

日本機械学会論文集(C編)
50巻451号(昭59-3)

アルミニウム材料の圧接条件に関する研究*

(第1報, 面圧および表面積拡大比の影響)

中村 保**, 近藤一義**, 杉本章***
Tamotsu NAKAMURA, Kazuyoshi KONDO, Akira SUGIMOTO

Key Words: Forming, Pressure Welding, Aluminum, Contact Pressure, Surface Expansion Ratio, Bond Strength, Parent Strength

1. 緒 言

近年, 塑性加工では, その適用範囲の拡大に伴い, より複雑な形状製品への適用が重要な課題となってきた。その解決策の一つとして, 塑性加工に圧接過程を組込むことが可能になれば, 単独の加工だけでは達成し得ない複雑な形状製品への適用範囲も一段と拡張できるものと考えられる。

圧延, 押出しなどによる金属クラッド材の製造以外に, 圧接を機械部品の塑性加工に組込む試みとして, 工藤らは材料分流式圧接法について^{(1)~(4)}, 和田林らは異種材料のフランジ部と軸部のすえ込み圧接について⁽⁵⁾, 近藤らは円柱の側面圧接および円板と軸の圧接について⁽⁶⁾, 検討を行っている。これらの応用研究の展開には, 圧接機構の基礎的解明が重要な鍵となる。

常温圧接は, 棒, 線, 管および板材の接合法およびクラッド材の製造法として実用化され^{(7)~(9)}, この分野において, 古くから圧接機構の解明が行われてきた^{(10)~(24)}。また, 上述の応用研究に先立って, 接合強度に影響を及ぼす種々の因子について詳細な検討が試みられている^{(25)~(30)}。これらの基礎的研究の結果, 接合強度に重大な影響を及ぼす因子として, 表面積拡大量, 面圧, 表面性状および温度等が指摘され, それらの影響が定性的にはあるが明らかにされつつある。しかし, これらの各影響因子がどの程度の値に達したとき, 完全な接合強度(例えば, 一体材と同じ引張強さ)が得られるかという, 圧接限界条件の定量的関係は現在なお確立されていない。

本研究では, 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, 工業用純アルミニウム材料を用いて, 完全な接合強度を得るための圧接限界条件式の確立を試みる。また, 圧接性の向上を図るという観点から, 接合時の温度を高めることにより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。

本報では, 常温において, 表面積拡大量および面圧を独立に広範囲に変更して圧接試験を行い, 接合強度に及ぼす両因子の影響を定量的に評価することを試みた結果, 2因子表示による圧接限界条件式を明示することがわかったので, ここに報告する。

2. 実験方法

本研究では, 接合強度に及ぼす表面積拡大量と面圧の影響をそれぞれ分離して定量的に把握するため, それらの因子を独立に広範囲に変更し制御できること, およびそれらの各条件に対応する接合強度を精度よく測定できることが重要な鍵となる。

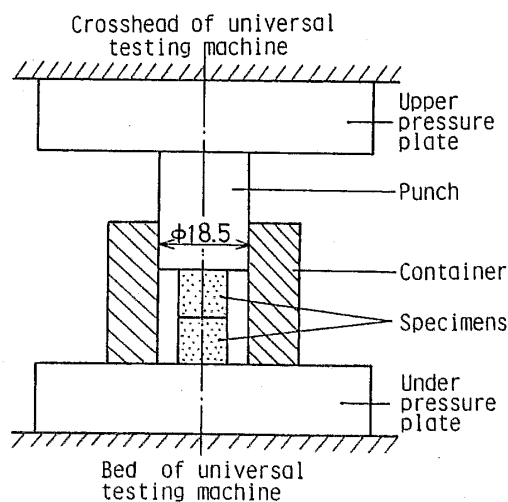


図1 圧接試験装置

* 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)。

本実験では、図1に示すように、油圧駆動式万能試験機(最大ひょう量 294 kN{30 tf})を用いて、拘束リング内で同一寸法の2個の円柱試験片を端面圧接する方法を採用する。この方法では、試験片はその初期寸法および工具面との摩擦条件に応じて異なった材料流れを生じ、拘束リング内に充満した段階で塑性変形は停止し、接合界面での表面積拡大量の分布が定まる。本研究では、表面積拡大量を表す尺度として、表面積拡大比 X を用いる。次章で示すように、本実験では表面積拡大比 X を2~10の間で変更することができる。一方、面圧 p は、材料の拘束リング内への充満後、さらに荷重を増大させることにより、降伏応力以上の任意の値に変更することができる。なお、材料が拘束

リング内に充満するまでの変形過程において、工具面との摩擦が大きい場合には、図2に示すように⁽³¹⁾⁽³²⁾、接合面においても中心部ほど高い面圧分布を示すが、充満がほぼ完了する平均面圧 $\bar{p}=216$ MPa{22 kgf/mm²}では、ほぼ一樣になることがわかる。そこで、本実験では、 $\bar{p}=196$ MPa{20 kgf/mm²}を下限として、最大 980 MPa{100 kgf/mm²}までの間で変更し、平均面圧 \bar{p} によって検討を進めることにする。この場合の面圧の差異は、図2からわかるように、平均面圧 \bar{p} に対し ± 30 MPa{3.1 kgf/mm²}の範囲におさまり、その誤差はほぼ無視しうるものと考えられる。

4章で詳述するように、接合強度は圧接後の試験片各半径位置から切出した引張小試験片の引張強さとして、精度よく測定でき、表面積拡大比 X および面圧 \bar{p} との定量的対応関係を得ることが可能となる。

本実験に用いた拘束リング、ポンチおよび下部圧板などの主要工具は、材質 SKS 3 (硬さ HRC≒60)である。拘束リング内径およびポンチ径は 18.5 mm で常に一定とし、ポンチ面および下部圧板は研削仕上げ(表面あらさ $R_{max}=2\sim3 \mu\text{m}$)とした。

