308 超塑性二相ステンレス鋼と炭素鋼の固相接合について

Solid-state Diffusion Bonding of Superplastic Duplex Stainless Steel with Carbon Steel

学 ○山田 雅之 (愛媛大・院) 正 荻山 博之 (愛媛大) 正 佃 等 (愛媛大)

Msayuki YAMADA, Ehime University, Bunkyo-cyo 3, Matuyama, Ehime

Hiroyuki OGIYAMA, Ehime University

Hitoshi TUKUDA Ehime University

1 諸 言

二相ステンレス鋼はフェライト(α)相とオーステナイト(γ)相から成っており、応力腐食割れや孔食に対する高い抵抗を持つと同時に高い強度を示す。一方、本鋼に特定の加工熱処理を施すと、適切な温度範囲、ひずみ速度条件下において超塑性と呼ばれる高い延性を示すことが知られている。その超塑性の優れた塑性流動性を利用することによって低負荷、短時間での固相接合が期待される。

そこで本研究では、超塑性現象が得られる二相ステンレス鋼と炭素鋼 S45C, S15C との固相接合を行い、接合挙動に及ぼす温度、荷重、時間、表面粗さなどの諸因子の影響について検討した。また、このような異種金属材料の接合体は接合部において複雑な組織変化を示し、これに伴い接合体の機械的特性が変化することが予想され、このことについても検討を加えた。

2 供試材及び実験方法

2.1 試験片作成 供試材には市販の二相ステンレス鋼(SUS329J1)と炭素鋼 S45C, S15C を用いた。二相ステンレス鋼は超塑性現象を得るために前処理として、 α 単相化処理(1573K、一時間保持後、水冷)を施し、75%の圧下率で冷間圧延を施した。最終的に厚さ 8mm の平板を作成し、試験片の接合面は圧延方向と垂直な面にした。そして、異なる接合面の粗さを得るため、接合面に片削り盤加工、エミリー及びバブ研磨を施した。

2.2 実験方法 接合条件は温度 1273K~1373K、時間 60~900s、圧縮荷重 3~9MPa 及び表面粗さ R_{max} 0.02~320 μ m で行った。接合試験は 100Pa の真空中で、1K/s の条件下で接合温度まで昇温し、均熱化のため 10 分間保持した後、圧縮荷重をかけることにより実施した。負荷応力が設定した応力となった時点より接合時間を取り、終了後直ちに荷重を解除して試験片を空冷した。

硬さ試験はマイクロピッカース試験機を使用し、荷重は 50g を用いた。引張り試験の試験条件は常温で、ひずみ速度 3.0×10^{-4} mm/s で行った。疲労試験は、常温で繰返し速度 20Hz の正弦波で、 $R=0$ の条件で行った。なお、S45C との接合体を A 材、S15C との接合体を B 材と呼ぶことにする。

3 実験結果及び考察

3.1 A 材の接合強度に及ぼす諸因子の影響

Fig1 は異なる温度の接合時間と強度の関係を示す。ある一定の時間において温度が高い方が高い強度が得られた。温度の上昇は材料の降伏応力を低下させ、クリープ変形や原子の拡散を活性化し接合強度が上昇すると考えられる。

Fig2 は接合荷重が接合強度に及ぼす影響を示す。圧縮荷重が増加するにつれて接合強度も増加しているのが確認できる。これは、圧縮荷重の増加に伴い接合の塑性流動性による密着化が促進され強度が上昇すると考えられる。

Fig3 は異なる圧縮荷重の接合時間と変形率の関係を示す。Fig3 より加圧荷重と接合時間が大きくなればなるほど変形率が高くなっている。変形率が高いと実用的な面で望ましくないと考えられるので、接合強度だけでなく変形率からも最適接合条件を考える必要がある。

Fig4 は表面粗さと接合強度の関係を示す。表面粗さ R_{max} 0.2 μ m 及び 0.32 μ m では、同じ熱履歴を受けた S45C の母材と同じ強度が得られた。そして、 R_{max} が大きくなると

Fig.1. Relationship between bonding strength and time at different temperatures.

