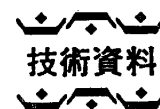


耐熱合金の最近の接合方法について



中尾 嘉 邦*

Latest Bonding Processes of Heat Resisting Alloys

Yoshikuni NAKAO

1. は し が き

耐熱材料が基幹的な構成材料として用いられる石油化学産業、パワープラント産業、原子力産業、航空宇宙産業等、高度の先端技術を駆使する産業分野においては、加工生産技術がきわめて重要な地位を占めている。中でも加工生産技術の根幹となる接合技術の重要性は万人の認めるところである。これらの先端技術集団において、次世代接合技術が指向する方向は、極力溶融部の少ない面接合を実施し、高性能、高精度の接合を実現する方向である。また、最近開発が活発に進められている、高性能結晶制御合金、超微粒子焼結合金、ファイナセラミックならびに粒子分散強化合金、繊維分散強化合金 (FRM)、積層合金などの複合材料の接合に関しても新たな接合技術の開発が強く望まれている。接合技術の研究分野においては、このような背景の下に、その理想に向けて精力的な努力が傾注され、一部実用化が図られつつある。本報告では、次世代接合技術として脚光をあびている、電子ビーム溶接法、レーザー溶接法、拡散接合法、液相拡散接合法を主として取りあげ、これらの耐熱合金への適用結果について取りまとめることにした。

2. 電子ビーム溶接法ならびにレーザー溶接法

電子ビーム溶接法ならびにレーザー溶接法の原理、特徴などについては荒田¹⁾²⁾により詳細な解説がなされているのでそれを参照願いたい。ここでは耐熱合金への適用例を記述する。

核融合実験用大型真空容器は精密な加工精度が要求されるため、その接合法として電子ビーム溶接法の適用が実施あるいは考慮されている。核融合実験装置ヘリオトロンE用の大型真空容器には、高耐力非磁性鋼である、25Cr-12Ni-0.3N鋼が用いられているが、複雑な形状のトラス型真空容器を組み立てるため、電子ビーム溶接法が採用されている³⁾。この場合、高窒素鋼の電子ビーム溶接部の気孔の発生を防止するため、溶接線方向に振幅 2mm の振動 (2000 Hz) を電子ビームにあたえ、気

孔の防止を図っている。Fig. 1 に模式図を示す臨界プラズマ実験装置 (JT 60) の真空容器の製作についても電子ビーム溶接法が適用されている⁴⁾。真空容器の構成材料は 65mm 厚の Inconel 625 である。この場合、下向きおよび横向き溶接法が採用されているが、湯流れがよすぎると気孔の原因となるので、Inconel 625 の Si 量を 0.3% 以下に制限している。核融合炉第 1 壁の候補材料の一つとして、316 型ステンレス鋼が考慮されている。非磁性化を図るため、完全オーステナイト組織化した、316 型ステンレス鋼に対して電子ビーム溶接性が検討されている⁵⁾。電子ビーム溶接部に生ずる欠陥は気孔、コールドシャット、凝固割れであるが、ビーム活性変数、 a_b (対物きより/焦点きより) はこれらの欠陥の発生に対して重要な影響を及ぼす。すなわち、 a_b 値が 1.0 近傍では気孔やコールドシャットの発生が、また、 a_b 値が 0.8 あるいは 1.2 近傍では凝固割れの発生が問題となる。したがって、健全な溶接部を得るためには凝固割れ感受性の改善が必要となる。硫黄含有量が 0.007~0.009% レベルの場合、りん含有量を 0.005% 以下にするか、りん含有量が市販鋼のレベル (~0.028%) の場合には、~0.25% の希土類元素の添加が凝固

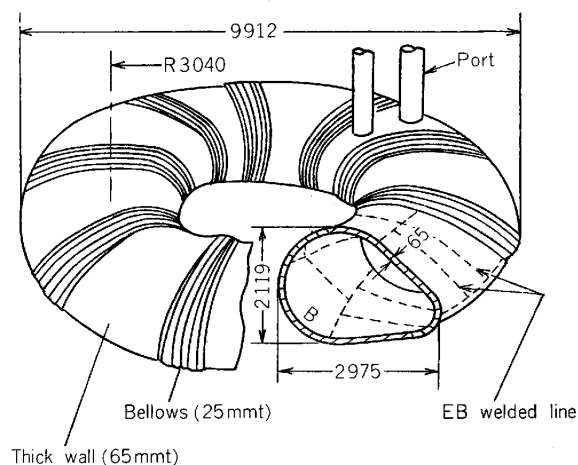


Fig. 1. Vacuum chamber of critical plasma testing equipment of JT-60 (schematic).