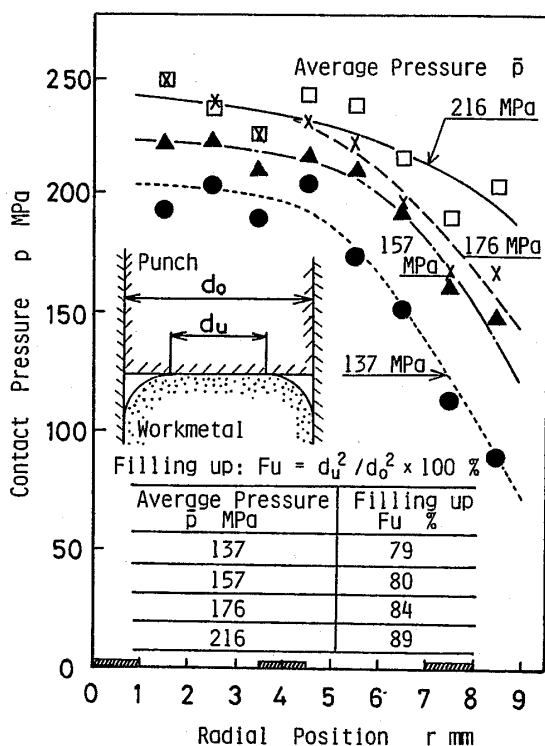
圧接試験用素材として、工業用に多用される金属中、圧接性が特に優れているとされる工業用純アルミニウム A 1050 を用いる⁽¹⁾⁽³⁾。試験片は熱間加工終了材の直径 16 および 18 mm の丸棒より、所定の寸法に旋削後、400°C、1時間焼なまし処理された。表1に、圧縮試験の結果、および試験片寸法と充満時圧下率、平均表面積拡大比を示す。試験片はいずれも直径対高さ比 1:1 で、直径 10、11 および 12 mm の3種類とした。

試験片接合面の表面処理方法は、接合強度に重大な影響を及ぼすことが知られているが、工藤ら⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾および近藤ら⁽²⁷⁾は無潤滑切削法が最も優れた圧接性を示すことを指摘している。そこで本実験では、無潤滑で旋削後、空气中で 400°C、1時間焼なまし処理を施した表面を検討の対象とした。表1に示すように、その表面あらさは $R_a \approx 0.25 \mu\text{m}$ である。

工具面と試験片端面の摩擦条件は、前述のように、表面積拡大比 X の分布に影響を及ぼすが、 X を広範囲に変化させるため、摩擦拘束の大きい無潤滑状態(トルエ

表1 供試材の性質および試験片の寸法

Material	True Stress-Strain in Compression Test		Surface Finish
A1050 annealed	$\sigma = 125 \epsilon^{0.29}$ MPa		Turning without any lubricants Surface Roughness $R_a \approx 0.25 \mu\text{m}$
Diameter	Height	Reduction Re	Average Surface Expansion Ratio \bar{X}
10 mm	10 mm	71.1 %	3.48
11	11	64.8	2.88
12	12	58.1	2.42



1 MPa = 0.102 kgf/mm²

図2 面圧分布

ン脱脂後乾燥)を標準とし、比較のため摩擦拘束の小さい牛脂潤滑についても検討する。なお、拘束リング内面には、常に牛脂潤滑剤を塗布した。

圧接は、本実験では常温(約13~25°C)にて行う。加圧速度は低速で一定(約0.05 mm/s)とし、所定の面圧に約10秒間保持した。負荷面圧保持時間を30分まで延長してみたが、接合強度には全く変化が生じないことを確認している。圧接では、接合強度にばらつきが生じやすいため、同一条件で必ず5回の試験を繰返し、すべての結果を検討の対象とした。

3. 表面積拡大比の分布

接合界面での表面積拡大比 X の分布を実測するため、一方の円柱試験片の端面に、半径1 mm 間隔の同心円を描き、接合が生じないように、合わせ面に低粘度鉱油を適用して、拘束リング内に充満するまで圧縮加工した。同心円の初期直径と圧縮加工後の直径を測定し、各同心円間の表面積拡大比 X の値を、加工後の平均半径位置 r に対して示すと、図3(a)および(b)のようになる。図には、同一条件で3回ずつ実測した結果を示してあるが、測定値はいずれも約±10%のばらつきの範囲内におさまっている。また、

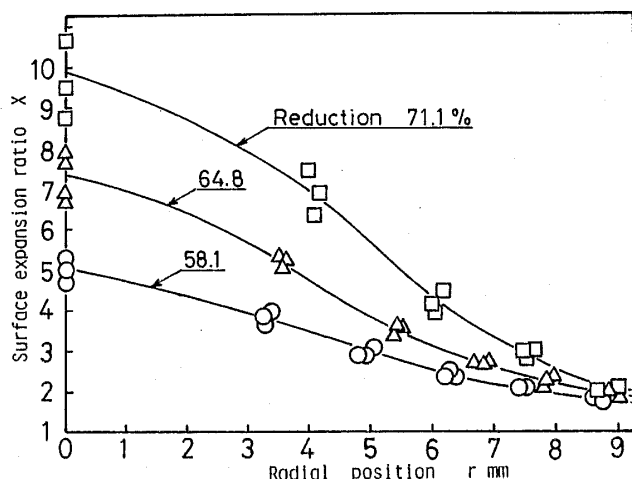
これらの分布から計算される平均表面積拡大比 \bar{X} は、試験片外径の変化より実測された値と一致することが確認された。

図3において、(a)工具との摩擦面を無潤滑とした場合には、いずれの圧下率 R_e の場合にも、外周部より中心部に向かうほど表面積拡大比 X が顕著に増大している。これは、図4に示すように、工具面の摩擦拘束により円すい状のデッドメタルが形成され、特に中心部の拡大が促進されるためと考えられる。この条件では、表面積拡大比を $X=2\sim10$ の範囲で変更しうることがわかる。一方、(b)工具面を牛脂で潤滑した場合には、変形が一様化するため、表面積拡大比 X の分布も、外周部で $X=2$ から中心部で $X=2.5\sim3.5$ 程度となっている。ただし、圧下率 $R_e=71.1\%$ の場合、 $r=5\text{ mm}$ で極大値 $X=4$ を示している。

