

© 1986 ISIJ

Ti-6Al-4V 合金棒の摩擦圧接継手性質に 及ぼす圧接条件の影響

技術報告

西川 富雄*・岡田 稔*

Effect of Friction Welding Conditions on the Strengths of Joint of Ti-6Al-4V Alloy Bar

Tomio NISHIKAWA and Minoru OKADA

Synopsis :

The friction welding conditions to obtain the good strengths of the joint of Ti-6Al-4V alloy are investigated by evaluating the tensile, bending and Charpy impact properties of them. The friction welding is capable in air under 2 400 rpm of the rotation speed. The strengths are improved to the equivalent strengths to those of mother material when the up-set pressure is increased. In the case of the specimens obtained from the inside of the section of the joint, the up-set pressure to obtain the equivalent property to mother material on Charpy impact value is the highest, and it to obtain that on bending strength is higher than that on tensile strength. In the case of specimens with burr, the up-set pressures to obtain those on tensile and bending strengths are same and higher than those of the specimens without burr, but they are lower than that on Charpy impact property.

1. 緒 言

摩擦圧接法は作業条件が安定していること、作業時間が短時間であることから、継手性能の信頼性と生産能率が高く、継手の大量生産方式として優れた加工法であるなどの特徴があることが指摘されており^{1)~4)}、その技術の発達は著しく、現在では水中での摩擦圧接法も可能になりつつある⁵⁾。この方法は作業条件の再現性の良いことから、繰り返し行われる少量生産にも適した方法である。

チタン合金で最も多く用いられている Ti-6Al-4V 合金の摩擦圧接継手条件については C. J. CHEN の研究⁶⁾、C. G. NESSLER らの研究⁷⁾や蓮井の解説⁸⁾があるが、圧接条件を構成する各種因子の効果の一般的傾向の調査は十分ではない。そこで本研究では Ti-6Al-4V 合金の丸棒継手について、安定した継手強度が得られる圧接条件を調べた。

2. 実験の方法

2.1 供試材および摩擦圧接機

供試材は Table 1 に示す化学成分を有する 1t 鋳塊を β 域で粗圧延後、 $\alpha+\beta$ 域で $\phi 36$ に仕上圧延を行い、 $705^{\circ}\text{C}\times 1\text{h}$ の加熱後 550°C まで炉冷し、つづいて空冷したのち、 $\phi 32$ に機械加工したものをを用いた。摩擦面は

長さ方向に対して直角であり、面取りなどの角部の加工のない状態で用いた。摩擦面の仕上粗度は 6.3 S 程度である。表面はアセトンで脱脂し、さらに試験片を摩擦圧接機に取り付けたのち摩擦面をアセトンで清浄にし、試験に供した。

摩擦圧接機は豊田自動織機製 FW30U-L 型 (ブレーキ式) である。摩擦圧力及びアプセット圧力などの推力及び負荷時間の測定には、油圧系に歪みゲージ式の圧力変換器を取り付け、寄りしろの測定には歪みゲージ式の変位計を取り付け、両信号を同時に記録計に入力し、記録紙を時間送りすることにより行つた。

2.2 摩擦圧接条件

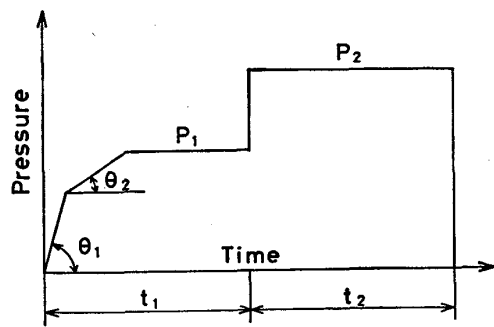
調査因子は Fig. 1 における摩擦時間 t_1 、摩擦圧力 P_1 、アプセット時間 t_2 、アプセット圧力 P_2 である。摩擦圧接機の回転速度は 2 400 rpm であり、微速送り速度 (摩擦加熱時に回転側試験片が固定側試験片に接近する速度) は 4 mm/s とし、この時の初期スロープ θ_1 は約 2.5 kgf/mm²/s であり、定常スロープは約 0.5 kgf/mm²/s であつた。初期スロープは微速送り速度によつ

Table 1. Chemical composition (wt%).

Al	V	O	Fe	C	N	H
6.61	4.07	0.12	0.14	<0.01	0.01	0.0003

昭和 60 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 8 月 30 日受付 (Received Aug. 30, 1985)

* 住友金属工業(株)中央技術研究所 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)



t_1 —Friction time P_1 —Friction Pressure
 t_2 —Up-set time P_2 —Up-set pressure
 θ_1 —Initial slope θ_2 —Stationary slope

Fig. 1. Friction welding conditions.

