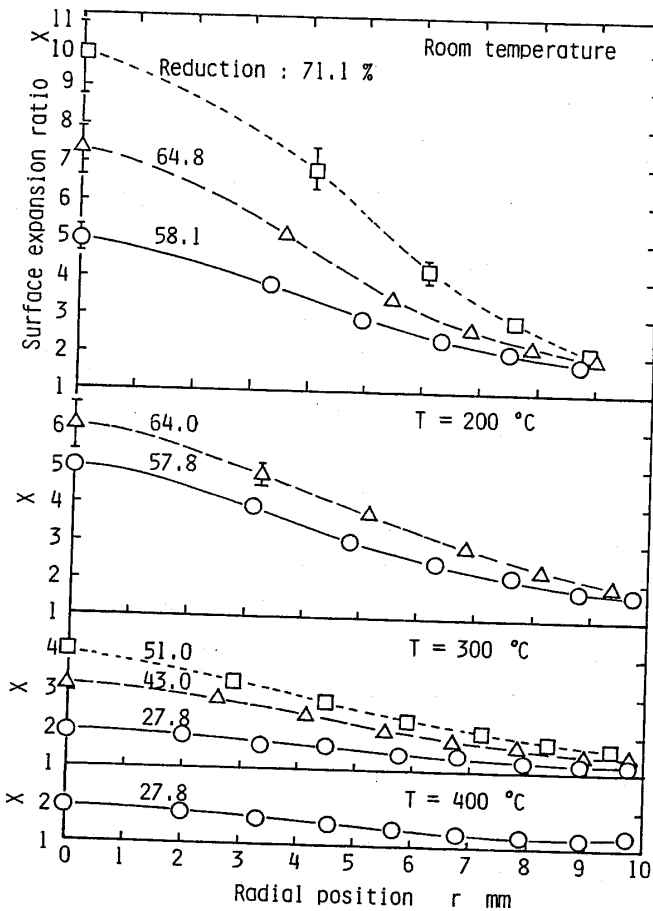


図6 表面積拡大比の半径方向分布

常温の場合に比べ、高温では拡散の影響が強まり、いわゆる拡散接合が生ずる可能性が考えられる。そこで、接合強度に及ぼす負荷面圧保持時間の影響について調べてみた。図8は、一例として、温度300°C、平均面圧 $\bar{p}=588$ MPa{60 kgf/mm²}で一定とし、面圧保持時間を、10秒、5分および30分間に変更した場合の引張強さの分布を示したものである。図から、保持時間を長くしても接合強度にほとんど変化が認められないことがわかる。200°Cおよび400°Cの場合についても、5分間の範囲内ではあるが同様の結果が得られた。そこで、本実験では、常温の場合と同様に、面圧保持時間は10秒で一定とした。