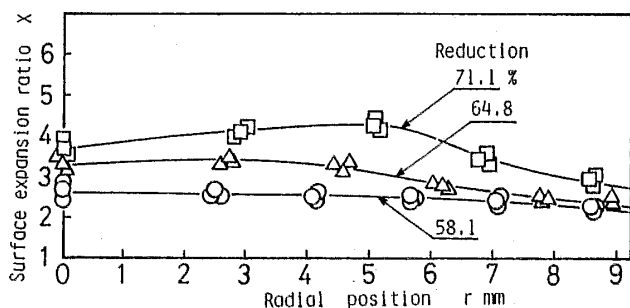
以下、本報では、変形後の各半径位置 r における表面積拡大比 X として、図3に示される各値を用いて検討を進める。

4. 接合強度の測定方法および評価尺度

図3に示したような表面積拡大比 X の分布に対応して、各半径位置における接合強度の分布を測定する。図5に示すように、圧接後の直径18.5 mm、厚さ5.8~10 mmの円板状試験片の各半径位置(主として3箇所)から引張小試験片(1~3の黒く塗りつぶした部分)を切出し、ねじ駆動式万能試験機(最大ひょう量19.6 kN(2tf))を用いて、引張強さ S_T を測定する。こ



(a) Without any lubricants



(b) Lubriation with tallow

図3 表面積拡大比の分布

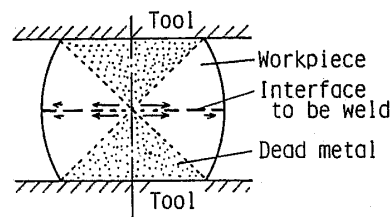


図4 工具面摩擦大の場合の圧縮変形モデル

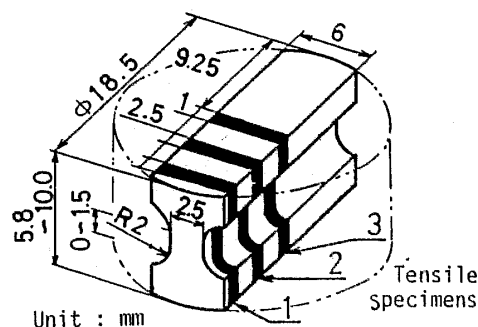


図5 引張小試験片の切出し

の値を接合強度とするが、試験片は厚さ1 mm, 全長5.8~10 mm, 測定部最小幅2~2.5 mm, 切込み半径1.5~2 mm とかなり小さいため、その測定精度および試験片製作過程の影響について検討する必要がある。

試験片の製作は、図5および図6に示すように、(i)砥石切断機による円板から幅6 mmの角棒への切断、(ii)エンドミルによる平行部(幅2.5 mm)の切削、(iii)砥石切断機による厚さ1 mmの試験片のスライス加工、の順に行われる。そこで、一体材について、図6中に示したように、引張小試験片製作の各段階で焼なまし処理を加えた4種類の試験片を用いて、引張強さの分布を調べてみた。図6において、測定値に最大約10%のばらつきがみられるが、各種試験片における測定値間に有意の差異は認められず、製作過程における切断や切削等による影響は、ほぼ無視しうることがわかる。実線で示すように、引張強さ S_T は中心部ほど大きくなる傾向を示すが、これは素材自身の材料性質の分布によるものと考えられる。図6において、破線は、直径11 mmの引張試験片(JIS 4号相当)の引張強さ $\bar{S}_T=73.5$ MPa{7.5 kgf/mm²}を示したもので、この値は、実線の引張強さ S_T の分布から求められる平均値 $\bar{S}_T=72.5$ MPa{7.4 kgf/mm²}とよく一致することが確認された。

本実験では、以上のような小試験片による引張強さ S_T の測定を同一圧接条件で必ず5回行い、その平均値およびばらつきを検討の対象とすることになっているが、上述の結果から、一体材でも約10%程度のばらつきを有することを考慮して検討を進める。

The specimens are annealed at each stage.
1 MPa = 0.102 kgf/mm²

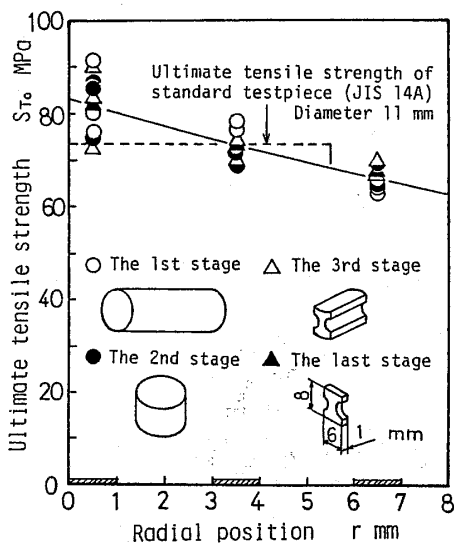


図6 小試験片による引張強さの測定精度検定

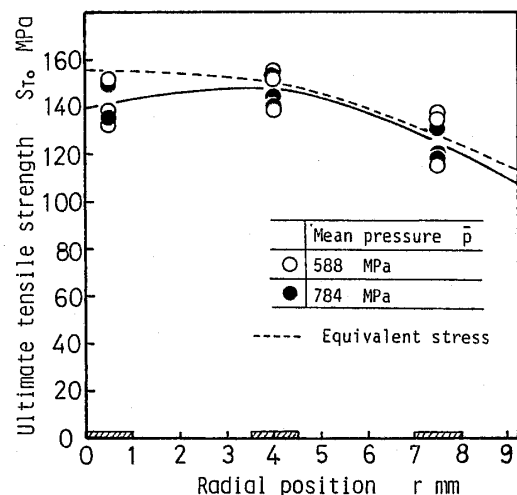
圧接面が完全に接合されたかどうかを定量的に評価するため、圧縮変形による加工硬化を考慮した一体材の引張強さ S_{T0} に対する接合材の引張強さの割合、すなわち、継手効率 η を次のように定義する。

$$\eta = (S_T/S_{T0}) \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

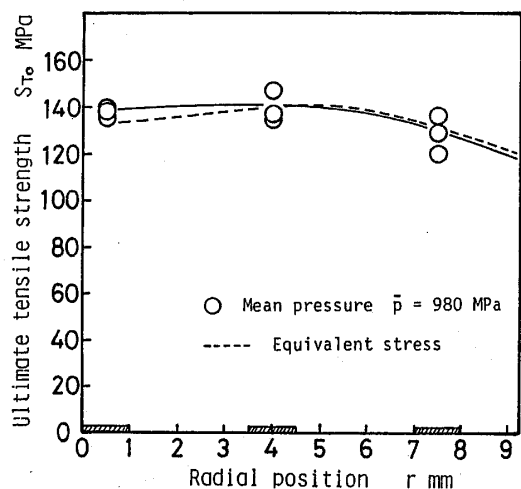
ここで、基準の強さとなる一体材の引張強さ S_{T0} としては、圧接試験片2個を重ね合わせたものと同一寸法の一体素材を、圧接試験の場合と同一の圧下率および摩擦条件で圧縮加工し、対応する各半径位置から切出した小試験片の引張強さを用いる。