て決まる装置固有の値であり、定常スロープは設定することができるが、本研究では設備の設定可能範囲の中央値とした。なお本試験はすべて大気中で行った。

本研究で効果を調べた因子の水準範囲は、摩擦時間：2.2~4.2s、摩擦圧力：0.12~1.7 kgf/mm²、アップセット時間：0.3~11s、アップセット圧力：0.15~7.4 kgf/mm²である。摩擦時間及びアップセット時間はタイマーで設定するが、実験結果は実測時間で整理した。摩擦圧力及びアップセット圧力は、油圧を推力に換算し、推力を圧接前の試験片の断面積で除して求めた。

2.3 継手性質の評価法

継手性質の評価は引張破断強さ、曲げ強さ及びシャルピー衝撃値で行った。試験片の形状及び採取位置、ならびに曲げ試験方法を、それぞれ、Fig. 2 及び Fig. 3 に示す。引張試験片は圧接部が平行部のほぼ中央になるように採取し、圧接部と母材部と比較して母材部の方が弱い場合にフィレット部の影響を避けるために、平行部の長い試験片とした。直径は JIS Z 2201 の 4 号試験片に準じて直径 14 mm とした。曲げ試験片は JIS Z 3124 「突合せ溶接継手のローラ曲げ試験方法」に準じて、先端半径 $R=33$ mm のポンチを用い、 $R=2t$ (t は板厚) とするために $t=16.5$ mm とし、ローラとポンチとのすきまは、 $t+1.5$ mm とするため、18 mm とした。試験片の幅は圧接試験片断面の外周の影響を避けるため 18 mm とした。シャルピー衝撃試験片は JIS Z 2242 の 4 号試験片とし、切り欠き位置を圧接試験片の外周側に付与した。これは切り欠き位置の圧接試験片外周からの最小距離と、曲げ試験片の角部の圧接試験片外周からの最小距離とを、ほぼ同一にするためである。この方法により、圧接断面の性質が中心から離れるに従って悪化している場合、曲げ試験片とシャルピー衝撃試験片が断面内の、ほぼ同じ位置の性質を評価していると期待される。なお圧接後にはアップセットに基づく材料の突出部(バリ)

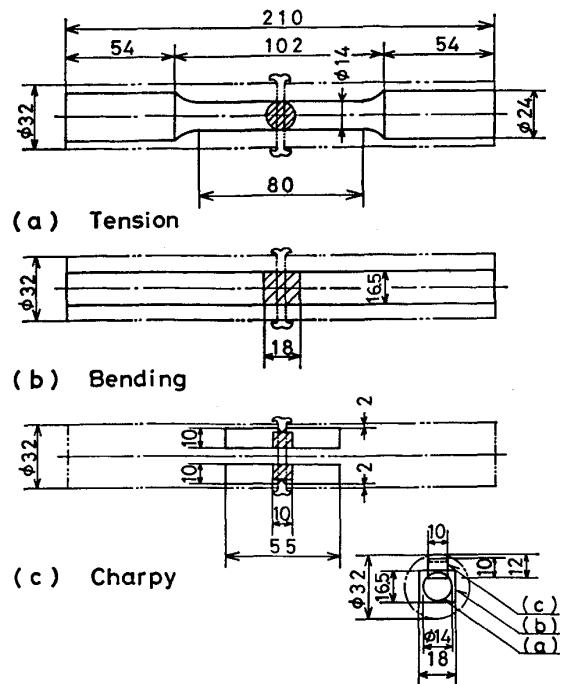


Fig. 2. Sampling of specimens (mm).