昭和 58 年 9 月 2 日受付 (Received Sep. 2, 1983) (依頼技術資料)

* 大阪大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565)

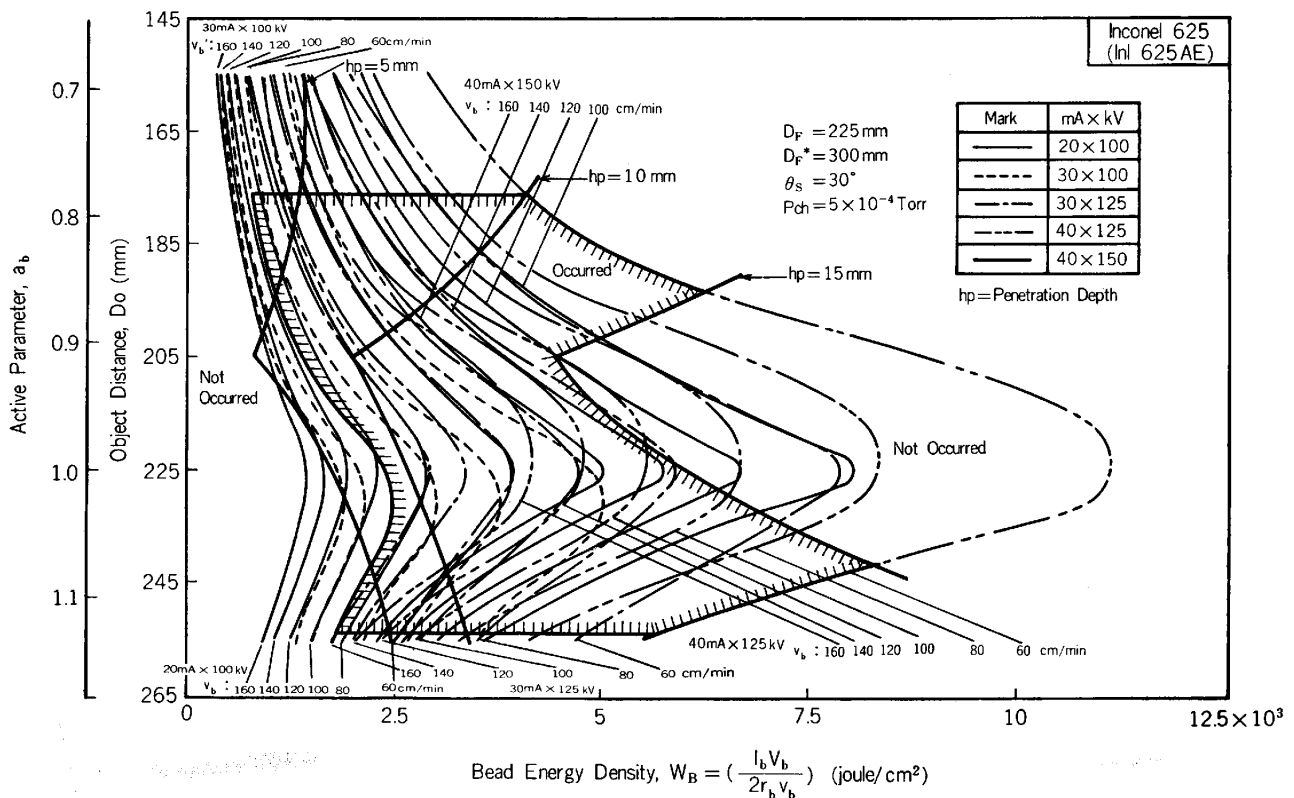


Fig. 2. Effect of bead energy density and active parameter on R-porosity (Inconel 625).

割れ感受性の改善に有効である⁵⁾。

原子炉部品(304 L型ステンレス鋼製,重量約9t)の製作においても,主として経済的な観点から局部真空電子ビーム溶接法が採用されている⁶⁾。すなわち,電子ビーム溶接法では,厚板でもI型開先を採用することができるので,開先加工の簡略化が図れるとともに,本溶接法の特徴である深溶け込み性を有効利用することにより,高能率,高精度の溶接が可能となっている。高温ガス炉用ヘリウムループシステムの製作についても電子ビーム溶接法の適用が考慮されている。すなわち,ヘリウムループの候補材料である,Hastelloy X, Inconel 617, 625, Incoloy 800, 807 についてその電子ビーム溶接性が検討されている⁷⁾。溶接施工時に発生する気孔の防止を図るため, a_b 値とビードエネルギー密度で整理することにより, Fig. 2 に示すように,気孔の発生しない施工条件を決定している⁷⁾。一方溶接金属から溶接熱影響部(HAZ)にかけて発生する高温割れも Hastelloy X, Inconel 617, Incoloy 800, 807 では問題となる⁷⁾。Hastelloy X および Inconel 617 では HAZ における M_6C の, また, Incoloy 807 では NbC の局部溶融現象が高温割れの主要原因と考えられている。これらの合金の高温割れは一般に溶接入熱を下げるにより防止可能である⁷⁾。Inconel 617 の場合には,約4%のNbを添加して炭素をNbで固定し, M_6C の生成を防止すれば高温割れ感受性の改善されることが示されている⁷⁾。

