

拡散接合の接合強度と接合面積に及ぼす^{*} SUS304突起頂角の影響

新 田 勇^{*1}平 田 直 樹^{*2}石 橋 達 弥^{*1}下 田 茂^{*3}

The Effects of Asperity Angle of SUS304 on the Bonding Strength
and Bonded Area of Diffusion Bonding

by Isami NITTA, Naoki HIRATA, Tatsuya ISHIBASHI and Shigeru SHIMODA

Experiments of diffusion bonding were carried out at elevated temperatures for 30 min in a vacuum. Strengths of as-bonded specimens (without further machining) were measured by 4 points bend test. Specimens to be bonded have asperities in wedge shape on the upper ends. The asperity angles were 100°, 120°, 140° and 160°. The surfaces to be bonded were brought into contact with the redges on the specimen perpendicular to those on another specimen. The bonding strengths of the asperity angles of 100° and 160° were higher than those of asperity angles of 120° and 140°. The bonded areas were almost equal at from 100° to 140° and the largest bonded area was observed at 160°. The bonding strength became low when the bonding pressure was high at the end of the bonding process. The bonding strength of 35% prestrained specimens were almost equal to those of not prestrained specimens. The bonded areas of 35% prestrained specimens were, however, smaller than those of not prestrained specimens.

Key Words : Diffusion Bonding, Stainless Steel, Asperity Angle, Wedge, Strain

1. 緒 言

拡散接合に関するこれまでの研究のほとんどは、接合界面を消失させ母材と同じ接合強度を有する接合体を得ることを目的としていた。その目的を達成するために接合温度、接合圧力¹⁾²⁾、表面あらさ^{3)~7)}、接合材の組織⁸⁾⁹⁾、表面清浄度¹⁰⁾¹¹⁾の影響が調べられている。

しかし一方では、熱抵抗が大きい接合面を作るという目的から、ある一定の強度を保証しつつ、最小の接合面積にしたいという要求も今後考えられる。接合面積を少なくし熱抵抗を大きくするためには、平坦な面よりもあらい面を用いることが望ましい。しかし、あらい表面すなわち接合面の表面突起が、接合強度、接合面積¹²⁾に及ぼす影響について調べた例はほとんど無い¹³⁾。したがって、熱抵抗が大きい接合面を設計するための基礎的データが無いのが現状である。

以上の考えに基づき、本研究においては拡散接合の接合強度と接合面積に及ぼす突起形状の影響を調べるために、意図的に用意したくさび形の突起を有する試

験片を用いて実験を行った。突起の頂角は、100°、120°、140°、160°の4種類とした。そして4点曲げ試験で強度を測定し、接合強度、接合面積に及ぼす突起頂角の影響を明らかにした。

2. 実験

2・1 試験片及び実験装置 試験片材料は市販のステンレス鋼SUS304である。実験結果3・1～3・4と3・5の試験片材料は異なるロットのものである。試験片の形状及び寸法を図1に示す。試験片は、予め1050℃で固溶体化処理が施された直径14mmの丸棒より製作された。突起は図1に示すようにくさび形であり、頂角 2θ はそれぞれ100°、120°、140°、160°の4種類を用意した。

実験装置の概略を図2に示す。真空炉は石英ガラス製で、試験片の加熱は抵抗発熱体からのふく射によって行った。温度測定は試験片ホルダに溶着した熱電対を用いて行った。この溶着部をセラミックスでコーティングした。荷重はネジを回すことにより板バネを介して加圧用の軸に伝えられる。荷重測定は板バネに貼った歪ゲージをセンサーとして行った。

2・2 実験方法 試験片をアセトンで超音波洗浄した後、上部試験片と下部試験片のくさび形突起の加

^{*} 平成元年4月5日 第66期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年6月23日。

^{*1} 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

^{*2} 正員、中条工業高校(〒959-31 新潟県岩船郡荒川町大字坂町2779-1)。

^{*3} 正員、新潟工業短期大学(〒950-21 新潟市上新栄町5-13-7)。

工方向が直交するようにセットし、容器内を真空にした。容器内気体圧力は、全実験を通して $2.7 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 以下であった。次に、見かけの接触圧力が所定の値(初期接合圧力)になるまで荷重を加え、ある一定の接合温度で30分間保持した。ここで、見かけの接触圧力とは試験片にかけた荷重を見かけの接合面積($5 \times 5 \times \pi \text{ mm}^2$)で割った値である。接合温度は800℃、900℃、1000℃とした。試験片の温度が室温になるまで炉冷し、炉から取り出したままの試験片で4点曲げ強度試験を行った。光学顕微鏡を用いて、破断後の接合界面の中心部の拡大写真をとり、その2～4個の接合点の面積をプランメータで測定した。その平均値に接合界面の接合部の数をかけることで接合面積を求めた。