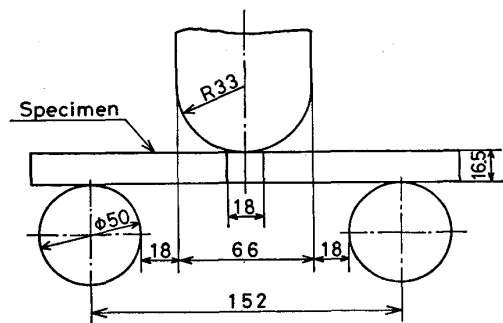


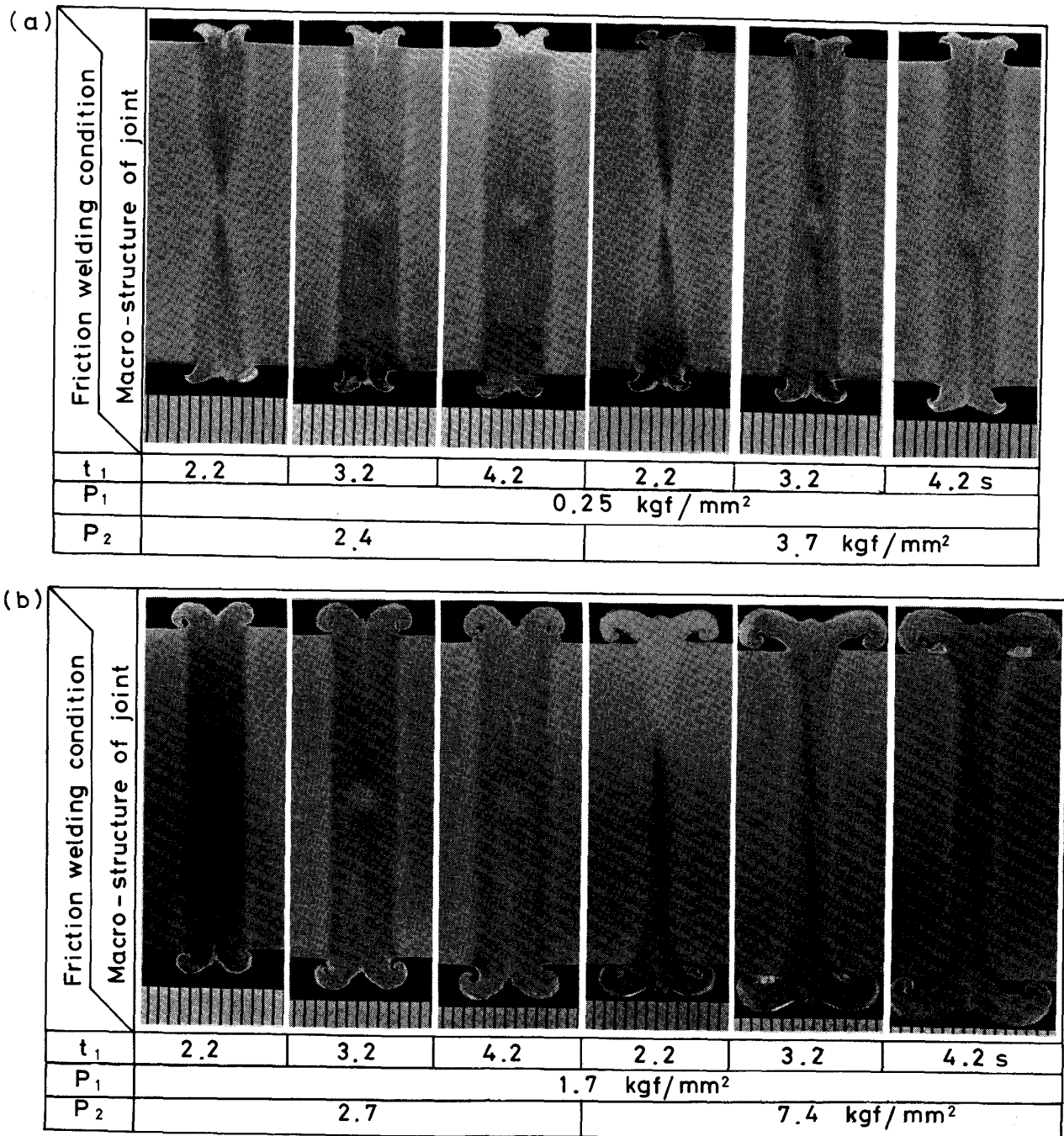
Fig. 3. Procedure of bending test ($R=2t$) (mm).

を除去して使用するのが一般的であるが、バリを残したまま使用する場合もありうる。この場合、バリを残した断面の最外周の性質が重要であるので、バリ付き引張試験片及びバリ付き曲げ試験片を作成し、バリ無しの場合と同様の評価も行った。以上の試験はすべて圧接のままの継手に関するものである。

3. 結果及び考察

3.1 摩擦圧接部の形状及びマクロ組織

摩擦加熱時には激しく火花を飛ばしながら摩擦面近傍が赤熱し、若干のバリを形成する。摩擦加熱後、急停止し、アップセット推力が加わる時に高温による軟化部が突出して大きなバリを形成し、この時外面は最高温度を示す。バリの形状及び断面内の発熱状況、すなわち温度分布は圧接条件によって異なる。これらの状況の例を Photo. 1 に示す。Photo. 1 は圧接面の縦断面であり、

Photo. 1. Macro-structures of friction welded joints ($t_2=11$ s).

上下のバリを結ぶ変色部は温度上昇による β 化域及び熱影響部である。

摩擦発熱は摩擦面の相対すべりによつて発生するのであるから、単位面積当たりの発熱量は回転軸からの距離に比倒する。すなわち中心の発熱はなく、最外周で最大である。実際には最外周は高速回転により空冷されるから、やや内部が最高温度になつていゝと考えられる。

Photo. 1(a)において、摩擦時間 t_1 が2.2sの時、中心部の熱影響部の幅が狭いのは上述の結果と考えられる。摩擦時間 t_1 が長くなれば中心部の熱影響部の幅は

急速に増大し、全断面内で、ほぼ同一となる。これは中村ら²⁾が指摘するように、中心から離れるほど材料は軟化するため、摩擦圧力を与える推力の分布面積がより高強度の中心部に集中する傾向となり、面圧が増大して発熱し、全断面にわたつて熱的に平衡状態に達するためと考えられる。

3.2 硬さ分布及びマイクロ組織

圧接部の組織変化部を横切つて試験片の長さ方向に硬さ分布を測定した結果を Fig. 4 に示す。圧接部近傍の硬さは、若干、母材部より高くなつてゐるが著しい差が

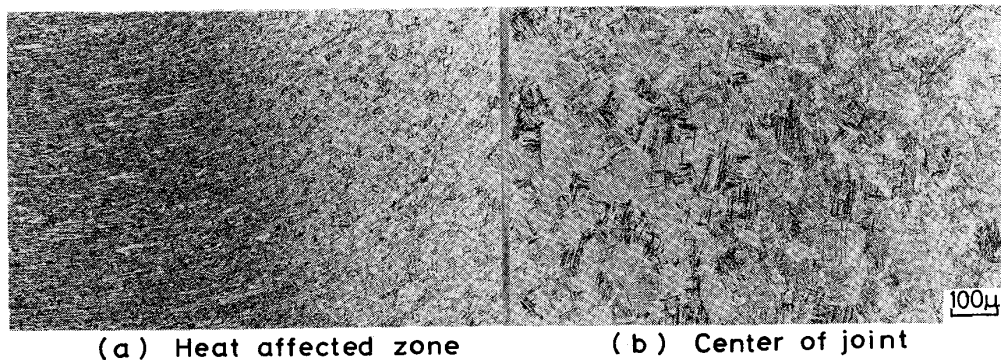
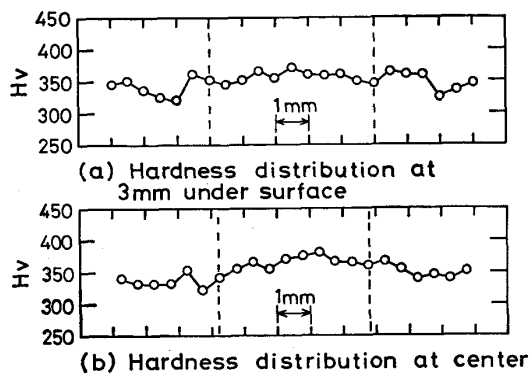