Hastelloy X, Inconel 617, 625, Incoloy 800, 807 の電子ビーム溶接継手の機械的性質をそれぞれの合金のティグ溶接継手のそれと比較した場合,常温および高温引張試験での延性,900°Cでのクリープ破断試験での延性,900°Cおよび1000°Cにおける高温低サイクル疲労特性,ヘリウム雰囲気下での900°Cにおけるクリープ破断延性はいずれも電子ビーム溶接継手の方が優れていることが明らかにされている⁷⁾。Hastelloy X の電子ビーム周溶接継手円筒の800,900,1000°Cにおける内圧クリープ破壊試験においても電子ビーム溶接継手の方がティグ溶接継手よりも優れた破断延性が得られている⁸⁾。

ガスタービンの製作過程においても電子ビーム溶接法は広範囲にわたって採用されつつある。例えばT-55タービンエンジンのパワーシャフトはTimken 17-22 ASとD 979で構成されているが, Timken 17-22 ASのパイプの接合に電子ビーム溶接法が採用されている⁹⁾。T-53ガスタービンエンジンの圧縮器ローター(Ti-6Al-4V製)も電子ビーム溶接法により製造されている¹⁰⁾。

きわめて高温割れ感受性の高いNi基超耐熱合金の電子ビーム溶接継手については,溶接部に発生したマイクロ割れを消滅させるため,溶接後HIP(Hot Isostatic Pressing)処理がなされる場合がある。Inconel 718とAlloy 713Cとの電子ビーム異材溶接継手では主としてAlloy 713C側HAZにマイクロ割れが発生するが,HIP

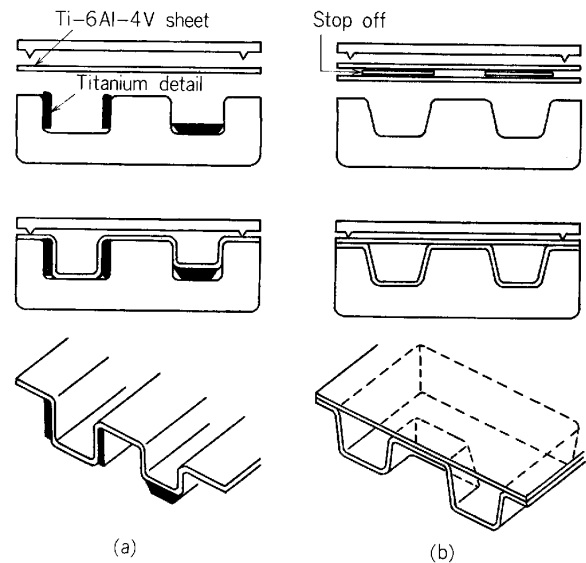
処理 (1 200°C, 1 200 気圧, 4 h) によりマイクロ割れは消滅し, 母材に匹敵する機械的性質が得られている¹¹⁾. IN-738 LC 合金についても, 母材を 1 120°C に予熱後電子ビーム溶接し, HIP 処理することにより健全な継手が得られている¹²⁾. 0.25 mm 厚の Nimonic PK 33, René 41, Inconel 718 の薄板材について電子ビーム溶接, CO₂ レーザ溶接がおこなわれ, 比較的良好な機械的性質が得られている¹³⁾.

最近開発された Ti 合金である, Ti-10V-2Fe-3Al, Ti-6Al-2Zr-2Sn-2Mo-2Cr-0.25Si, Ti-4.5Al-5Mo-1.5Cr, Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn について電子ビーム溶接性の検討がなされている¹⁴⁾. その結果によると, これらの合金は Ti-6Al-4V の条件とほぼ同一条件で溶接でき, Ti-6Al-2Zr-2Sn-2Mo-2Cr-0.25Si 合金を除き, 他の合金の溶接継手ではほぼ母材に匹敵する機械的性質の得られることが確認されている¹⁴⁾. 航空宇宙用材料として開発された, 高温用 Ti 合金 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-5Al-5Sn-2Zr-4Mo 合金についてはレーザー溶接性が検討され, レーザ溶接金属はティグ溶接金属にくらべ, β 相の粒径が微細となるため, 良好なじん性が得られることが報告されている¹⁵⁾.

3. 拡散接合法

拡散接合は, (1)降伏あるいはクリープ変形により接合部において密着面積が増加する段階, (2)粒界拡散が主体となり, 空洞の縮小化ならびに接合界面の移動が開始される段階, (3)体拡散が主体となり, 縮小した空洞が消滅する段階の3段階をへておこなわれるとされている¹⁶⁾. むろん, 接合界面に存在する吸着ガス等による汚染層の消滅あるいは酸化物等の介在物の分解ならびにその構成元素の母材側への拡散等が十分になされなければ健全な継手は得られない. 拡散接合法は母材を溶融させず高精度な面接合が原理的には可能であるので, もつとも理想に近い接合法といえる. 被接合材の表面処理技術と拡散接合技術の合理的かつ有機的な結合ならびに非破壊検査技術の確立¹⁷⁾が拡散接合法の飛躍的な発展の鍵をにぎっているものと考えられる. 高性能結晶制御合金, 複合材料など, いったん溶融すれば母材の基本的な特性が失われるような材料の接合についても拡散接合法は理想的な接合法である.