図3は、実際に実験を行った際の各接合温度における時間と温度、荷重の関係を示したものである。試験片の温度は加熱開始後約15分で接合温度に達した。ま

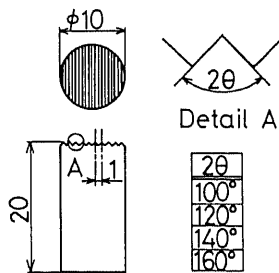


図1 試験片の形状と寸法

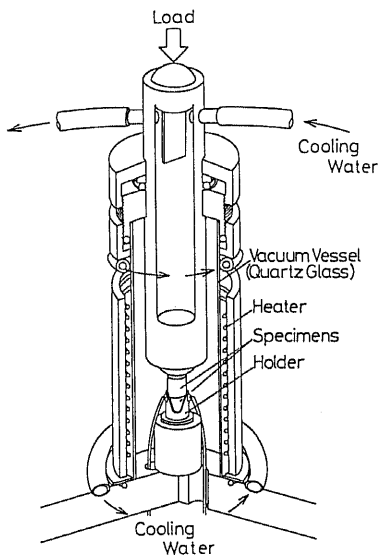


図2 試験装置概図略

た、接合温度900℃以上、特に1000℃では試験片が軟化し、母材が垂直方向に変形した。そのため荷重は減少したが、接合圧力は拡散接合過程の初期には必要であるがその後は必要ないという報告¹⁾²⁾があることや過度の変形を防止するためそれ以上の荷重は加えなかった。図中のA点、B点をそれぞれ初期接合力(圧力)、終期接合力(圧力)と呼ぶことにする。接合温度1000℃の変形量は一番多いもので接合体全長に対して約5%であった。加熱中止後、荷重は熱収縮によって減少していった。

以上のような実験を、再現性の確認の為、同じ条件で3回以上行った。

3. 実験結果

3・1 突起頂角と接合強度の関係 図4は、縦軸に接合強度を、横軸に突起頂角をとり、接合温度をパラメータにして4点曲げ強度試験結果を表したグラフである。初期接合圧力は63MPaである。接合温度900℃までは頂角が小さい程接合強度が高くなる傾向が見

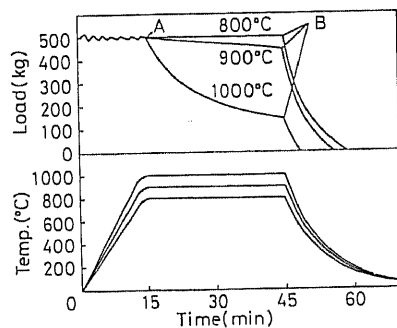


図3 接合温度、接合荷重と接合時間の関係(A:初期接合圧力、B:終期接合圧力)

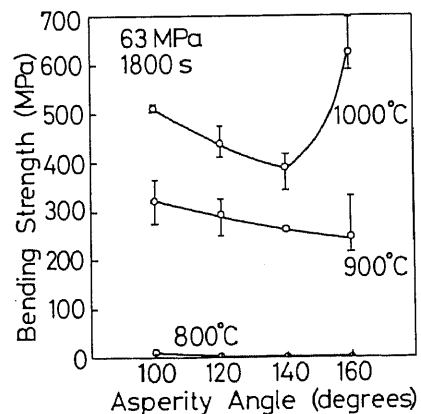


図4 接合強度と突起頂角の関係

られた。接合温度800℃では頂角140°と160°の試験片の接合は行われなかった。接合温度1000℃では、突起頂角100°から140°の間では突起頂角が小さい程接合強度は大きい、突起頂角160°の所で接合強度が急激に上昇するのが認められた。初期接合圧力が22MPa、42MPaの実験においては、接合温度900℃、1000℃の両方とも接合強度-頂角の関係は図4の1000℃のようなU字形カーブを示した。すなわち、頂角140°付近が接合強度が最小となった。図4の900℃の場合のような頂角の増加に伴って接合強度が減少する接合強度-頂角の関係は、初期接合圧力が63MPaの場合にしか見られなかった。破断は、全て接合界面で起こった。