図7(a)および(b)は、工具面摩擦条件を、それぞれ無潤滑および牛脂潤滑とした場合について、一体材の引張強さ S_{T0} の分布の一例(圧下率 $R_e=71.1\%$ の場合)を示したものである。図6の場合と同様に、測定値に±10%程度のばらつきがみられる。実線で示したそ

Reduction : 71.1 % , 1 MPa = 0.102 kgf/mm²



(a) Without any lubricants



(b) Lubrication with tallow

図7 一体材の引張強さの分布

の平均値は、(a)無潤滑の場合の方が、(b)潤滑の場合より、中心部でやや大きく、外周部でやや小さくなる傾向を示している。図中の破線は、素材の真応力-対数ひずみ関係 $\sigma = 125e^{0.29}$ MPa より求められた相当応力 σ_{eq} の分布を示したもので、実線とほぼ一致することがわかる。したがって、引張強さの半径方向分布も不均一変形による加工硬化程度の差異を示しているものと考えられる。表3(a)および(b)に、無潤滑および牛脂潤滑の場合について、各圧下率 R_e 、各半径位置 r に対する表面積拡大比 X および一体材の引張強さ S_{T0} をまとめて示しておく。

なお、図6および7に示されるように、一体材の引張強さの測定値に、 $\pm 10\%$ 程度のはらつきが存在することを考慮して、本実験では、完全な接合強度の得られる継手効率 η に10%の許容範囲を設ける。すなわち、継手効率 η が90%以上の場合には、完全な接合強度が達成されたものと判定することにする。

5. 接合強度に及ぼす面圧および表面積拡大比の影響

図8(a)~(c)は、工具面摩擦条件を無潤滑とした場合の接合材の引張強さ S_T の半径方向分布を示したもので、それぞれ圧下率 $R_e = 58.1, 64.8$ および 71.1% の場合である。図中、 \circ および \bullet の記号は、それぞれ平均面圧 $\bar{p} = 196$ および 980 MPa (20 および 100 kgf/mm²) の場合を示すが、(a) $R_e = 58.1\%$ では、高低両面圧の場合とも外周部から中心部に向うほど引張強さ S_T が増し、 \bar{p} が高いほど全体に大きな値を示している。特に、 $\bar{p} = 980$ MPa (100 kgf/mm²) の中心部では、

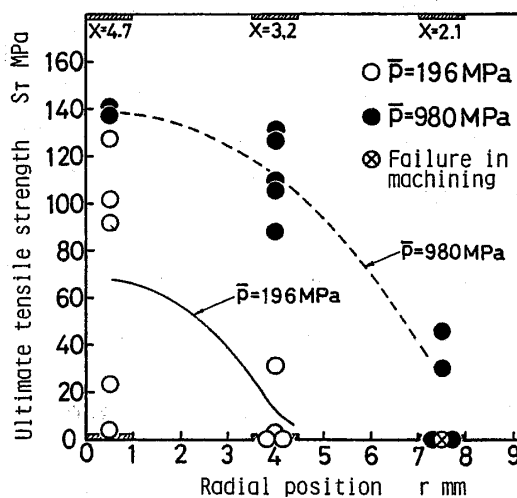
表2 一体材の引張強さと表面積拡大比

(a) Without any lubricants			
Reduction R_e %	Radial position r mm		
	0.5	4	7.5
71.1	142.1 (9.6)	145.0 (7.0)	124.5 (3.0)
64.8	127.4 (7.1)	137.2 (4.7)	117.6 (2.3)
58.1	136.2 (4.7)	136.2 (3.2)	120.5 (2.1)
(b) Tallow lubricants			
Reduction R_e %	Radial position r mm		
	0.5	4	7.5
71.1	138.2 (3.7)	142.1 (4.2)	128.4 (3.2)
64.8	133.3 (3.4)	134.3 (3.3)	123.5 (2.8)
58.1	129.4 (2.7)	116.6 (2.7)	116.6 (2.3)

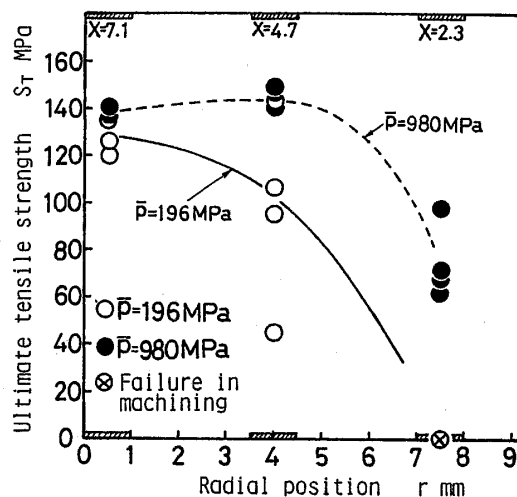
Upper row : Ultimate tensile strength S_{T0} MPa (1 MPa = 0.102 kgf/mm²)