Photo. 2. Micro-structures at 3 mm under surface of friction welded joint.

Fig. 4. Hardness distribution at friction welded joint (Dotted lines show the width of heat affected zone. $t_1=4.3$ s, $P_1=0.83$ kgf/mm², $t_2=10$ s, $P_2=5.1$ kgf/mm²).

ないことがわかる。しかしたとえ Fig. 4 に示す程度の差であっても摩擦圧接部強度は確実に増大しており、後に示す摩擦圧接適正作業条件で圧接し、引張試験に供した 43 本の試験片のすべてが圧接部ではなく母材部で破断した。Photo. 2 は Fig. 4 と同一試験片の外表面下 3 mm の位置のマイクロ組織である。熱影響部近傍はバリを生ずることに対応するメタルフローが発生しており、圧接中心部は明らかに β 域に変態している。この変態部の β 粒径は β 域鍛造あるいは β 域熱処理で得られる粒径よりも細粒であつて、約 100 μ m 以下である。これは摩擦加熱による β 域の高温部がアプセットによりバリとして除去され、 β 域の低温加熱部のみが残されたためと考えられる。すなわち Photo. 2 は低温 β 域加工組織である。

3.3 引張性質に及ぼす摩擦圧接条件の影響

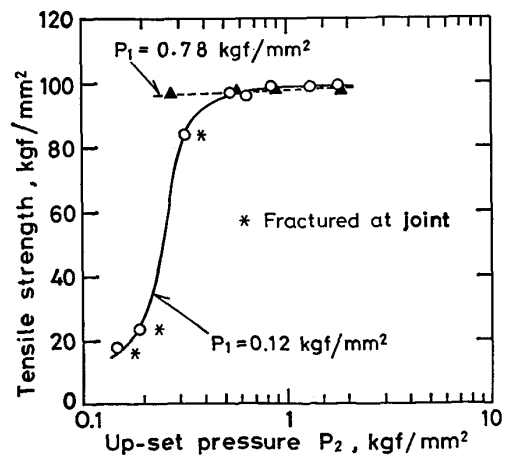
摩擦加熱には摩擦時間 t_1 と摩擦圧力 P_1 が関与するが、Photo. 1 (a) に示した組織及びこの圧接条件の継手が母材から破断したことから、摩擦圧力が 0.25 kgf/mm² でも摩擦時間が 2.2 s で十分な圧接可能温度に到達していることがわかつた。アプセット時間の圧接部引

張強さに及ぼす影響を、摩擦時間が 2.2 s、摩擦圧力が 1.5 kgf/mm²、アプセット圧力が 3.9 kgf/mm² の条件で、アプセット時間が 0.3、0.6 及び 1.8 s について調べたが、すべての試験片が母材部から破断した。したがつて少なくともアプセット時間は 0.3 s 以上保持すれば良いことがわかる。

そこで摩擦時間とアプセット時間が十分である時間として、それぞれ、3.9 s 及び 5.3 s とし、摩擦圧力とアプセット圧力を変化させ、これらが引張強さに及ぼす影響を調べた。結果を Fig. 5 に示す。図中、*印は圧接部から破断し、ほかはすべて母材部から破断した。以上の結果から引張強さは摩擦圧力にも影響されるが、十分なアプセット圧力を加えることが継手の強さを確保する上で重要であることがわかる。母材強度以上の継手引張強さが得られる摩擦圧力とアプセット圧力との関係を 3.6 項で示す。

3.4 曲げ性質に及ぼす摩擦圧接条件の影響

前項と同様に摩擦時間を 3.9 s、アプセット時間を 5.3 s として摩擦圧力及びアプセット圧力を種々変化させ、これらの因子が曲げ強さに与える影響を調べた。曲げ強

Fig. 5. Effects of friction welding conditions on tensile strength ($t_1=4.2$ s, $t_2=5.5$ s).

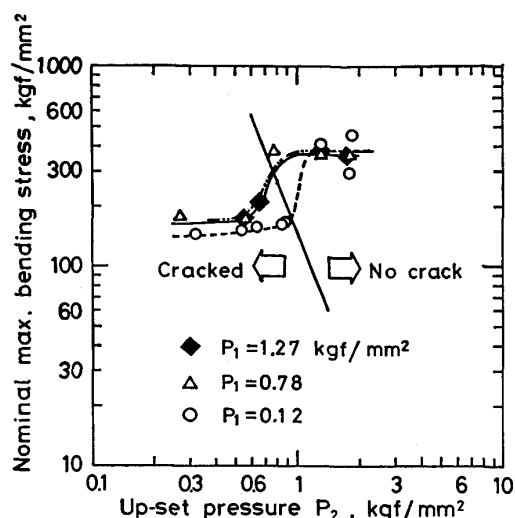


Fig. 6. Effects of friction welding conditions on bending strength ($t_1=3.9$ s, $t_2=5.3$ s).