拡散接合は真空もしくは不活性ガス雰囲気中で実施されるが, 負荷ならびに加熱方式に応じて, 真空室方式, レトルト方式, HIP 方式に大別される¹⁸⁾. 通常もつともよく用いられるのが真空室方式で, 真空室内にヒーターを内蔵し, 真空室外から油圧プレスで負荷する方式である. 最大負荷荷重 3 000 t, 最高加熱温度 1 316°C, 1 524 × 1 524 × 1 524 mm の真空室を持つ拡散接合装置が実用に供されている¹⁶⁾. レトルト方式は被接合物を金属の薄肉容器内に入れ, 容器内を真空にするか不活性ガスで置換



(a) reinforced sheet (b) integrally stiffened structure
Fig. 3. Typical examples of SPF/DB structures.

後外部から加熱加圧して接合する方式である. HIP 方式は被接合物をやはり金属の薄肉容器内に入れ, 容器内を真空にした後オートクレーブ中で加熱し, 静水圧をかけて接合をおこなおうとする方式である.

近年では超塑性現象を利用して拡散接合と塑性加工を組み合わせることにより複雑な構造物を製作する技術, すなわち, SPF/DB (Superplastic Forming/Diffusion Bonding) 技術も開発されつつある¹⁹⁾. SPF/DB 法の適用例を模式的に Fig. 3 に示す. Fig. 3 (a) は加工治具内におかれた Ti 合金の細片と Ti 合金板を Ar ガス圧で加工密着させ, 拡散接合をおこなって Fig. 3 (a) 下図のような部材を製作した例である. Fig. 3 (b) は被接合板の合わせ面の一部に接合阻止材を塗布し, 2 枚の板を拡散接合後, 板間に Ar ガスを導入し, Ar ガス圧により加工治具にそつて超塑性加工をおこない, Fig. 3 (b) 下図のような部材を得た例である.

拡散接合法は航空宇宙産業の分野で特に多くの適用例がある. 例えばスペースシャトルの主エンジンの構造部材 (最大長さ 6.2 m)²⁰⁾, ターボファンエンジン JT 9D のホローファンハブ (Ti-6Al-4V¹⁶⁾ 製) (Fig. 4), TF 30P-100 ジェットエンジンの燃焼筒用の Hastelloy X のサンドイッチ板¹⁶⁾, 空冷式タービンプレード (Udimet 700, TD-NiCr, B-1900 で構成)²¹⁾, Ti-6Al-4V の中空タービンプレード²²⁾, 純 Ti のハニカム構造材²²⁾, 単結晶材を用いたタービンプレード²³⁾などの製作に拡散接合法が適用されている.

米国では次世代ガスタービンの一つとして水冷ガスタービンを考慮しているが, Photo. 1 に示すような水冷ガスタービンのノズル (Inconel 617, MZC 銅合金, Alloy 50 より構成) の試作が HIP 方式を用いてな

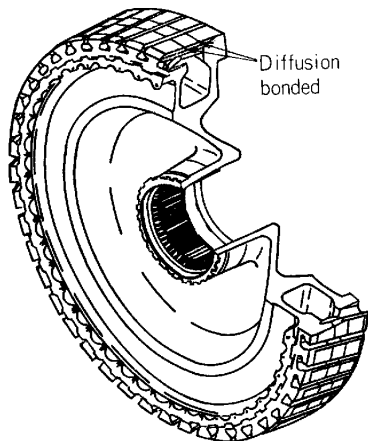
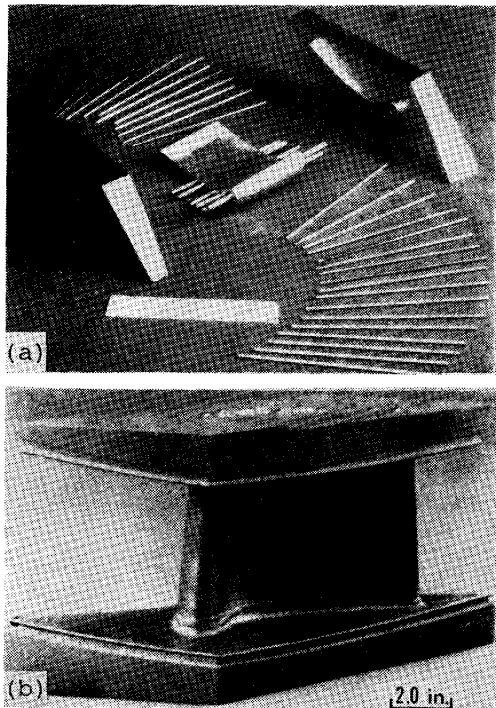


Fig. 4. Schematic showing location of diffusion welds in hollow fan hub for the JT90-70 turbofan engine.