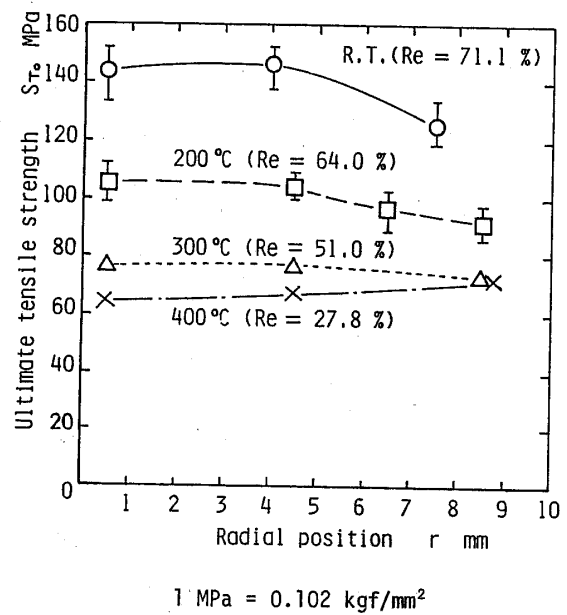


図7 一体材の引張強さの半径方向分布

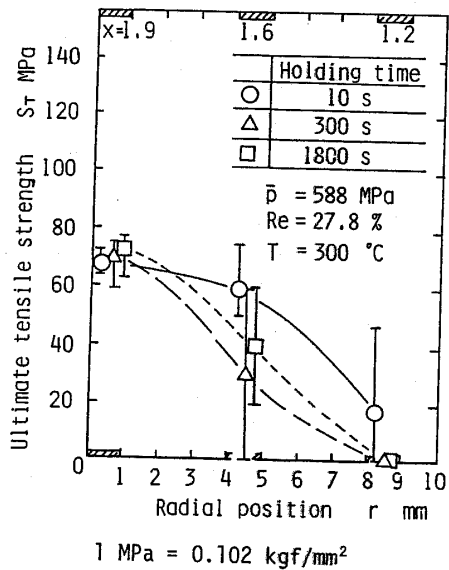


図8 接合強度におよぼす負荷面圧保持時間の影響

図9(a)~(c)は、それぞれ、200、300および400°Cにおける継手効率 η の半径方向分布の一例を示したものである。いずれの場合も、 $\eta \geq 90\%$ となる場合には、そのばらつきは $\pm 10\%$ 以内で、安定した接合強度が得られることがわかる。(a)200°Cの場合、低面圧 $\bar{p}=98\text{MPa}$ {10kgf/mm²}では、表面積拡大比 $X=5.9$ の中心部のみが $\eta=100\%$ となるのに対し、高面圧 $\bar{p}=784\text{MPa}$ {80kgf/mm²}では、半径位置 $r=6\sim 7\text{mm}$ ($X=3.0$ まで)の範囲において $\eta=100\%$ が得られることがわかる。(b)300°Cおよび(c)400°Cの場合には、面圧 \bar{p} によらず同じ分布を示しており、300°Cでは $X=2.7$ 以上で、400°Cでは $X=1.2$ 以上で $\eta=100\%$ が達成されることがわかる。

図10は、試験温度300°Cにおける接合界面近傍の縦断面顕微鏡拡大写真である。(a)継手効率 $\eta=50\%$ の場合には、前報⁽¹⁾に示した常温の $\eta=50\%$ の場合に

比べて、接合界面は連続線として識別が困難になっている。さらに、(b) $\eta=100\%$ の場合には、接合界面は母材とほとんど区別できない状態となっている。300°Cでは再結晶温度以上となるため、表面の酸化膜は母材中に拡散し、接合界面近傍も母材と全く同一の組織になったものと考えられる。

4.2 圧接限界条件 前報⁽¹⁾と同様に、表面積拡大比 X と平均面圧 \bar{p} のグラフ上に継手効率 η の変化を整理して示すと、図11(a)~(d)のようになる。(a)は前報に示した常温の場合の結果、(b)~(d)は、それぞれ200、300および400°Cの結果である。図中●の記号は継手効率 $\eta=90\sim 100\%$ の場合、すなわち完全な接合強度が達成される場合を表している。いずれの温度の場合にも、破線で示すように、完全な接合強度を得るための表面積拡大比 X と平均面圧 \bar{p} の関係、すなわち圧接限界線の存在が認められる。この