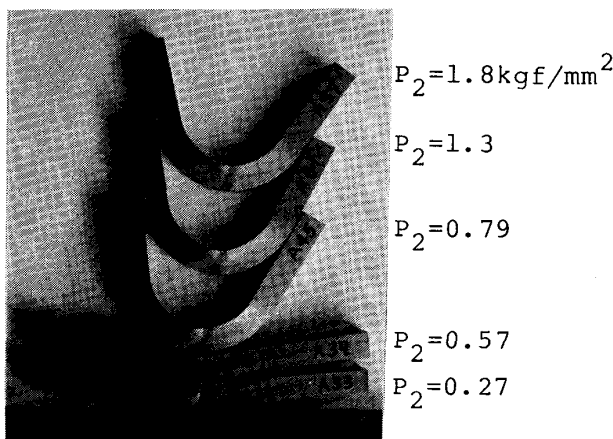


Photo. 3. Appearance of fractured bending test specimens ($t_1=3.9$ s, $P_1=0.78$ kgf/mm², $t_2=5.3$ s).

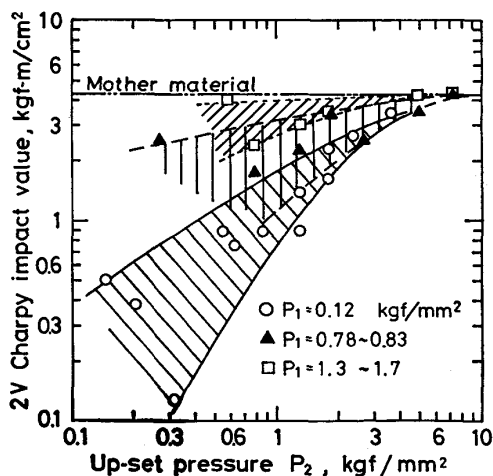


Fig. 7. Effects of friction welding conditions on Charpy impact value ($t_1=3.9$ s, $t_2=5.3$ s).

さは、曲げ試験での最大荷重 P から $\sigma = (3Pl) / (2BH^2)$ を用いて計算した応力 σ を用いた。ここで l は Fig. 3

における支点間距離 152 mm, B は試験片の幅 18 mm, H は試験片の高さ 16.5 mm である。得られた結果を Fig. 6 に示す。この図から曲げ強さも摩擦圧力に影響されるが、アプセット圧の影響が大きいことが知られ、十分なアプセット圧を加えることにより曲げ強さは増大し、曲げ歪みは圧接部以外にも分散して、 $R=2t$ の曲げ変形能を有するに到る。Photo. 3 は曲げ試験片の外観の例である。

3.5 シャルピー衝撃値に及ぼす摩擦圧接条件の影響

引張性質及び曲げ性質の場合と同様に、摩擦時間を 3.9 s, アプセット時間を 5.3 s とした場合について、シャルピー衝撃値に及ぼす摩擦圧力とアプセット圧の影響を調べた結果を Fig. 7 に示す。シャルピー衝撃値も摩擦圧力の影響を受けるが、アプセット圧の影響が重要であり、アプセット圧力がほぼ一定値以上でシャルピー衝撃値は一定値に達する。本実験では母材のシャルピー衝撃値 (4.2 kgf-m/cm²) に一致した。母材の性質と同等の性質が得られる摩擦圧力とアプセット圧力との関係を 3.6 項で示す。

3.6 摩擦圧接適正条件

3.3, 3.4 及び 3.5 の結果をまとめて、各性質が母材の性質と同等以上になる領域を、摩擦圧力とアプセット圧力との関係で示せば Fig. 8 となる。各曲線の上側では性質が母材と同等以上となる領域であり、この領域で圧接された継手は母材と同性質と考えてよい。引張試験の場合は圧接部の方が強くて母材が破断する領域を示し、曲げ試験の場合は $R=2t$ の 180° 曲げを達成する領域を示し、シャルピー衝撃試験の場合は母材の性質と同等になる領域を示す。図から田崎ら⁵⁾ 及び橋本ら⁹⁾ が解説しているとおおり、アプセット圧力が継手性質に大き

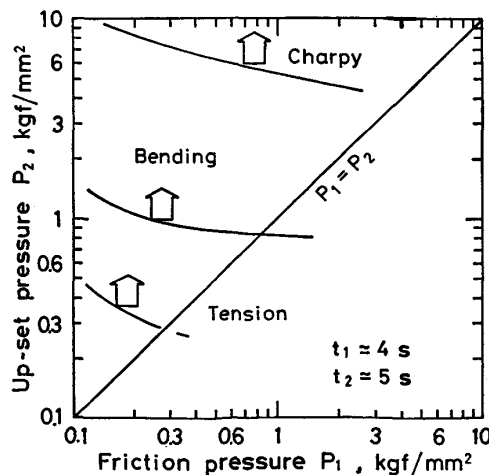


Fig. 8. Relation among friction pressure, up-set pressure and friction welding range.