(a) unassembled internal components
(b) hot isostatically pressed nozzle

Photo. 1. Water cooled nozzle for gas turbine.

れている²⁴⁾。

その他、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼および 13Cr 鋼の接合²⁵⁾、AISI 4340 と Inconel 718 との接合²⁶⁾、Ni 200 と Inconel 600 との接合²¹⁾、A286 と Hastelloy X との接合²⁷⁾、Mo と Hastelloy X との接合²⁸⁾などについても拡散接合法の適用が試みられている。

粒子分散強化型 Ni 基超耐熱合金である TD-Ni あるいは TD-NiCr の拡散接合についても検討が加えられており、TD-Ni に関しては、 $950^{\circ}\text{C}\times 20\text{ min}$ (加圧力、 9 kgf/mm^2) + $1100^{\circ}\text{C}\times 20\text{ min}$ (加圧力、 6 kgf/mm^2) なる 2 段接合法により良好な機械的性質を有する継手が得

られている²⁹⁾。また、TD-NiCr の検討結果³⁰⁾³¹⁾によれば、一般市販材について、 $760^{\circ}\text{C}\times 60\text{ min}$ (加圧力、 28 kgf/mm^2)、再結晶処理していない TD-NiCr について $760^{\circ}\text{C}\times 60\text{ min}$ (加圧力、 14.3 kgf/mm^2) なる条件で良好な機械的性質を持つ継手の得られることが報告されている。この場合、拡散接合後水素雰囲気中でさらに $1180^{\circ}\text{C}\times 120\text{ min}$ の熱処理をおこなうと、機械的性質は一段と良好になることが示されている³¹⁾。

拡散接合技術は複合材料の製造の分野でもきわめて有効な技術である。すでにクラッド材の製造において実用化がかなり進んでいる³²⁾。また、Al+B ファイバ、Ti+B ファイバ、Al+SiC ファイバ、Al+グラファイトファイバなどの FRM が拡散接合法により試作されている¹⁸⁾。例えば、A6061Al 合金箔と C.V.D. 法により炭素繊維の周囲に SiC を蒸着した繊維を用いて、拡散接合法により FRM が試作され、最大 200 kgf/mm^2 の引張強さを有する FRM が得られている³³⁾。

最後に拡散接合においてしばしば用いられるインサート金属の効用について述べる。インサート金属としては金属箔やめつき膜が一般的に用いられている。インサート金属の効果については次のようなことが指摘されている³⁴⁾。すなわち、(1)接合界面での塑性変形を促進させ密着面積を増加させる、(2)接合面を清浄に保つ、(3)拡散を促進させ、接合温度の低温化、接合時間の短縮化に寄与する、(4)有害な金属間化合物の生成を阻止する、(5)一時的に共晶を形成し、母材構成元素の拡散を促進する、(6)カーケンダル効果に基づく気孔の発生を防止することなどである。実継手に関しては、Ti-8Al-1Mo-1V と Inconel 600 との拡散接合において銀めつきの有効性が指摘されている³⁵⁾。また、Udimet 700 の拡散接合では、Ni-25~35Co のめつき³⁶⁾が、Nimonic 90 の拡散接合では、Ni めつき³⁷⁾が接合性を改善する上で効果のあることが示されている。

4. 液相拡散接合法

液相拡散接合法は TLP (Transient Liquid Phase) 接合法³⁸⁾とも呼ばれ、ろう付法と拡散接合法の長所を巧みに取り入れた接合法である。熔融溶接の困難な Ni 基超耐熱鋳造合金、高性能結晶制御合金、複合材料などの接合法として今後さらに広く用いられることが予想される。

液相拡散接合法は融点降下効果を有する元素 (例えば B) を含むインサート金属を接合部にそう入して接合をおこなおうとする方法である。すなわち、接合温度に加熱するとインサート金属は熔融し、一時的に接合界面に液膜が形成される。しかし融点降下元素が母材側へ拡散するにともなつて液膜の幅は減少し、やがて液膜は消滅する。その後均一化処理を施すことにより接合部は母材とほぼ同一化学成分となる。すなわち、液相拡散接