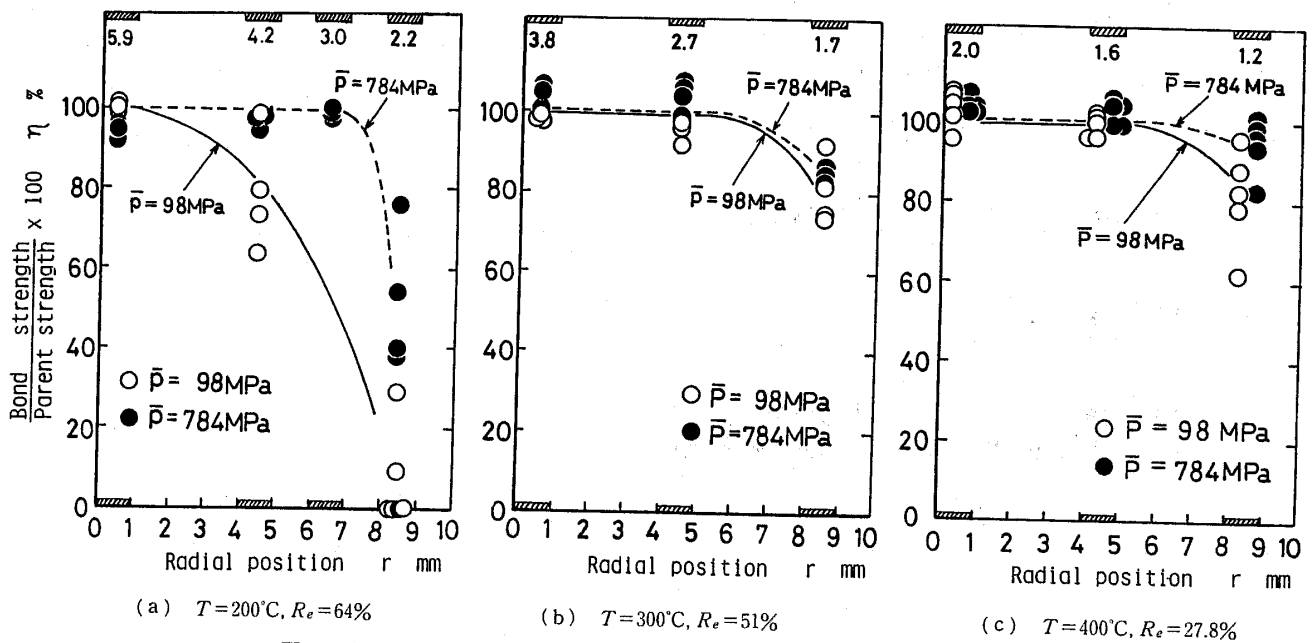


図9 各温度における継手効率の半径方向分布の一例(無潤滑切削)

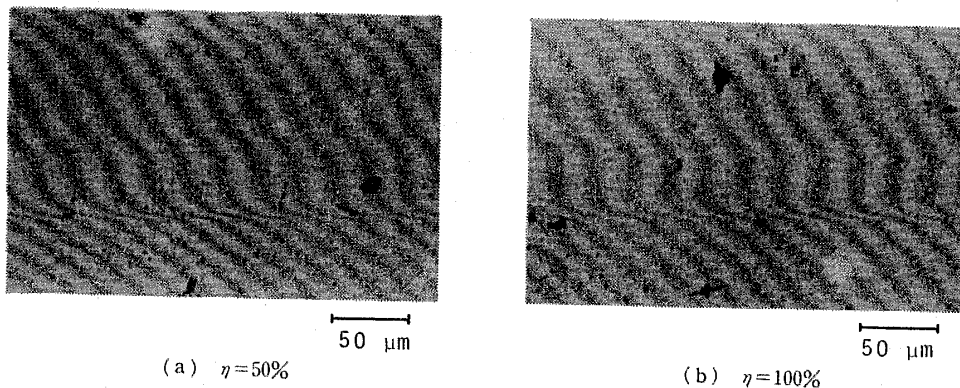


図10 接合界面近傍における縦断面の顕微鏡拡大写真(300°Cの場合)

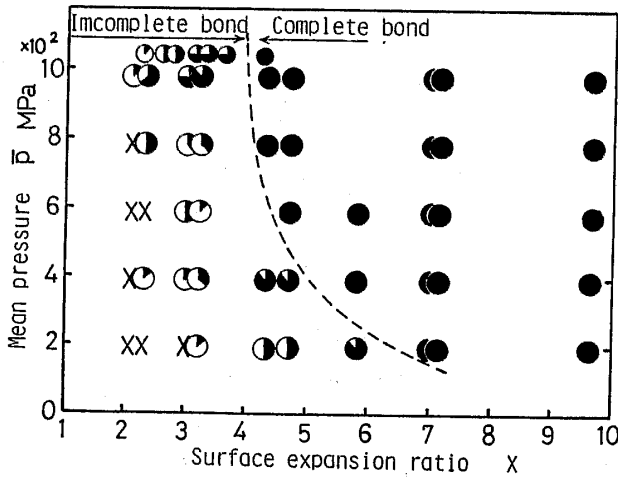
圧接限界線は、温度上昇に伴って、表面積拡大比 X および平均面圧 \bar{p} の低い側に移動し、圧接可能な条件範囲が顕著に改善されることがわかる。とくに、300°C および 400°C では、本実験の面圧範囲 $\bar{p}=98\sim784$ MPa (10~80 kgf/mm²) において、面圧 \bar{p} はほぼ無関

係に表面積拡大比 X が 2.5 および 1.2 以上で、 $\eta \geq 90\%$ が達成されることがわかる。

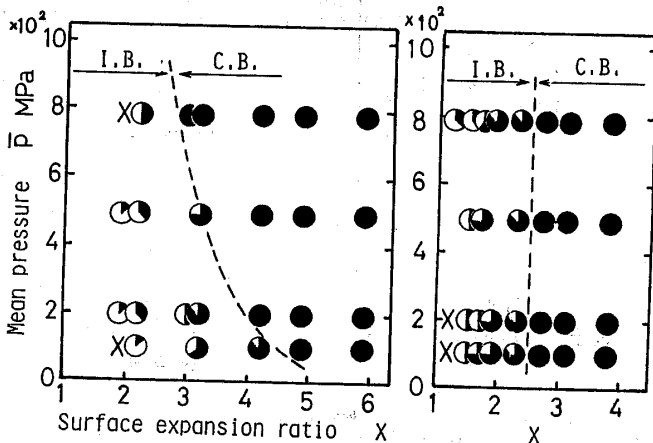
以上のように、アルミニウムの熱間加工温度 350~450°C の範囲では、比較的低面圧 ($\bar{p}=10$ kgf/mm² 程度) で、しかもわずかな表面積拡大 ($X=1.2$ 以上) が生ずるだけで完全な接合強度が達成されることになり、熱間加工では比較的容易に圧接過程を組込むことが可能になることを示唆している。