3・2 突起頂角と接合面積の関係 図5は、縦軸に接合面積、横軸に突起頂角をとり、接合温度をパラメータとして、図4の実験の接合面積-頂角の関係を表したものである。この図より、どの接合温度でも頂角100°から140°にかけては接合面積がほぼ同じであることが分かる。しかし、接合温度1000℃の場合、突起頂角140°から160°にかけては接合面積が急激に

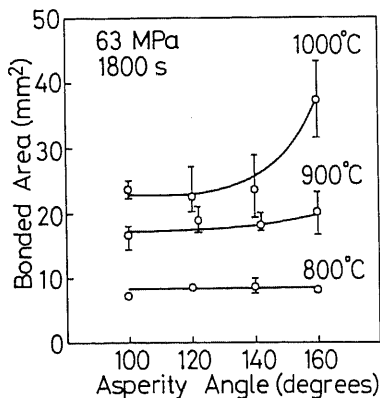


図5 接触面積と突起頂角の関係

増加していることが認められた。初期接合圧力が22MPa、42MPaの場合は、接合温度900℃、1000℃の両方ともに接合面積-頂角の関係は図5の1000℃のような傾向を示した。

3・3 破断面の観察 図6(a), (b)は初期接合圧力63MPa、接合温度900℃で接合を行った接合体の4点曲げ破断後の電子顕微鏡(SEM)写真である。突起頂角はそれぞれ100°と160°である。写真の縦方向の縮模様は突起製作時のフライスの加工方向を表している。図6(a)では接触点のまわりにすべり線が見られ接合時の変形が激しかったことが分かる。図7(a), (b)は、それぞれ図6(a), (b)の中央部分を拡大したものである。図7(a)では延性破壊の特徴であるディンプルが接触部の全域にわたって観察された。又、図7(b)では写真の中央部のみにディンプルが観察されているが、中央部以外の所でも更に拡大すると全面にわたって微細なディンプルが観察された。一般に突起頂角が100°のものがディンプルは大きく、頂角が大きくなって行くにつれてディンプルは小さくなっていく傾向があった。

さらに、接合温度1000℃の場合についても破面観察を行った。同一頂角の試験片で比較すると、接合温度900℃の時に比べてディンプルは大きいことが観察された。そして、接合温度1000℃においても900℃と同様に、頂角が大きくなるにしたがってディンプルは小さくなる傾向がみられた。従って、ディンプルが大きい、頂角の小さい試験片の方が強固に接合されていたと考えられる。

接合温度800℃では破断面にディンプルは観察されなかった。

3・4 歪と接合強度の関係 試験片が受けた歪の影響を見るために、35%圧縮歪を与えた材料から頂角100°、160°の試験片を製作して接合実験を行った。図8は接合強度と頂角の関係である。比較のために図

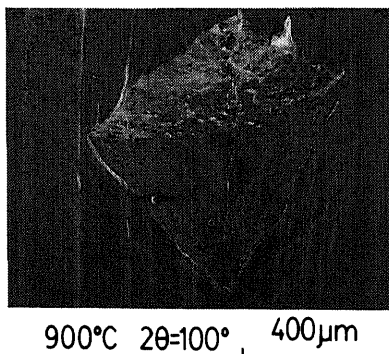


図6(a) 頂角100°の試験片の破断面SEM写真

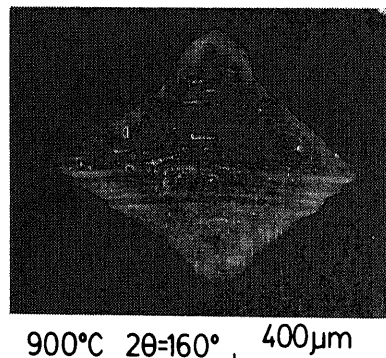


図6(b) 頂角160°の試験片の破断面SEM写真

3の歪無し試験片の結果も示してある。頂角が 160° で接合強度が低いものの、全体的には接合強度-突起頂角の関係はほぼ同じであることが分かる。図9は接合面積と頂角の関係であるが、35%歪付試験片は歪無し試験片と比較して全般的に接合面積が小さいことが分