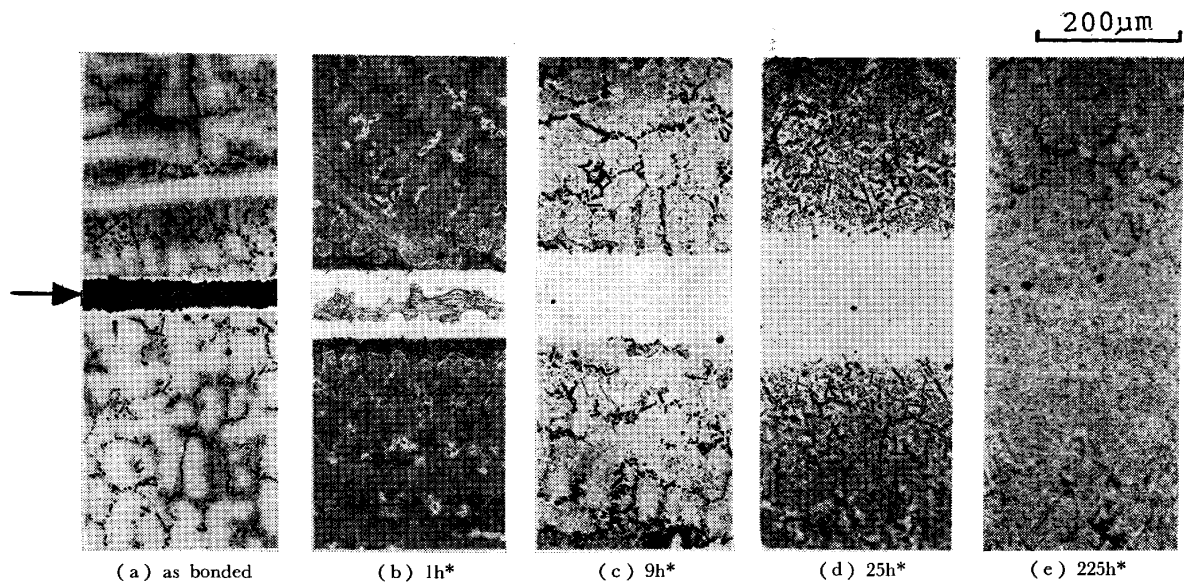


Photo. 2. Effect of holding time at 1100°C on the microstructures of bonded region in Inconel 713C TLP joints. * holding time

合過程は液膜の消滅過程と化学成分の均一化過程よりなりつつある。

Photo. 2 は, Alloy 713C に Ni-B の無電解めつきを施し, 1100°C で液相拡散接合を実施した例である³⁹⁾. この場合, Ni-B の無電解めつき膜がインサートメタルの役割を果たしている. 図にみるように, 1100°C に保持する時間が長くなるにしたがって液膜(矢印)は消滅し, 保持時間が 225 h になると化学成分の均一化もほぼ達成されている.

液膜の消滅過程の検討結果によれば³⁹⁾⁴⁰⁾, 任意の接合時間 t における液膜の幅 W_t は次式で与えられる.

$$W_t = W_i - (4C_s/V_s \cdot \sqrt{\pi}) \cdot (C_l/V_l - C_s/V_s) \cdot \sqrt{Dt} \dots \dots \dots (1)$$

ここで W_i : 液相の初期幅, C_s : 接合温度における母材中の融点降下元素の固溶限, C_l : 接合温度において, C_s なる濃度の固相と平衡する液相中の融点降下元素の濃度, V_s, V_l : 接合温度における母材ならびに液相のモル体積, D : 接合温度における母材中の融点降下元素の拡散係数である.

一方, 均一化過程の任意の時刻 t における接合部中央の合金元素濃度 $C(t)$ は次式で与えられる⁴⁰⁾.

$$C(t) = C_o \{1 - \text{erf}(W_i/4\sqrt{Dt})\} + C_i \dots \dots \dots (2)$$

ここで W_i : 液相の初期幅, C_o : $C_b - C_i$, C_b : 母材中の合金元素濃度, C_i : 接合部における初期合金元素濃度, D : 合金元素の拡散係数である.

前述のように, 液相拡散接合法では, 一時的に液膜が形成されるため, 拡散接合法にくらべ, 接合界面においてははるかに容易に金属的な結合を達成することができる. また, 負荷荷重も小さくてよく, より複雑な接合界面を持つ部材の接合も可能である. 一方ろう付法では, ろう付部に融点降下元素に起因する, 脆弱な金属間化合

物が形成される場合が多い. しかし液相拡散接合法では, 融点降下元素が母材側へ拡散移行するのでそのような金属間化合物の形成も防止できる. したがって, 原理的には高性能の継手を得ることができる. このように, 液相拡散接合法は次世代接合技術として将来十分に期待できる接合技術と考えられる.

液相拡散接合法は A-286⁴¹⁾, Hastelloy X³⁸⁾⁴²⁾, Inconel X-750⁴²⁾, Udimet 500⁴²⁾, 700³⁸⁾, Alloy 713 C³⁸⁾³⁹⁾, René 80⁴³⁾, TM-49⁴⁴⁾, Mar M-247⁴⁴⁾ の接合および A286+Alloy 713C⁴¹⁾, Udimet 700+René 80⁴⁵⁾, TD-NiCr+René 80⁴⁵⁾ などの異材接合に適用され, それぞれ優れた性質が得られている. JT9D ジェットエンジンのタービンヴェーン³⁸⁾ (Alloy 713C 製) やジェットエンジンのケース⁴⁶⁾ (Ti 合金製) の製造などに本接合法が応用されている.