表 3 平均変形抵抗

| Temperature T °C | Equivalent Strain | Average Equivalent Stress \bar{Y} MPa |
|------------------|-------------------|---|
| Room | 1.4 ~ 1.9 | 145 |
| 200 | 1.0 ~ 1.6 | 75 |
| 300 | 0.9 | 46 |
| 400 | 0.1 ~ 0.26 | 8.4 |

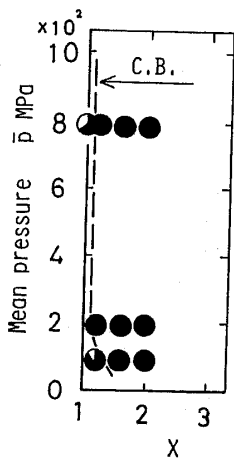


(a) Room temperature



(b) 200°C

(c) 300°C



(d) 400°C

| Sign | Bond Strength $S_p/S_p \times 100\%$ |
|------|--------------------------------------|
| ● | 90 ~ 100 |
| ● | 80 ~ 90 |
| ● | 70 ~ 80 |
| ● | 60 ~ 70 |
| ○ | 40 ~ 60 |
| ○ | 20 ~ 40 |
| X | Failure |
| ○ | Lubrication |

1 MPa = 0.102 kgf/mm²

図 11 表面積拡大比と面圧に対する継手効率の変化(無潤滑切削)

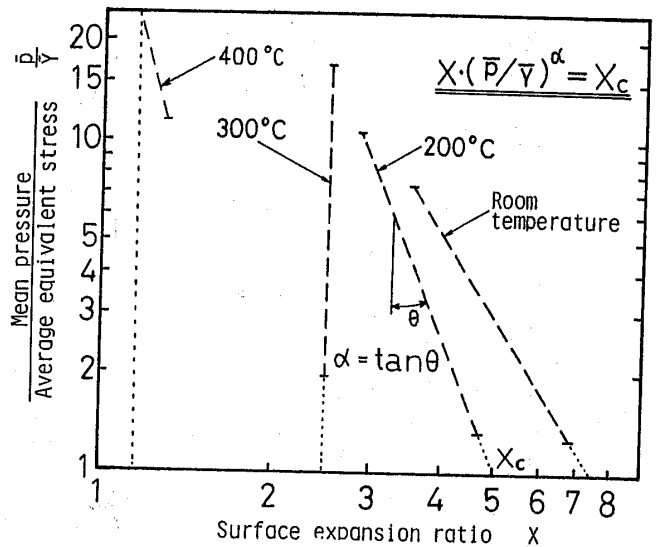


図 12 各温度における圧接限界条件(無潤滑切削)

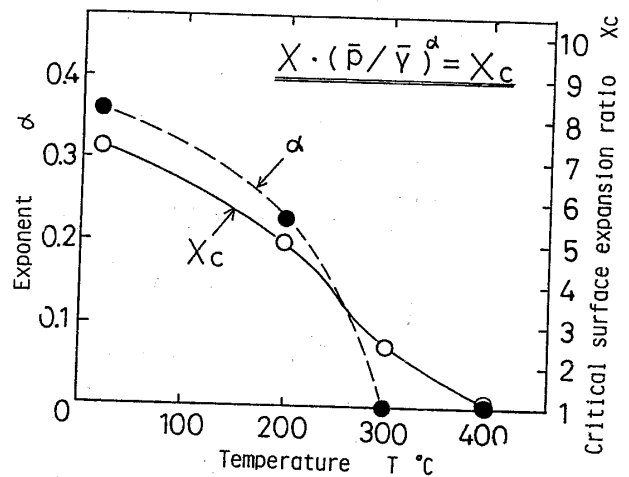


図 13 温度に伴う α および X_c の変化(無潤滑切削)