な影響を与えることがわかる。本実験の範囲では継手性質の評価法としてはシャルピー衝撃試験が最も厳しい方法であることがわかる。なお炭素鋼についても引張試験と曲げ試験とを比較すれば、曲げ試験の方がより厳しい評価となるとの報告がある⁹⁾。

摩擦圧接サイクルの制御には時間制御と寸法制御があるが¹⁾、アプセット圧力が継手性質に大きな影響を与えることが判明したから、寸法制御法を用いる場合でも必要なアプセット圧力が得られているかどうかについて注意を払わなければならない。なお継手の性質に強い影響を及ぼすのはアプセット寄りしろ（アプセット時の寸法変化量）であるとの解説がある⁹⁾。しかし Fig. 5 に示す引張性質及び Fig. 6 に示す曲げ性質を見れば、摩擦圧力がある値以上ではアプセット圧力が摩擦圧力以下でも（この場合、アプセット寄りしろはない）性質は母材と同等またはそれ以上に達している。これらの結果からアプセット圧力が圧接性質に対し本質的な役割を果していると考えられる。これは材料構成元素の自己拡散が容易に起こる十分な温度に供試材を昇温させ、かつ材料間の界面を十分密着させて拡散接合を容易に起こさせることに相当するものと考えられる。アプセット寄りしろは拡散接合後、さらに加工を加えて鍛錬し、これによる結晶粒の微細化の効果を与えるから、母材の強度と比較して圧接部の方がより強化されると考えられる。

3.7 バリがある継手性質に及ぼす摩擦圧接条件の影響

摩擦圧力を 0.12 から 0.78 kgf/mm² の範囲、アプセット圧力を 0.46 から 6.54 kgf/mm² の範囲で変化さ

せ、バリを除去しない摩擦圧接継手の引張破断位置に及ぼす圧接条件の影響を調べた。用いた試験片は丸棒の圧接後、Fig. 9 に示すようにバリを残した板状試験片である。板状にした理由は、圧接のままの試験片では引張荷重が大きくなるためチャック部から破断するおそれがあること、及び、破断状況を観察しやすくするためである。なお板状にすることは丸棒のままより応力集中率を若干高めることになるため、切り欠きの形状はより厳しい側となっている。破断後の引張試験片の状況の例を Photo. 4 に示す。この写真から知られるようにアプセット圧力が小さい時は圧接部界面から破断するが、アプセット圧力が增大すると母材部から破断した。圧接条件と引張強さとの関係を Fig. 10 に示す。バリ付き引張試験片の場合も、バリなしの場合と同様に引張強さには摩擦圧力とアプセット圧力が影響を及ぼすが、3 kgf/mm² 以上のアプセット圧力を加えれば破断は母材部で起こり、強さは最大となる。

バリ付き引張強さに関する調査と同じ目的で曲げ性質

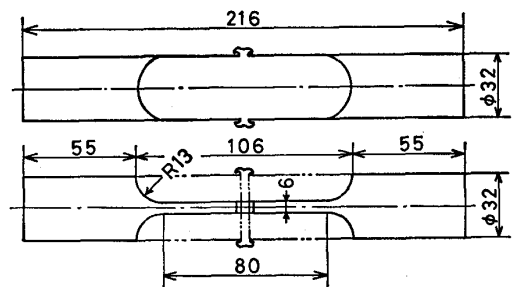
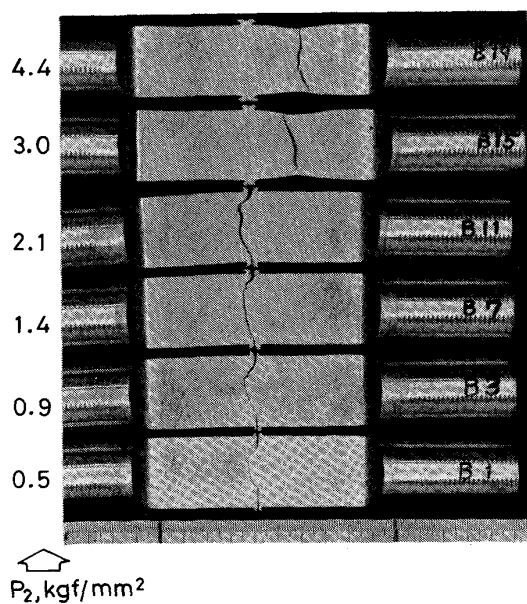
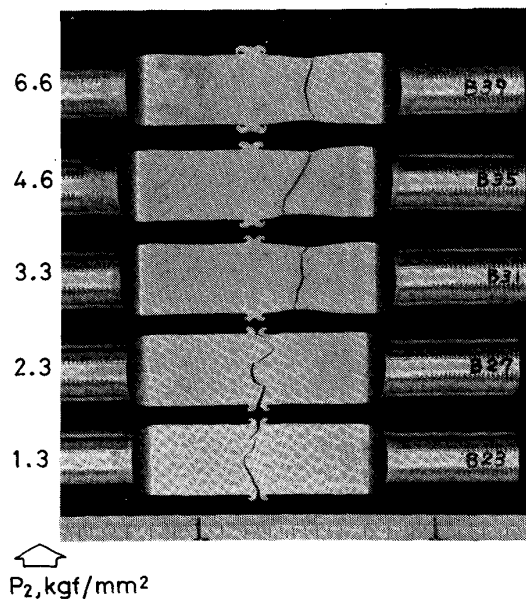


Fig. 9. Tensile test specimen with burr (mm).