Under row : Surface expansion ratio X

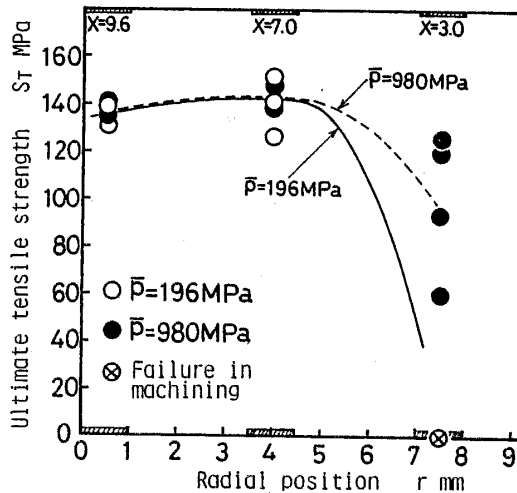
ばらつきもほとんどなく、一体材の引張強さ $S_{T0} = 136$ MPa (13.9 kgf/mm²) より大きな値にさえ達している。これに対し、低面圧 $\bar{p} = 196$ MPa (20 kgf/mm²) で



(a) Reduction 58.1 %



(b) Reduction 64.8 %



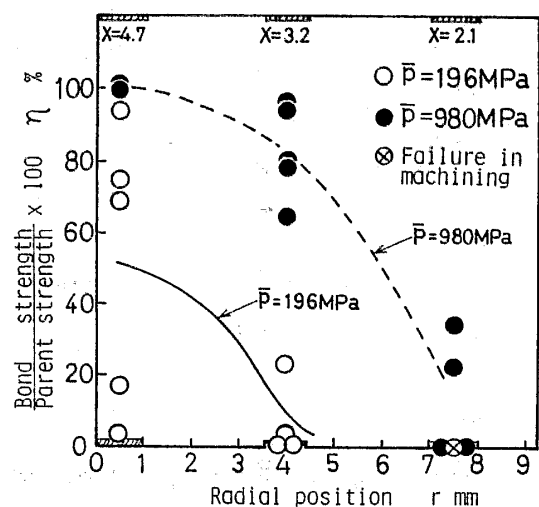
(c) Reduction 71.1 %

1 MPa = 0.102 kgf/mm²

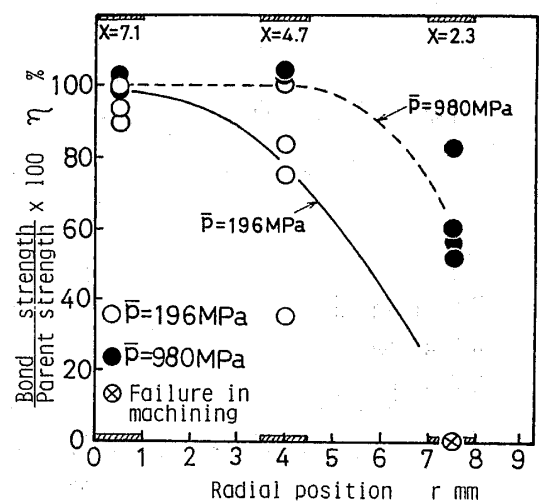
図8 接合材引張強さの半径方向分布(無潤滑)

は、中心部でもばらつきがかなり大きく、平均値も 80 MPa 程度とかなり小さい。圧下率 R_e が增大するの

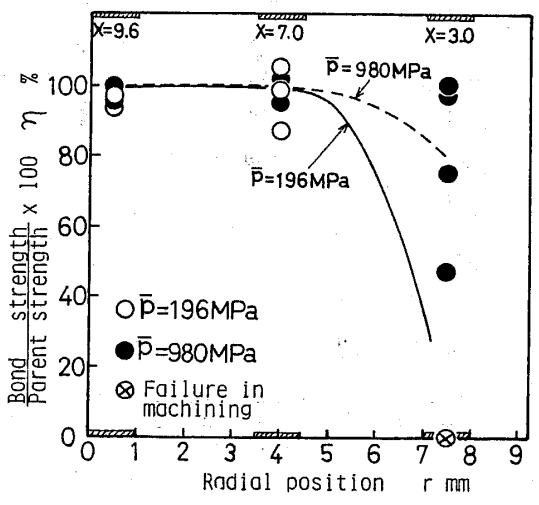
に伴い、引張強さは顕著に高まり、(b) $R_e=64.8\%$ では高面圧 $\bar{p}=980$ MPa の場合、(c) $R_e=71.7\%$ では高低両面圧 $\bar{p}=980$ および 196 MPa の場合に、半径位置 $r=4$ mm までが、 $S_r=140$ MPa に達するようになることがわかる。



(a) Reduction 58.1 %



(b) Reduction 64.8 %



(c) Reduction 71.1 %

図 9 継手効率の半径方向分布(無潤滑)

以上の結果を継手効率 η によって整理すると、図 9 (a)~(c) のようになる。これらの図において、完全な接合強度の達成すなわち $\eta \geq 90\%$ となる条件は、(a) では $\bar{p}=980$ MPa, $X=4.7$ (各図の上辺に記入) の場合、(b) では $\bar{p}=980$ MPa, $X=4.7$ 以上の場合および $\bar{p}=196$ MPa, $X=7.1$ の場合、(c) では $\bar{p}=980$ および 196 MPa, $X=7.0$ 以上の場合となっている。さらに、(c) では $r=6\sim 7$ mm ($X=4.3$) で $\eta \geq 90\%$ となることが確認されている。結局、低面圧 $\bar{p}=196$ MPa では表面積拡大比 $X=7.0$ 以上、高面圧 $\bar{p}=980$ MPa では $X=4.7$ 以上で完全な接合強度が達成されることがわかる。

工具面摩擦条件を牛脂潤滑とした場合の継手効率 η の分布を図 10 に示す。高面圧 $\bar{p}=980$ MPa の場合について、圧下率 $R_e=58.1, 64.8$ および 71.1% の結果をまとめて示してある。図 3 (b) の表面積拡大比 X の分布と対比させると、 X が大きいほど継手効率 η が高まるが、 $X=4.2$ となる $R_e=71.7\%$, $r=4$ mm の場合を除いて、いずれも継手効率 η が 90% 以上に達し得ないことがわかる。

このように、圧下率 R_e すなわち平均表面積拡大比 \bar{X} が同じでも、端面の摩擦条件によって表面積拡大比 X の分布に差異が生じ、結果として継手効率 η の分布が左右されることになる。したがって、圧接加工を行う場合には、材料流動状態を制御することにより、接合可能な領域を拡大しうることが示唆される。