4.3 圧接限界線の表示式 前報と同様に、圧接限界線を近似する実験式を求めるため、図11の破線を両対数グラフ上に再整理してみた。図12にその結果を示すが、縦軸については、平均面圧 \bar{p} をその試験温度における平均変形抵抗 \bar{Y} で除した値、すなわち相対面圧 \bar{p}/\bar{Y} を用いている。これは、図3に示したように、温度によって供試材の変形抵抗が異なるため、接合界面における負荷面圧の標準化を試みたものである。基準となる平均変形抵抗 \bar{Y} は、表3に示すように、圧接限界線の存在範囲における相当応力 σ_{eq} の平均値である。図12に示されるように、圧接限界線は直線となり、一般に次の式によって表される。

$$X(\bar{p}/\bar{Y})^\alpha = X_c \dots\dots\dots (1)$$

ここで、前報と同様に、 X_c は相対面圧 $\bar{p}/\bar{Y} = 1$ の場合の限界表面積拡大比、 α は直線の傾きの絶対値で、面圧影響指数と呼ぶことにする。

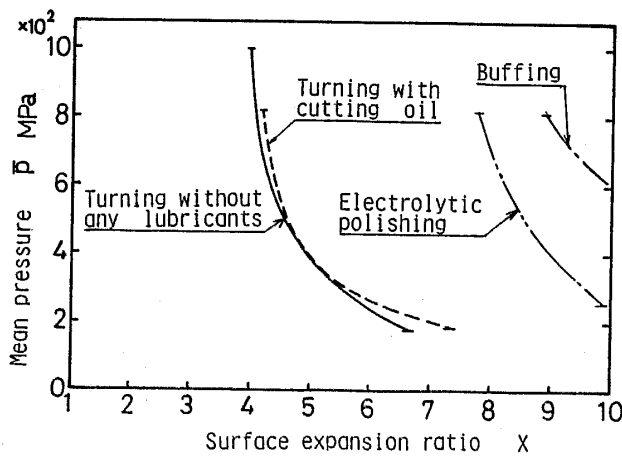
図13は、試験温度 $T^\circ\text{C}$ に伴う限界表面積拡大比 X_c および面圧影響指数 α の変化を示したものである。両値ともに温度上昇に伴って顕著に減少している。面圧影響指数 α は $T=300^\circ\text{C}$ 以上で0となり、面圧 \bar{p} が 98 MPa $\{10\text{ kgf/mm}^2\}$ 以上で、その影響がなくなることを表している。一方、限界表面積拡大比 X_c は、 $T=400^\circ\text{C}$ で約1.2となり、さらに高温になると $X_c = 1$ 、すなわち表面の拡大なしでも完全な接合が生じることを示唆している。この状態が完全な拡散接合であると考えられる。

5. 圧接限界条件におよぼす表面処理の影響

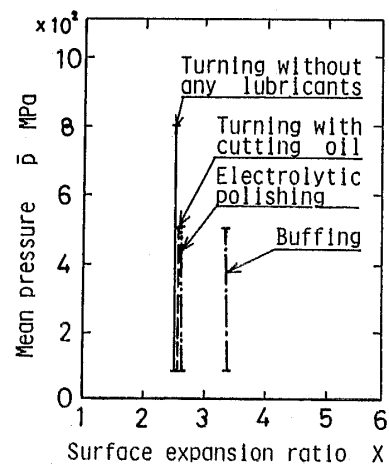
前章までに得られた圧接限界線は、いずれも無潤滑切削による表面仕上げの場合であったが、本章では、表2に示した各種表面処理状態によって圧接限界線がどのように変化するかについて検討してみる。

表4 各種表面処理における面圧影響指数および限界表面積拡大比

| Temperature $T^\circ\text{C}$ | Surface Finishing Processes | Pressure Dependent Exponent α | Critical Surface Expansion Ratio X_c |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|
| Room | Turning without Any Lubricants | 0.36 | 7.3 |
| | Turning with Cutting Oil | 0.34 | 7.7 |
| | Electrolytic Polishing | 0.25 | 11.3 |
| | Buffing | 0.36 | 16.6 |
| 300 | Turning without Any Lubricants | 0 | 2.5 |
| | Turning with Cutting Oil | 0 | 2.5 |
| | Electrolytic Polishing | 0 | 2.5 |
| | Buffing | 0 | 3.6 |