かる。これは35%歪を与えたことにより、突起の塑性

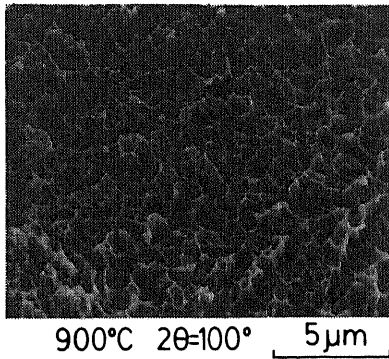


図7(a) 頂角 100° の試験片の破断面SEM写真

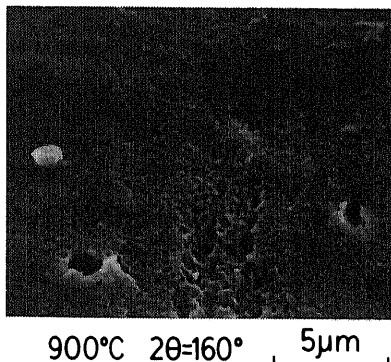


図7(b) 頂角 160° の試験片の破断面SEM写真

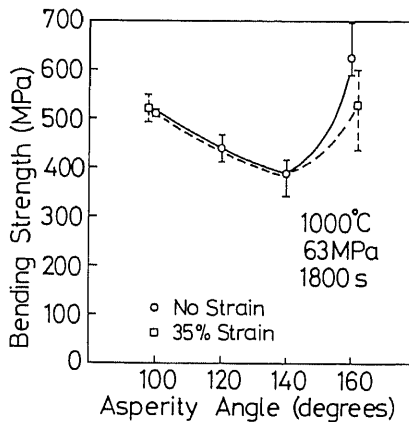


図8 35%歪を与えた場合の接合強度と頂角の関係

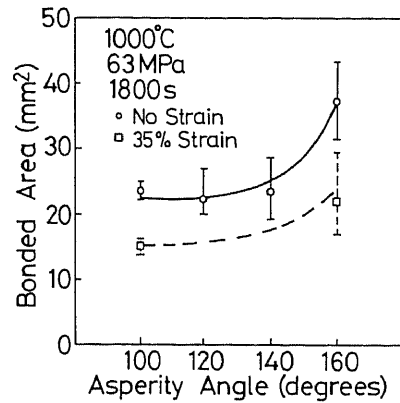


図9 35%歪を与えた場合の接合面積と頂角の関係

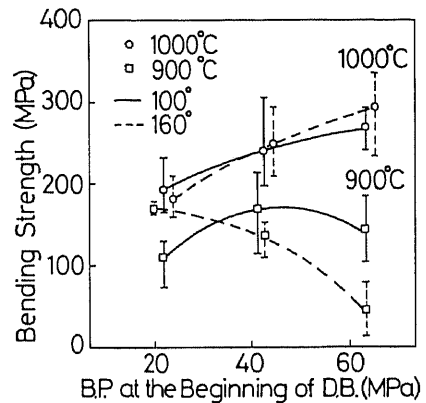


図10 接合強度と初期接合圧力の関係
(B. P. : 接合圧力, D. B. : 拡散接合)

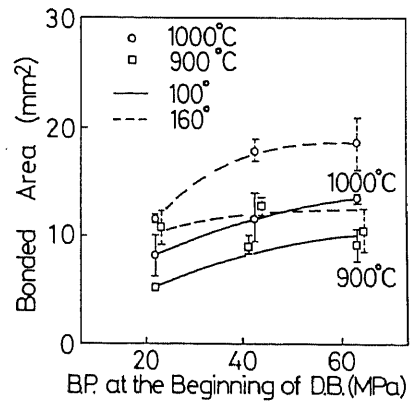


図11 接合面積と初期接合圧力の関係
(B. P. : 接合圧力, D. B. : 拡散接合)

流動圧力が高くなったためと考えられる。接合面積が少ないにもかかわらず、35%歪付試験片の接合体の接合強度が歪無しのものと同じになったのは、塑性歪により拡散が促進された⁹⁾¹⁴⁾ことや、試験片が加工硬化しているため試験片自体の強度が上昇したことが原因と考えられる。