(a) Friction welded under $P_1=0.12$ kgf/mm²



(b) Friction welded under $P_1=0.78$ kgf/mm²

Photo. 4. Appearance of fractured tensile specimens with burr ($t_1=4.2$ s, $t_2=5.5$ s).

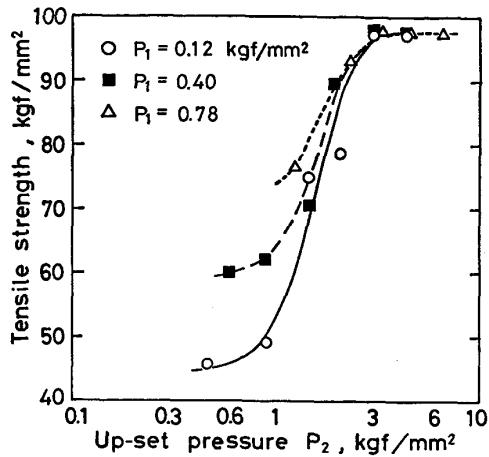


Fig. 10. Effects of friction welding conditions on tensile strength at joint with burr ($t_1=4.2$ s, $t_2=5.5$ s).

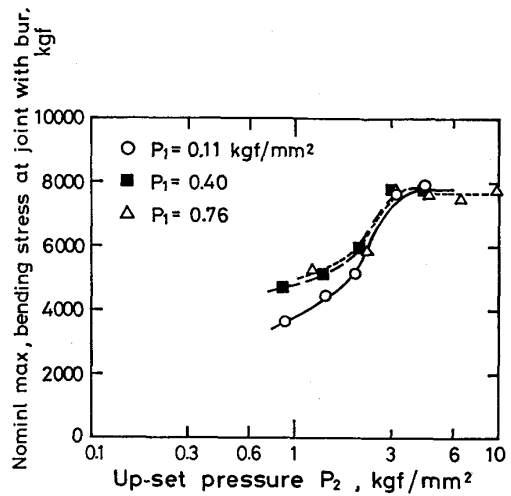


Fig. 12. Effects of friction welding conditions on bending strength at joint with burr ($t_1=4.2$ s, $t_2=5.5$ s).

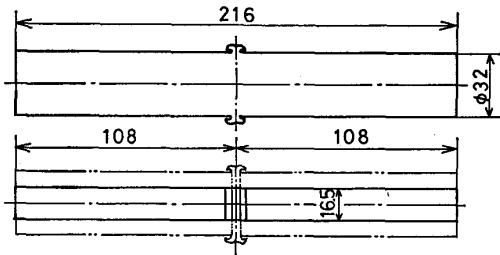


Fig. 11. Bending test specimen with burr (mm).

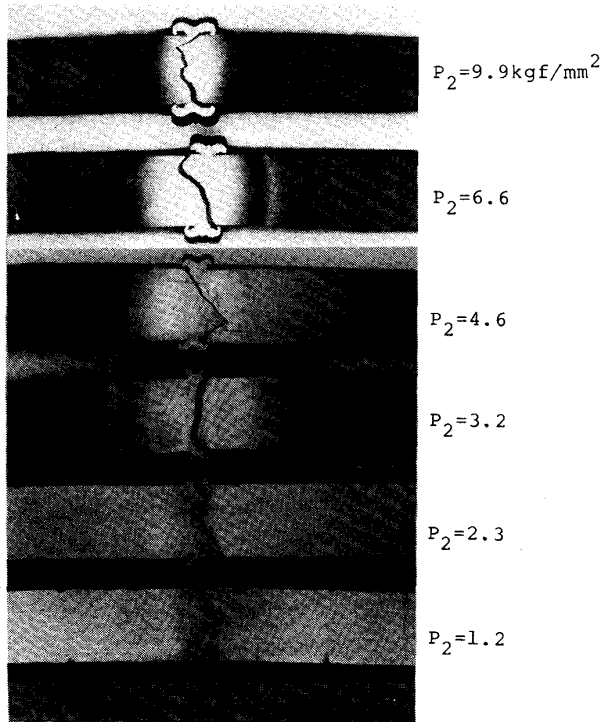


Photo. 5. Appearance of fractured bending test specimens with burr ($t_1=4.2$ s, $P_1=0.76$ kgf/mm², $t_2=5.5$ s).

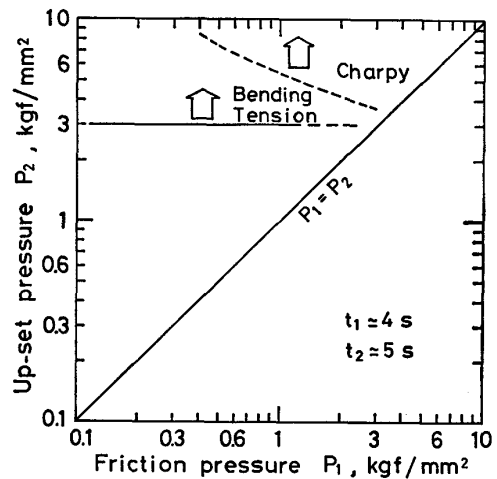


Fig. 13. Relation among friction pressure, up-set pressure and friction welding range of specimen with burr.