(a) Room Temperature



(b) 300 °C

$$1\text{ MPa} = 0.102\text{ kgf/mm}^2$$

図14 圧接限界条件におよぼす表面処理の影響

図14(a)および(b)は、それぞれ常温および300°Cの場合の圧接限界線を示したものである。(a)の常温の場合には、潤滑切削の場合の圧接限界線は、無潤滑切削の場合とほとんど同一となっている。したがって、潤滑切削の汚れ膜等は、トルエン洗浄と熱処理(400°C, 1時間)によって、接合強度に影響をおよぼさない程度に除去されることがわかる。また、表面あらさ $R_a=0.25\mu\text{m}$ および $0.5\mu\text{m}$ 程度の差異は接合強度にほとんど影響しないと考えられる。一方、バフ研磨および電解研磨による表面仕上げでは、表面あらさ $R_a=0.08\sim 0.10\mu\text{m}$ とかなり平滑な面となり、接合面のなじみ易さの点では有利と考えられる。しかし、これらの圧接限界線は、高面圧 $\bar{p}=788\text{MPa}$ {80 kgf/mm²}でも、 $X=8\sim 9$ となり、切削仕上げの場合に比べ、圧接性はきわめて悪くなっている。研磨処理が圧接性を阻害する原因として、酸化膜の厚さ、表面層の組織変化、過度の平滑化などが考えられるが、この点については、今後の検討課題としたい。

図14(b)300°Cでは、バフ研磨の場合のみ、圧接限界線が $X=3.5$ となり圧接性がやや低下するものの潤滑切削および電解研磨の場合には、無潤滑切削の場合の圧接限界線 $X=2.5$ と全く一致している。このように、常温の場合に比べ、300°Cでは表面処理の差異による影響が少なくなり、この点でも温度を高めることによって圧接条件が緩和されるという有利な点が現れている。

図14に示される圧接限界線を式(1)によって近似すると、限界表面積拡大比 X_c および面圧影響指数 α は、表4に示すような値となる。この表から、面圧影響指数 α は主として温度によって左右されるのに対し、限界表面積拡大比 X_c は表面処理状態によっても大きな影響を受けることがわかる。

6. 結 論

本研究は、塑性加工に圧接過程を組込む場合の加工条件を合理的に決定するため、完全な接合強度をうるための圧接限界条件の確立を目的として行われた。本報では、工業用純アルミニウムを用いて、前報で得ら

れた圧接限界条件が、試験温度および試験片の表面仕上げ状態によってどのように変化するかについて検討した。その結果、次のような結論が得られた。

(1) 前報に示した常温の場合と同様に、200, 300, および400°Cのいずれの場合にも、表面積拡大比 X 対面圧 \bar{p} に対する圧接限界条件の存在が明りように示された。この圧接限界条件は、温度上昇に伴い、低面圧、低表面積拡大比の側へ移行し、とくに、400°Cでは、面圧 $\bar{p}=98\text{MPa}$ {10 kgf/mm²}以上で、表面積拡大比 $X=1.2$ 以上において完全な接合強度が得られることがわかった。これは、熱間加工において、圧接過程を比較的容易に組込むことが可能になることを示唆している。

(2) 200~400°Cの場合の圧接限界線は、前報と同様の形の実験式

$$X(\bar{p}/\bar{Y})^\alpha = X_c$$

によって近似されることがわかった。温度上昇に伴って、面圧影響指数 α は0.36(常温)から0(300°C以上)まで、限界表面積拡大比 X_c は、7.3(常温)から1.2(400°C)まで、いずれも顕著に減少し、圧接性が著しく改善されることを定量的に表すことが可能となった。

(3) 接合面の表面処理方法としては、無潤滑切削がとくに圧接性に優れているが、潤滑切削でも、脱脂後、400°C, 1時間程度の加熱処理を施せば、無潤滑切削とほぼ同程度の圧接性が保証される。バフ研磨および電解研磨による表面仕上げは、とくに常温において圧接性を著しく阻害するが、温度を高めることによって、その悪影響をかなり緩和することができることがわかった。

(4) 圧接限界条件式において、面圧影響指数 α は主として温度によって大きく左右されるのに対し、限界表面積拡大比 X_c は接合面の表面処理状態によっても大きな影響を受けることがわかった。

文 献

- (1) 中村・ほか2名, 機論, 50-451, C (昭59), 571.

討 論

〔質問〕 黒崎 靖〔三重大学工学部〕
鍛造と圧接を組合せた複合加工工程を設計することを想定して、

- (1) 式(1)における \bar{p}/\bar{Y} と X の適用範囲、

(2) 圧接状態の安定性からみた \bar{p}/\bar{Y} と X の選
び方、の二点についてお考えをうかがいたい。

〔回答〕 付図1は、本文中図12の圧接限界条件に、さらに低面圧 $\bar{p}/\bar{Y}\approx 1$ 近傍における結果を追加し

たものである。本実験範囲において、室温では $\bar{p}/\bar{Y}=1.3\sim 6.8$, 200°C では $\bar{p}/\bar{Y}=1.3\sim 10.7$, 300°C では $\bar{p}/\bar{Y}=1\sim 17.4$, 400°C では $\bar{p}/\bar{Y}=1\sim 95$ となっている。いずれもこの範囲において式(1)の圧接限界条件式を適用できるが、 400°C の場合には $\bar{p}/\bar{Y}\geq 15$ と、 $\bar{p}/\bar{Y}=1\sim 15$ の範囲で係数 α および X_c が異なっている。第1報に述べたように、田端ら(付1)によれば \bar{p}/\bar{Y} が1以下では表面積拡大比を増しても完全な接合強度を得ることは困難であり、式(1)の下限の適用範囲は事実上 $\bar{p}/\bar{Y}=1$ になるものと考えられる。