3・5 初期接合圧力と接合強度との関係 図10は、初期接合圧力(B.P.)が接合強度に及ぼす影響を表したものである。実線と破線はそれぞれ頂角 100° 、 160° の場合に対応する。接合温度 1000°C ではどちらの頂角も初期接合圧力の増加につれて接合強度が増加している。しかし、接合温度 900°C では必ずしもそうっていない。頂角 160° では初期接合圧力が増加するに伴って、接合強度が減少しているのが分かる。また頂角 160° 、初期接合圧力が 22MPa の場合、接合温度 900°C の接合強度が 1000°C のそれに匹敵するぐらいに高くなっている。このようなことは頂角 160° の試験片だけに見ら

れた。

図11は、初期接合圧力が接合面積に与える影響を表したものである。実線と破線はそれぞれ頂角 100° 、 160° の場合に対応する。頂角 160° 、接合温度 900°C の場合は、初期接合圧力にかかわらずば一定の接触面積であるが、それ以外は初期接合圧力の増加にともない接触面積が増加している。

頂角 160° 、接合温度 900°C 、初期接合圧力 22MPa の場合は接合圧力が低いわりには接合面積が大きく、このために接合強度が高くなったと考えられる。

4. 考察

本実験の破断面の観察より、他の条件が同じであれば突起頂角が小さい方が破断面上のディンプルが大きいことが観察された。これは突起頂角が小さい場合、表面酸化膜が破断され拡散が行われ易くなるためと考えられる。

本実験範囲では、接合条件が同じであれば、頂角 100° から 140° の試験片の接合面積はほぼ同じであった(図5)。しかし、頂角 160° の試験片では接合面積は他の頂角の試験片より大きくなった。このことより、頂角 160° の試験片の接合面積形成においては突起の塑性変形、クリープ変形にらんで表面拡散等の拡散の寄与が大きいことが分かる。

以上のことを概略的に示すために、縦軸に接合強度に寄与する量、横軸に頂角をとって表すと図12のようになる。一点鎖線、点線は、それぞれ酸化膜破断と拡散による接合面積の増加が接合強度に寄与する量を表している。実線はそれらの寄与をたしたものである。この実線のような曲線は接合温度 900°C 、 1000°C 、接合圧力 22MPa 、 42MPa 、 63MPa の接合条件の中で、 900°C 、 63MPa のものを除くすべての実験結果で観察された。 900°C 、 63MPa の接合条件の実験結果が図12の実線と同じ傾向を示

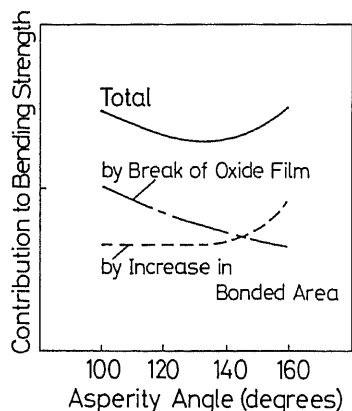


図12 突起頂角が接合強度に及ぼす影響についての概略図

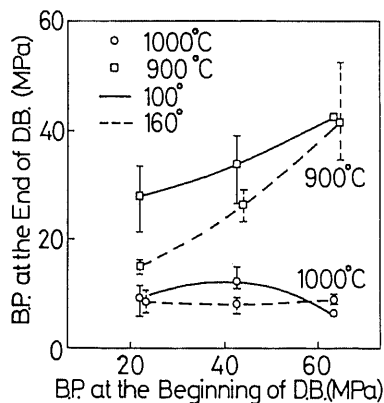


図13 初期接合圧力と終期接合圧力の関係

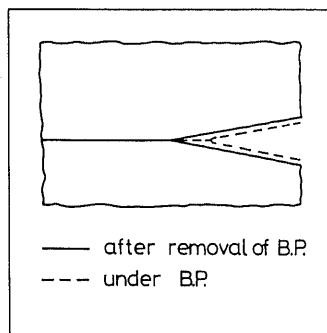


図14 接合圧力が接合強度に及ぼす影響についてのモデル図(B.P.: 接合圧力)