液相拡散接合法のインサートメタルとして, ボロン拡散処理した箔状のろう材⁴⁷⁾, アモルファス化したろう材⁴⁸⁾があげられる. いずれも粉末状のろう材と比較し, 任意の形態に打ち抜くことができるとともに柔軟性があるので接合面に整合した形でろう材配置をおこなうことができ, ろう付時の欠陥の発生をより少なくすることができる. また, 被接合物の接合表面に直接ボロン処理を施したり⁴⁷⁾, 母材と共晶を形成するような合金層をあらかじめ接合面にめつき⁴⁶⁾しておき液相拡散接合を行う方法も考えられている.

5. その他の接合法

耐熱合金のその他の接合法としてはろう付法が現在広く用いられている⁴⁹⁾. 例えばスペースパワーシステム用の Nb-1Zr 合金と Hastelloy X との接合⁵⁰⁾ ならびにスペースシャトルの主エンジンのノズルジャケット⁵¹⁾,

ジェットエンジンのアフターバーナーのフレームホルダー (Inconel 706 製)⁵²⁾ などの製作にろう付法が用いられている。最近では、黒鉛と Hastelloy N を接合するためのトランジェントピース (Ni-30%Fe-W) の製作⁵³⁾、粒子分散強化合金 MA 754 の接合⁵⁴⁾、アルミナと黒鉛あるいは Ta との接合などにもろう付法⁵⁵⁾⁵⁶⁾が適用されつつある。

その他の接合法としては摩擦溶接法があげられる。Udimet 700⁵⁷⁾、TDNi⁵⁷⁾、Incoloy 800 の接合⁵⁸⁾、Udimet 700+TDNi⁵⁷⁾、Hastelloy X+炭素鋼⁵⁹⁾ の異材接合などに応用されつつある。T-55 タービンエンジンのパワーシャフト⁹⁾ も本溶接法により組み立てられている。

6. む す び

冒頭でも述べたように、次世代接合技術の開発ならびにその実用化は時代の要請であり、今後その研究開発が各産業分野においてますます精力的に展開されるものと考えられる。紙数の関係で十分に意を尽くせなかつたきらいもあるが、本資料が接合技術の研究に携わる方々の一助になれば望外の幸せである。