安定した圧接状態を得るためには、継手効率 η が90%以上となる圧接限界線以上の範囲の \bar{p}/\bar{Y} と X を選択することが必要である。第1報において、この範囲であれば、母材のばらつきを考慮して、接合部は一体材と同等の強さとなることが確認されている。

〔質問〕 真崎才次〔大阪工業大学〕

接合材を引張り試験片に加工するのは常温で行っておられるが、引張試験は、各温度で行われると思う。この時、接合強度に及ぼす再加熱の影響はないか。

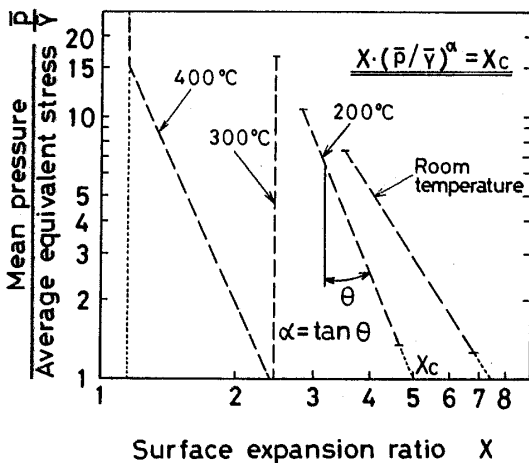
〔回答〕 説明不足のため誤解を招いたようであるが、各温度で圧接した試験片についての引張試験は、すべて室温において実施した。

〔質問〕 工藤英明〔横浜国立大学工学部〕

(1) 図8から、面圧保持時間は接合強度に影響を与えないと結論されているが、継手効率100%を達成する限界の圧力と表面拡大率に対しても同じことがいえると考えられるか。

(2) 室温圧接に比べて加熱圧接が有利となる結果を得られたが、どのような機構でそうなるのか(クリープ、界面拡散、酸化物の体積拡散など)で説明たまわりたい。

(3) 加熱圧接と室温圧接を同一継手強度(絶対値)



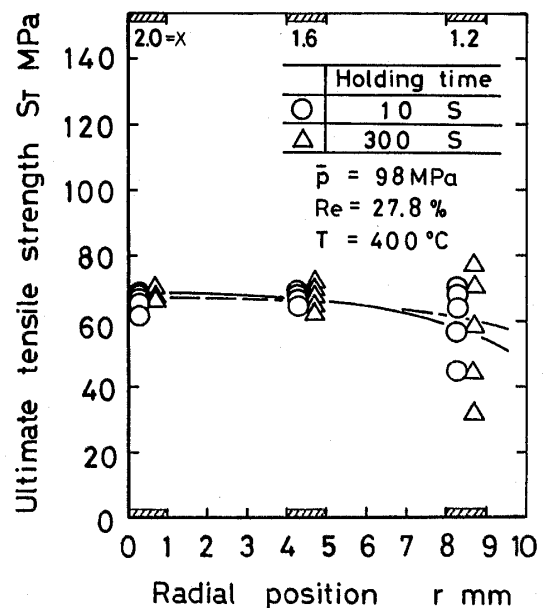
付図1 各温度における圧接限界条件(無潤滑切削)