についても調べた。試験片の形状を Fig. 11 に示し、破断状況の例を Photo. 5 に示す。試験方法は Fig. 3 と同じである。アプセット圧力が小さいとき破断は圧接部境界で起こるが、アプセット圧力が增大するとバリの根元から破断した。これは圧接部境界が母材と同等以上に強化されているが、バリの存在による応力集中部があるためと考えられる。圧接条件と折損までの最大荷重との関係を Fig. 12 に示す。この場合もバリなしの場合と同様に、曲げ強さには摩擦圧力とアプセット圧力が影響を及ぼすが、3 kgf/mm² 以上のアプセット圧力を加えれば破断は圧接界面以外の位置となり、強さは最大となる。

以上の結果からバリ付き試験片の引張強さ及びバリ付き試験片の曲げ強さが母材と同等となる範囲と圧接条件

との関係を Fig. 13 に示した. Fig. 13 には Fig. 8 に示したシャルピー衝撃値の最大値が得られる範囲も併示した.

Fig. 8 と Fig. 13 とを比較すれば, バリ付き試験片の引張強さの最大値が得られるアプセット圧力はバリなし試験片の場合の約 10 倍であり, 曲げ強さの場合は約 3 倍のアプセット圧力が必要であることがわかる.

引張試験片の場合, 切り欠きがあればむしろ強化されるが, アプセット圧力が低い場合は圧接部境界の切り欠き部から破断し, かつ破断強さも低い. これは Fig. 5 に示したように, 圧接部の中心部では母材以上の強さを有していることから圧接部の半径方向の強さ分布に変化があり, 中心が高く, 周辺ではかなり低いことを意味しており, これを均質化するためにはアプセット圧力を増大させればよいことを示す.

バリ付き試験片の曲げ強さの最大値が得られるアプセット圧力がバリなしの場合の約 3 倍であつて, 引張強さの場合より倍率が低い理由は次のように考えられる. バリなし引張試験片の直径は 14 mm であつて圧接試験片の直径の中心部の 44% (表面から 9 mm 以内) であり, 断面の高強度部分を評価している. 一方, バリなし曲げ試験片の対角線長さは 24.4 mm であつて圧接試験片の直径の中心部の 76% (表面から 3.8 mm 以内) であり, 応力勾配があるために圧接強さのかなり弱い部分を評価しているためと考えられる.

バリ付き引張試験及びバリ付き曲げ試験による適正圧接条件の評価結果とシャルピー衝撃試験による評価結果はなお異なつており, 摩擦圧接作業条件はシャルピー衝撃値が母材と同等になるアプセット圧力を選べば, 引張強さ及び曲げ強さともに母材と同等の性質を有する継手が得られることがわかつた.

4. 結 論

Ti-6Al-4V 合金丸棒の摩擦圧接継手の良好な継手性

質を得る作業条件を明らかにするため, 作業条件を種々変化させ, それらが継手性質に与える影響を調べた. 評価法として引張試験, 曲げ試験及びシャルピー衝撃試験を行つた. 得られた結果は次のとおりである.

(1) 回転数 2400 rpm では大気中で摩擦圧接が可能であり, 摩擦圧力 0.25 kgf/mm^2 でも摩擦時間が 2s で十分圧接可能温度に到達する. アプセット時間も 0.3s で十分な強度が得られる.

(2) 継手性質にはアプセット圧力の影響が最も大きい.

(3) 引張強さ, 曲げ強さ及びシャルピー衝撃値を母材と同等以上にするために必要なアプセット圧力は, 引張強さ, 曲げ強さ及びシャルピー衝撃値の順に高くなる.

(4) バリ付き継手の場合, 母材と同等以上の性質を得るための最小アプセット圧力は, バリなし継手と比較して引張強さの場合約 10 倍以上, 曲げ強さの場合約 3 倍以上となり同じ値となる. しかし, シャルピー衝撃値に関するそれが最も高い.

文 献

- 1) 荒田吉明, 西口公之: 溶接法の基礎(溶接全書 2) (1979), p. 145 [産業出版]
- 2) 中村 孝, 塩飽万寿男, 浜崎正信, 手塚敬三: 圧接とろう接(溶接技術講座 2) (1964), p. 318 [日刊工業]
- 3) 松木孝夫, 昇祥一郎: 溶接技術(1982-5), p. 41
- 4) (株)豊田自動織機製作所研究課: 機械工作, 13 (1966) 95, p. 73
- 5) 田崎義男, 平井幸男: 金属材料, 11 (1971) 8, p. 91
- 6) C. J. CHEN: Friction Welding of Titanium Alloys and Zircalloys (1963, Autumn Meeting, the Institute of Welding, London, England)
- 7) C. G. NESSLER, D. A. RUTZ, R. D. ENG and P. A. VOZZELLA: Weld. J., 50(1971). p.379-S
- 8) 蓮井 淳: 機械の研究, 23(1971), p. 723
- 9) 橋本達哉, 岡本郁男: 固相溶接・ろう付(溶接全書 9) (1979), p. 66 [産業出版]