さなかつた原因については以下に考察する。

接合圧力は接合過程の初期には必要であるがその後は必要でないという報告があることや、過度の変形防止のために、接合温度到達時までは接合圧力が一定になるように調節していたが、その後は調節しなかつた。そのため、図3に示すように、接合温度1000℃では接合時間終了時までには接合圧力が約1/3に減少した。図13は、終期接合圧力と初期接合圧力との関係を示したものである。実線と破線はそれぞれ突起頂角100°と160°に対応する。接合温度1000℃では初期接合圧力が増加しても終期接合圧力はほぼ一定である。これに対して接合温度900℃では初期接合圧力の増加に伴って終期接合圧力は増加している。終期接合圧力が大きいと接合圧力除荷時の弾性変形量が大きくなる。図14は、その様子をモデル的に表したものである。破線と実線はそれぞれ終期接合圧力が作用している時としない時のモデルを示す。終期接合圧力を取り除くとその荷重に見合う弾性回復が起こり接合点周辺部が剥離、あるいは引張の残留応力が存在するようになる。そのため、このような試験片では接合強度も低くなる。本研究の試験片では接合点が少ないため、接合点1個に作用する荷重が大きくそのため弾性回復量が多いと考えられる。研削面などでは、接合点が多いので、接合点1個に作用する荷重は少ない。従って終期接合圧力が大きい場合でも、接合強度が低下することは無いと考えられる。但し、接合表面にうねりがある場合は、本研究の試験片の場合と同様終期接合圧力が大きくなると接合圧力が低下する可能性がある。

5. 結 言

拡散接合の接合強度と接合面積に及ぼす表面突起形状の影響を調べるために、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304で作られた4種類の頂角を持つくさび形突起試験片を用い、種々の接合温度、接合圧力で拡散接合の実験を行った。その後4点曲げ強度試験、破断面観察を行ったところ以下のような結果が得られた。

- (1)接合面積は、一般に頂角100°から140°まで一定、140°から160°にかけて急激に増加した。
- (2)接合強度—頂角の関係では、一般に頂角100°と160°で接合強度が高く、頂角140°で接合強度が低くなるU字カーブを示した。

- (3)終期接合圧力が高くなると接合強度が低下した。
- (4)35%歪を与えると、歪を与えない場合に比較して接合面積は減少するが接合強度はほぼ同じであった。
- (5)接合温度900℃と1000℃の場合の破断面にはディンプルが観察された。接合条件を同一にして比較した場合、ディンプルの大きさは突起頂角が小さい方が大きくなった。

謝 辞

本実験の遂行にあたっては4年次学生茅野徹君(現日本精機)、溝口賢治君(現三菱電機)、又試験装置、試験片の製作については田村隆技官、工場技官の方々に負うところが多く感謝の意を表します。真空排気装置は鶴岡工業高等専門学校の加藤康志郎助教授よりお貸し頂きました。SEM写真撮影については東北大学工学部堀切川一男博士に御協力を頂きました。ここに感謝申し上げます。

この研究の一部は昭和60年度文部省科学研究費助成金によることを記し感謝の意を表します。

文 献

- (1)木村・大隅・清藤・片岡, 三菱重工技報, vol. 8, 887.
- (2)W. A. Owczarski and D. P. Paulonis, Welding Journal, (1981), 22.
- (3)B. Derby and E. R. Wallach, Metal Science, 16(1982), 49.
- (4)J. Shioiri, R. Ishida and S. Furuya, Comp. Mater., 11, (1980), 180.
- (5)大橋・橋本, 溶接学会誌, 45, (1976), 485.
- (6)西口・高橋, 溶接学会論文集, 4, (1986), 311.
- (7)T. Enjo, K. Ikeuchi and N. Akikawa, Trans. JWRI, 11, (1982), 49.
- (8)円城・池内・秋川・伊藤, 日本金属学会誌, 44, (1980), 659.
- (9)益本・平, 溶接学会誌, 50(1981), 284.
- (10)W. Karlinski, Welding Research International, 9, (1979), 25.
- (11)田沼・橋本, 溶接学会誌, 45, (1976), 295.
- (12)新田・下田・加藤, 機論, C, 52, (昭56), 2820.
- (13)大橋・橋本, 溶接学会誌, 45, (1976), 295.
- (14)M. Cohen, 日本金属学会会報, 9, (1970), 271.