図 11 (a) および (b) は、それぞれ継手効率 $\eta=50\%$

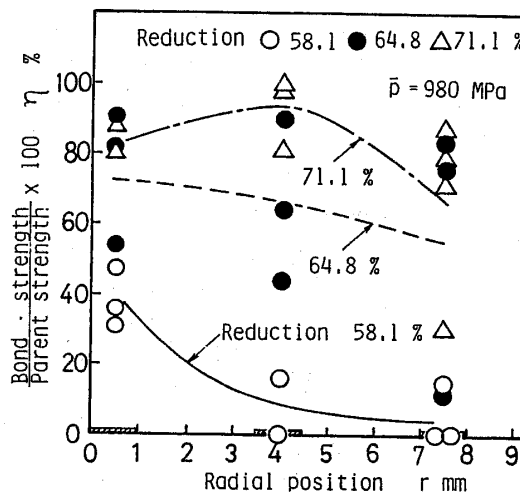


図 10 継手効率の半径方向分布(牛脂潤滑)

および100%の場合の接合界面近傍の縦断面を示す顕微鏡拡大写真であり、電解研磨後、約7%のふっ化水素水溶液(常温)で約15~20秒、エッチングしたものである。(a) $\eta=50\%$ の場合には、接合界面が連続的な線として明りょうに識別される。一方、(b) $\eta=100\%$ では、接合界面は連続的な線としては識別できないが、なお断続的な線が認められる。これは、常温では拡散が生じにくく、酸化膜が接合界面に分散して残留するためと考えられる。このように、多少の酸化膜が残留するにもかかわらず、一体材と同等の引張強さが得られるという理由については、Vaidyanathら⁽¹⁶⁾による拘束係数の考え方、あるいは接合部の局部的加工硬化などの機構が考えられる。この点は、圧接機構そのものにかかわる重要な問題であり、今後、さらに詳細な検討を試みたい。

6. 完全な接合強度を得るための圧接限界条件

図9および図10などの結果を総合し、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 をプロットすると図12のようになる。図中の円記号は、その黒く塗りつぶした面積によって継手効率 η の値を代表させたものである。●の記号は η が90%以上の場合、すなわち、完全な接合強度に達したと判定される場合を表している。また、多少小さな円記号は、図10の牛脂潤滑の場合の結果を表している。図12において、破線で示されるように、表面積拡大比 X と平均面圧 \bar{p} に対して、完全な接合強度が得られる条件範囲が明りょうに区分され、いわゆる、完全な接合強度を得るための限界の圧接条件が存在することがわかる。そこで、この破線を圧接限界線と呼ぶことにする。この限界線は、 $X=7$ 以上であれば、低面圧 $\bar{p}=196\text{ MPa}$ (20 kgf/mm^2)でも完全な接合強度が得られるのに対し、 $X=4$ 以下では、かなりの高面圧 $\bar{p}=980\text{ MPa}$ (100 kgf/mm^2)を加えても完全な接合強度に達し得ないことを表している。工具面の摩擦条件が異なる牛脂潤滑の場合にも、無潤滑の場合と全く同一の圧接限界線によって区分され、材料の流れの状態によって影響されない