本資料を取りまとめるに際し、引用させていただいた論文の著者の方々に深甚なる謝意を表します。

文 献

- 1) 荒田吉明: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1483
- 2) 荒田吉明: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2413
- 3) 喜多久直, 和田辰治, 中崎隆光, 坪 洋二, 加沢義彰, 本島 修, 飯吉厚夫, 宇尾光治: 溶接学会誌, 50 (1981), p. 296
- 4) H. KITA, T. NAKAZAKI, and T. UEHARA: Technological and Economical Evaluation of EB Welding for Heavy Components of Electrical Machines, Japan-German Colloquium, Tokyo (1983) May
- 5) Y. NAKAO and S. KATSU: Improvement of Solidification Cracking Susceptibility of Fully Austenitic Type 316 Stainless Steel by Adding Rare Earth Metals, IIW Doc. IX-1275-83 (1983)
- 6) S. CHALLAPPA, R. S. ALEKAI, and M. G. SHRINIVASAN: Welding J., 61 (1982) 1, p. 35
- 7) 清水茂樹: 原子炉用耐熱合金の電子ビーム溶接に関する基礎的研究, 大阪大学学位請求論文 (1977)
- 8) 鶴戸口英善, 小畑清和, 印藤弘郷, 磯村和幸, 仲西恒雄, 菊地明吉, 車地隆治: 溶接法研究委員会資料, SW-1237C-80 (1980)
- 9) J. A. MILLER and J. J. O'CONNOR: Welding J., 59 (1980) 5, p. 17
- 10) J. A. MILLER: Welding J., 56 (1977) 5, p. 24
- 11) 須清修造, 香名宗春, 山本彰利: Ni 基超合金の接合法に関する研究, 溶接法研究委員会資料 (1980)
- 12) B. JAHNKE: Welding J., 61 (1982), p. 343 S
- 13) M. J. ADAMS: Metal Const. and British Welding J., 6 (1974), p. 247
- 14) R. W. MESSLER, Jr.: Welding J., 60 (1981), p. 79 S
- 15) W. A. BAESLACK III and C. M. BANAS: Welding J., 60 (1981), p. 121 S
- 16) W. A. OWCZARSKI and D. F. PAULONIS: Welding J., 60 (1981) 2, p. 22
- 17) P. M. BARTLE: Welding J., 54 (1975), p. 799
- 18) 大前 堯, 深谷保博: 溶接学会誌, 50 (1981), p. 343
- 19) E. D. WEISERT: Metal Progress, 110 (1977) 3, p. 33
- 20) New Fabrication Methods Stimulate Titanium Use: Iron Age, 215 (1975), p. 28
- 21) K. E. MEINERS: Diffusion Bonding of Specialty Structures, Materials and Processes for the 70's-Cost Effectiveness and Reliability (1973), p. 703
- 22) 内木虎蔵, 瀬戸佐智生: 石川島播磨技報, 17 (1977), p. 354
- 23) W. B. GARDNER: The Energy Efficient Engine (E-3)-Advancing the State of Art, ASME 80-GT-142 (1980)
- 24) D. R. SPRIGGS and M. C. MUTH: Welding J., 61 (1982) 11, p. 41
- 25) 河野顕臣, 中江秀雄, 才川至孝, 佐々木敏美: 溶接学会誌, 51 (1982), p. 371
- 26) G. G. LESSMAN and W. A. BRYANT: Welding J., 51 (1972), p. 606 S
- 27) 田村 博, 恩沢忠男, 鈴木暁男: 溶接学会誌, 47 (1978), p. 230
- 28) 圓城敏男, 大内光男, 那須三郎, 池内健二, 荒田吉明: 溶接学会誌, 46 (1977), p. 660
- 29) 井川 博, 新 成夫, 勝村宗英: 溶接学会誌, 43 (1974), p. 991
- 30) K. H. HOLKO and T. J. MOORE: Welding J., 51 (1972), p. 81 S
- 31) K. H. HOLKO: Welding J., 52 (1973), p. 515 S
- 32) 深谷保博: 拡散溶接に関する研究, 特殊材料溶接研究委員会資料, SWD-57-5 (1982)
- 33) 松田昭三, 松井繁朋, 山田 猛: 溶接学会誌, 50 (1981), p. 1218
- 34) J. W. DINI: Welding J., 61 (1982) 11, p. 33
- 35) NASA: Silver plating ensures reliable diffusion bonding of dissimilar metals, NASA tech brief 67-10124 (1967)
- 36) W. A. OWCZARSKI, W. H. KING, and D. S. DUVALL: Diffusion welding of the nickel-based superalloys, U.S. patent 3530568 (1970)
- 37) R. J. DAVIES and N. STEPHENSON: British Welding J., 9 (1962), p. 139
- 38) D. S. DUVALL: Welding J., 53 (1974) 4, p. 203
- 39) 中尾嘉邦: TLP 接合について, 第 74 回溶接法研究委員会資料 (1979)
- 40) H. IKAWA, Y. NAKAO, and T. ISAI: Trans. J. W. S., 10 (1979) 1, p. 24
- 41) 鈴木暁男, 恩沢忠男, 田村 博: 溶接学会誌, 50 (1981), p. 646
- 42) 鈴木暁男, 恩沢忠男, 田村 博: 溶接学会誌, 49 (1980), p. 462
- 43) G. S. HOPPIN III and T. F. BERRY: Welding J., 49 (1970), p. 505 S
- 44) 大橋 修, 田沼欣司, 磯田幸宏: 溶接学会誌, 51

-
- (1982), p. 69
- 45) A. KAUFMAN, T. F. BERRY, and K. E. MEINERS: Joining Techniques for Fabrication of Composite Air-Cooled Turbine Blades and Vanes, ASME Pub. 71-GT-32 (1971)
- 46) M. M. SCHWARTZ: *Welding J.*, 57 (1978) 9, p. 35
- 47) P. E. DOHERTY and D. R. HARRADEN: *Welding J.*, 56 (1977) 10, p. 37
- 48) N. DECRISTOFARO and C. HENSHEL: *Welding J.*, 57 (1978) 7, p. 33
- 49) 松原十四生: 溶接学会誌, 47 (1978), p. 211
- 50) G. K. WATSON and T. J. MOORE: *Welding J.*, 56 (1977), p. 306 S
- 51) Brazed Cooling Tubes Protect Space Shuttle Engines: *Welding J.*, 60 (1981) 10, p. 37
- 52) W. T. HOOVEN: *Welding J.*, 61 (1982) 10, p. 15
- 53) J. P. HAMMOND and G. M. SLAUGHTER: *Welding J.*, 50 (1971) 1, p. 33
- 54) T. J. KELLY: *Welding J.*, 61 (1982), p. 317 S
- 55) D. A. CANONICO, N. C. COLE, and G. M. SLAUGHTER: *Welding J.*, 56 (1977) 8, p. 31
- 56) D. D. BERGER: *Welding J.*, 60 (1981) 10, p. 25
- 57) T. J. MOORE: *Welding J.*, 51 (1972) 4, p. 253
- 58) K. H. HOLKO: *Welding J.*, 56 (1977), p. 140 S
- 59) K. H. HOLKO: *Welding J.*, 57 (1978) 3, p. 19
-