で比較するとどうなるかお教え願いたい。

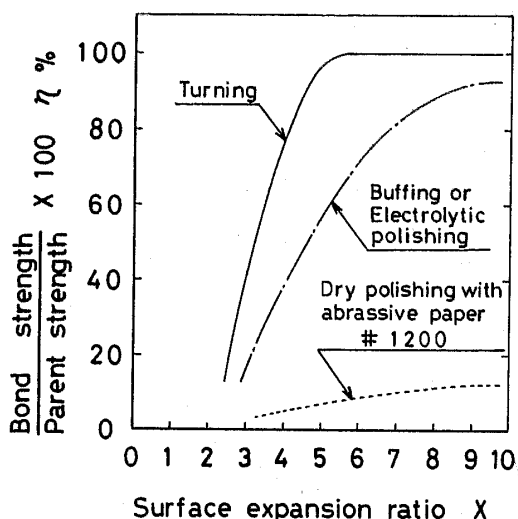
〔回答〕 (1) 付図2は、 400°C , $\bar{p}=98\text{ MPa}$, $R_e=27.8\%$ の場合について、面圧保持時間を10秒および5分と変更した場合の結果を比較して示したものである。10秒では、 $r=4\sim 5\text{ mm}$ より内部($X=1.6$ 以上)では $\eta=100\%$, $r=8\sim 9\text{ mm}$ ($X=1.2$) では $\bar{\eta}=86\%$ と、圧接の限界条件近傍の接合状態となっている。保持時間を5分まで延長しても、 $r=8\sim 9\text{ mm}$ において、限界条件直下の $\bar{p}/\bar{Y}=98\text{ MPa}$, $X=1.2$ では、 $\bar{\eta}=83\%$ と接合強度は改善されないことがわかる。したがって、5分間程度の面圧保持時間では、 $\eta=100\%$ を得るための限界の面圧と表面積拡大比に対しても、保持時間の影響がほとんど現れないことがわかる。

(2) 上述の討論から推測されるように、本実験では加工時間および面圧保持時間が比較的短く(約5分以内)、通常のクリープ変形および拡散接合の効果は比較的少ないと思われる。実験的確認は難しいことであるが、高温下での塑性変形により界面拡散および酸化物の体積拡散が促進されるためではないかと考えている。

(3) 本文中図7に示すように、継手効率 $\eta=100\%$ といっても、接合強度の絶対値は加工硬化の程度によって、例えば、室温では $140\sim 160\text{ MPa}$, 400°C では $65\sim 70\text{ MPa}$ と大きく異なる。室温圧接では、不完全な圧接で加熱圧接と同程度の接合強度を得ることが可能であるが、その強度はかなりばらつきが生じ信頼性が少なくなる。加熱圧接では $\eta=100\%$ となったのち、室温で2次加工することにより、その強度を増加



付図2 接合強度に及ぼす負荷面圧保持時間の影響



付図3 表面処理方法の違いによる継手効率の変化

させることが可能であり、いずれの温度でも完全な接合強度を得ることが実用上有利になるものと考え。

〔質問〕 和田林良一〔大阪府立工業技術研究所〕

(1) 高温における拡散現象についてうかがう。図8で300°C、平均面圧588 MPaの時、保持時間を長くしても有意差がないという例をあげられているが、これは拡散がほとんど生じていないということなのか、あるいはすえ込み変形の段階である程度拡散が生じ、一定面圧保持時間の影響はないということなのか。また面圧のもっと小さい時、あるいは大きい時でも同様の傾向か。

(2) バフ研摩や電解研摩が圧接性に及ぼす悪影響が高温になると緩和される原因としてどのようなことが考えられるか。

(3) 面圧影響指数 α は主として温度によって決まるとすれば、 α を温度 T の関数として表すことはできないか。図13をみても、少なくとも300°Cまでは可能な気がする。ただしもう少しデータが必要だとは

付表1 試験片供試面の表面処理方法

| Surface Finishing Process | Surface Roughness |
|--|-------------------|
| Dry polishing with abrasive paper # 1200 | |

思うが。

〔回答〕 (1) 付図2は、低面圧 $\bar{p}=98$ MPaで、 $T=400^\circ\text{C}$ 、 $R_e=27.8\%$ の場合について面圧保持時間の影響を調べたもので、この場合も5分以内では保持時間によって接合強度に変化が認められない。したがって、すえ込み変形の段階で界面における母材および酸化物の拡散が生じ、その後の面圧保持による拡散接合がほとんど現れなかったものと考えられる。ただし、面圧保持時間をさらに延長した場合には、拡散による接合が進むことが考えられる。

(2) 付図3は、本文中表2の表面処理以外に付表1の乾式研摩をした場合について、室温で圧接試験を行った結果である。バフ研摩及び電解研摩の場合より、#1200の研摩紙で乾式研摩した場合には、圧接性がさらに劣化している。乾式研摩では厚い酸化膜が形成されやすいと考えられるので、この酸化膜が圧接性を著しく阻害するものと考えられる。高温下では、このような酸化膜の拡散が活発になり、悪影響が緩和されるものと考えられる。

(3) ご指摘のように、少なくとも300°Cまでの範囲において、 α を T の関数として表すことができそうである。今後、200°Cについても各表面処理についての圧接試験を追加して検討を試みたいと考える。

(付1) 田端・ほか2名、塑性加工春季講演会講演論文集、(昭57)、615。