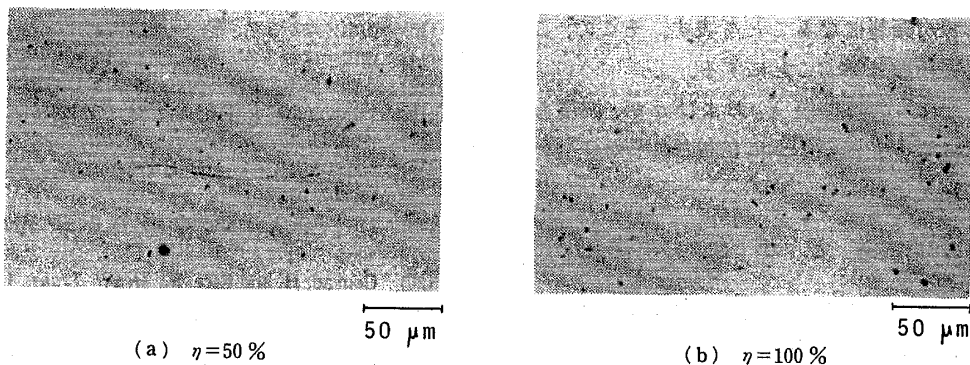


図11 接合界面近傍における縦断面の顕微鏡拡大写真

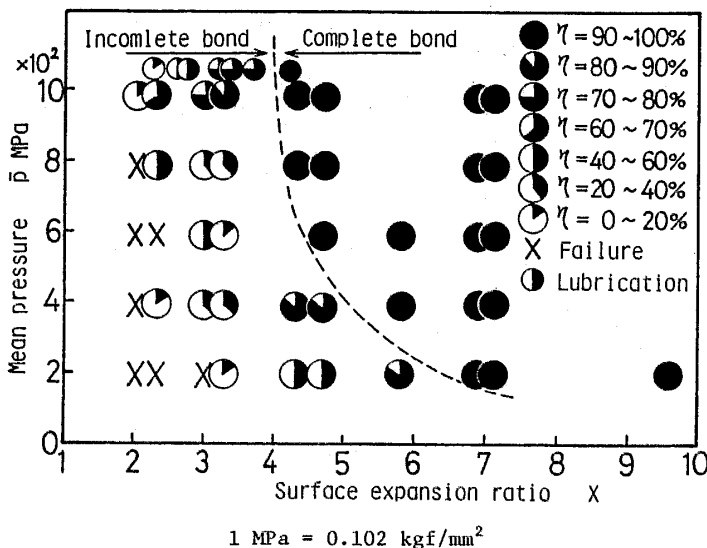


図12 表面積拡大比と平均面圧に対する継手効率の変化

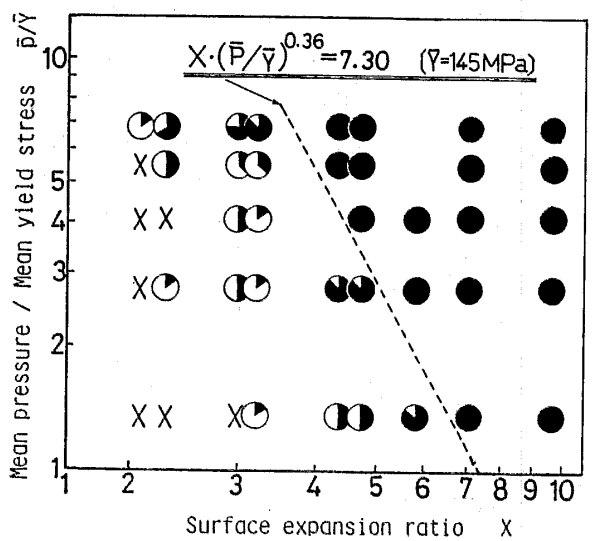


図13 圧接限界条件の表示式

ことがわかる。

圧接限界線の表示式を求めるため、図12の結果を両対数グラフ上に整理し直して示すと、図13のようになる。縦軸の平均面圧 \bar{p} については、素材の平均変形抵抗 \bar{Y} に対する相対面圧 \bar{p}/\bar{Y} として示してある。ここで、平均変形抵抗 \bar{Y} は、素材の応力-ひずみ関係式 $\sigma=125\epsilon^{0.29}$ より、圧接限界線の存在する相当ひずみ $\epsilon_{eq}=1.4\sim 1.9$ に対応する値として、 $\bar{Y}=145$ MPa{14.8 kgf/mm²} を用いた。図13から明らかなように、圧接限界線はほぼ直線となり、次式によって近似されることがわかる。

$$X \cdot (\bar{p}/\bar{Y})^{0.36} = 7.30 \quad \dots\dots\dots (2)$$

この式において、定数 7.30 は、相対面圧 $\bar{p}/\bar{Y}=1$ の場合の表面積拡大比 X_c を表し、指数 0.36 は直線の傾きの絶対値 α を表す。田端らによれば⁽³⁰⁾、 \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、極めて困難であることが報告されている。したがって、 X_c は低面圧範囲における事実上の圧接限界表面積拡大比を表すと考えてよいと思われる。一方、直線の傾きの絶対値を表す指数 α は、この値が大きいかほど面圧の影響が顕著になることを表す。そこで、この値を面圧影響指数と呼ぶことにする。

次報では、これらの特性値 X_c および α が、温度および表面性状によってどのように左右されるかについて検討したい。

7. あとがき

工業用純アルミニウムを用いて、完全な接合強度を得るための圧接限界条件を確立するため、常温において、拘束リング内で円柱の端面圧接試験を行った。この方法により、平均面圧 \bar{p} と表面積拡大比 X を独立に広範囲に変更でき、各条件に対応する接合強度の分布を、各半径位置より切出した小試験片の引張強さ S_T として正確に測定することが可能になった。完全な接合強度が達成されたかどうかの評価尺度として、継手効率 η 、すなわち同じ加工硬化程度の一体材の引張強さ S_{T0} に対する接合材の引張強さ S_T の割合を用いた。平均面圧 \bar{p} と表面積拡大比 X のグラフ上に継手効率 η をプロットした結果、完全な接合強度を得

るための圧接限界条件範囲が明りょうに区分されることがわかった。その圧接限界線を表すための近似式として、

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

という形の実験式が提案された。ここで、 X_c は低面圧 $\bar{p}/\bar{Y}=1$ のときの限界表面積拡大比、 α は面圧影響指数、 \bar{Y} は平均変形抵抗を表す。次報では、このような圧接限界条件が、温度および表面性状によってどのように影響されるかについて明らかにする。

文 献

- (1) 工藤・ほか 2 名, 塑性加工講演論文集, (昭 52), 141.
- (2) 工藤・ほか 4 名, 塑性加工, (昭 55), 533.
- (3) 工藤・ほか 3 名, 塑性加工, (昭 56), 363.
- (4) 工藤・ほか 3 名, 塑性加工, (昭 57), 619.
- (5) 和田林・ほか 2 名, 塑性加工連合講演論文集, (昭 51), 7.
- (6) 近藤・牧戸, 塑性加工講演論文集, (昭 53), 289.
- (7) 斉藤・山路, 溶接学会誌, 20-1, 2 (昭 46), 3, 70.
- (8) 斉藤・角川, 溶接学会誌, 36-12 (昭 42), 1257.
- (9) 盛岡・鈴木, 軽金属溶接, 7 (昭 38), 310.
- (10) 黒崎, 塑性と加工, 2-10 (昭 36), 633.
- (11) 松田・尾崎, 塑性と加工, 6-51 (昭 40), 215.
- (12) 今井・日暮, 塑性と加工, 17-186 (昭 51), 574.
- (13) 田中・ほか 3 名, 塑性と加工, 12-127 (昭 46), 622.
- (14) 山口・ほか 3 名, 塑性と加工, 15-164 (昭 49), 723.
- (15) 小西・参木, 塑性と加工, 19-213 (昭 53), 814.
- (16) Vaidyanath, L. R., ほか 2 名, *Br. Weld. J.*, 6 (1959), 13.
- (17) Holmes, E., *Br. Weld. J.*, 6 (1959), 29.
- (18) Aziz, M. K, A. und Hofmann, W., *Aluminum*, 36-6 (1960), 312.
- (19) Mc Ewan, J. B. and Milner, D. R., *Br. Weld. J.*, 9(1962), 406.
- (20) Conrad, H. and Rice, R., *Metall. Trans.*, 1 (1970), 1370.
- (21) Eggers, H., ほか 2 名, *Schweißen Schneiden*, 22 (1970), 241.
- (22) Cave, J. A. and Williams, J. D., *J. Inst. Met.*, 101(1973), 203.
- (23) Lehrheur, W. und Drews, P., *BLECH*, 26-7 (1979), 357.
- (24) Bay, N., *Trans. ASME, Ser. B*, 101 (1974), 121.
- (25) 工藤・和田, 塑性加工講演論文集, (昭 47), 125.
- (26) 工藤・石永, 塑性加工, (昭 47), 41.
- (27) 近藤・鈴木, 塑性加工, (昭 51), 213.
- (28) 真崎・ほか 2 名, 塑性加工連合講演論文集, (昭 51), 4.
- (29) 田端・ほか 2 名, 塑性加工, (昭 55), 215.
- (30) 田端・ほか 2 名, 塑性加工講演論文集, (昭 57), 615.
- (31) 加藤・ほか 2 名, 機論, 44-381 (昭 53), 1742.
- (32) 松原・ほか 2 名, 塑性加工講演論文集, (昭 48), 397.

討 論

〔質問〕 工藤 英明〔横浜国立大学工学部〕

同じく圧接過程に関心を持つ者として、圧接度合に及ぼす圧力と表面積拡大率との効果を系統的に調べら

論

れた本研究を興味深く拝見させて頂いた。質問者も著者らと同様に、圧接法則の発見から、諸圧接方法の際の圧接度合の予測を目標としている。しかし、押出し

や引抜きにおいては、一般に \bar{p}/\bar{Y} はダイ入口側において最大であり、出口に進んで X が増すとともに小さくなる。これは本研究における $\bar{p}/\bar{Y} \sim X$ 経路とかなり異なっている。討論者は $\bar{p}/\bar{Y} \sim X$ 経路を任意に変えて実験すべきであると考えつつ、名案が浮かばずに困っているが、これらの点について著者らのご教示を承りたい。

〔回答〕 本研究を進めるうえで、質問者のご研究の成果が大変よい参考になり感謝している。

ご指摘のように、 $\bar{p}/\bar{Y} \sim X$ 経路が本実験の場合と異なるとき、圧接限界条件がどのように変化するかを明らかにすることは、塑性加工に圧接過程を組込む上で重要なことと考える。 $\bar{p}/\bar{Y} \sim X$ 経路を任意に変更することは難しいと思うが、本実験においても、例えば、コンテナ内で $R_e = 58.1\%$ 、 $\bar{p} = 10^3$ MPa まで圧下した試験片を、自由圧縮 ($\bar{p} = 200$ MPa 程度) でさらに圧下することにより、経路の異なる場合の圧接限界条件を調べることが可能であると思われる。また、質問者の分流圧接試験法の場合との比較によっても、ある程度予測が可能になるものと思われる。いずれにしても、任意の経路についての圧接試験はかなり複雑なものと考えられる。

〔質問〕 真崎才次〔大阪工業大学〕

金属の冷間接合に関する研究は、非常に面倒で、各因子の定性的な影響を述べたものが多かった。本研究では、それを定量化する試みを示され、実験に関しては敬服する。

(1) 相当応力 σ_{eq} の分布を求めるには、相当ひずみの分布を求める必要があると思う。特に、不均一変形をする無潤滑の場合は、どのようにして相当ひずみを求められたのか。

(2) 圧接限界線が存在する相当ひずみから \bar{Y} を求めておられるが、本論文では、相当ひずみには陰に表現されており、陽に表現された圧下率を用いて \bar{Y} を決定することはできないのか。

〔回答〕 (1) 相当ひずみ ε_{eq} の分布は、表面積拡大比 X の分布から、体積一定則を用いて、高さ方向ひずみ $\varepsilon_z = -\ln X$ を計算し、半径方向ひずみ ε_r と円周方向ひずみ ε_θ を、 $\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = -\varepsilon_z/2$ と仮定して求めた。

(2) 圧下率 R_e から、平均の高さ方向ひずみ $\bar{\varepsilon}_z = \ln(R_e + 1)$ を計算し、 $\bar{\varepsilon}_r = \bar{\varepsilon}_\theta = -\bar{\varepsilon}_z/2$ を仮定して平均相当ひずみ $\bar{\varepsilon}_{eq}$ に対する平均相当応力 \bar{Y} を求めることも可能である。この場合全面で継手効率 $\eta \geq 90\%$

となる圧下率 R_e を用いることが必要と思われる。

〔質問〕 水野高爾〔名古屋工業大学〕

大気中の圧接では界面にどの程度空気が残留するかが圧接強度に関与すると思われる。この点で、初期あらさや加工速度あるいは圧力分布（中央が高い方が好ましい？）も接合強度に影響するのではないか。また、図 11 においても酸化膜の両側に地金が密着しておれば、延性はともかく、強度は得られると考えられないか。

〔回答〕 ご指摘のように、大気中の圧接では界面に残留する空気が、露出した新生面に何らかの悪影響を及ぼすことが考えられる。この点から、初期あらさ、加工速度または圧力分布等も接合強度に影響することも考えられるが、大気の影響を別個に把握するためには、真空中での圧接接合強度との比較を行うことが必要であり、今後の検討課題とさせていただきます。

酸化膜が多少残留するにもかかわらず、継手効率 η が 100% となる理由として、ご指摘のように、分散した酸化膜が地金と密着し、例えば分散強化のような効果を示していることが考えられるが、この点は圧接機構そのものに結びつく重要な問題として検討をすすめたいと考えている。

〔質問〕 和田林良一〔大阪府立工業技術研究所〕

接合強度の評価法についてご意見を伺いたいと思う。すなわち、貴論文やその他多くの関連する論文では引張試験によって接合強度を評価しているが、接合部の局部的加工硬化などがあれば、引張試験での破断面は接合面以外の部分であることが多いと思う (η がある程度大きいとき)。図 11 の (b) のように酸化膜の残留があったり、ファイバ組織の不連続などを考慮すると、境界面に集中的な応力が加わった場合の強度は一体材に比べて劣化していると思うが、いかがか。例えば切欠き付きの引張試験やシャルピー衝撃試験、せん断試験などのデータがあればお教え願いたい。また実用上、この点はあまり問題にならないと考えてよいのかどうかご意見をお聞かせ頂きたい。

〔回答〕 ご指摘のように、接合面に酸化膜の残留等がある場合、集中的な応力の作用下では一体材に比べて強度が劣化することが考えられる。切欠き付きの引張試験やシャルピー衝撃試験、せん断試験などによる検討はまだ行っていないが、その他疲労試験等による接合強度の評価を行うことは、圧接製品を実用に供するために重要なことであり、今後の検討課題とさせていただきます。