Fig.2. Relationship between bonding strength and pressure

Fig.3. Relationship between ratio and bonding time at different pressures.

Fig.4. Relationship between bonding strength and surface roughness.

強度が明らかに低下することが確認できる。これは、表面粗さが大きくなれば、接合時十分に密着できずに隙間ができるため接合時間が低下することが起因しているものと考えられる。

3.2 最適接合条件

以上の結果より A 材の最適接合条件は温度 1373K、時間 220s、圧縮荷重 3MPa 及び表面粗さ R_{max} 0.32 μ m であり、その時の変形率は 1%であることが確認された。また、接合温

Fig.5. Relationship between bonding strength and bonding time at different pressures

度や表面粗さは S45C, S15C とともに接合挙動に及ぼす影響は変わらないと判断できるので、荷重と時間だけ変化させ B 材の接合を行った。

Fig5 は B 材における圧縮荷重と接合強度の関係を示す。図より、荷重が 3MPa と 2.5MPa では 120s 付近で母材とほぼ同程度の強度まで引張り強度が上昇した。従って、二相ステンレス鋼と S15C との最適接合条件は温度 1373K、時間 150s、圧縮荷重 2.5MPa 及び表面粗さ R_{max} 0.32 μ m と考えられる。このことより S15C は S45C よりさらに低負荷、短時間で接合することができるため、接合に適した材料であることがみとめられた。

3.3 接合界面近傍の組織特性及び硬さ特性

Fig6(a)は A 材の接合界面近傍の組織写真を示し、Fig6(b)

はB材の接合界面近傍の組織写真を示す。

炭素鋼の標準組織としてパーライト(黒い組織)とフェライト(白い組織)が見られる。接合界面近傍においてはパーライトがなくフェライト(白い領域)が見られる。これは、脱炭領域であると考えられる。また、二相ステンレス鋼側には接合界面近傍にクロム炭化物(黒い領域)が見られる。

Fig6. Microstructures near bonding interfaces

Fig7. Hardness distribution across the bond interface of the bonded specimens

Fig7は両接合体の代表的な硬さ分布を示す。図より、二相ステンレス鋼側においては、両接合体とも接合面に向かって硬さが増加しているのが分かる。しかし、B材の方がA材に比べて変化の領域が少ないのが分かる。また炭素鋼側においては、A材は接合面に向かって硬さが低下しているが、B材はほとんど変化が見られないことが確認できる。

これより、この硬さの変化の原因は、加炭及び脱炭現象によるものだと考えられる。二相ステンレス鋼よりも比較的高い濃度の炭素(C)が含まれる炭素鋼は原子の拡散により、その炭素が二相ステンレス鋼側に移動し脱炭現象により炭素鋼側の硬さが低下する。それに対して、二相ステンレス鋼側では加炭現象により硬くなる。つまり、A材には硬化及び軟化領域が存在する。それに対してB材はA材よりも炭素含有量が少なく、硬さに影響するパーライトが少ないために炭素鋼の硬さの変化に影響がでなかったと考えられる。

3.3 引張り特性

Table.1 Tensile properties of bonded specimen

Specimen	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
SUS Matrix	707.9	45.8	53.5
S45C Matrix	715.4	20.6	18.8
A specimen	708.8	10.1	11.1
S15C Matrix	434.3	33.5	60.6
B specimen	418.2	25	59.4

Table1は両接合体の引張り特性を示す。また、母材との比較のため同じ熱履歴を受けたそれぞれの母材も表に載せている。Table1より両接合体ともに母材と同程度の優れた引張り強度が得られた。しかし、A材は伸び、絞りともに母材より低い値を示す。それに対して、B材は伸び、絞りともに母材とほぼ同じ値を示した。

また、接合体の破断場所ではA材が接合界面付近であるのに対し、B材は接合界面から離れた炭素鋼側で破壊が起こっていることが確認できた。

この結果からA材においては接合界面付近で低強度部である脱炭層を含むのにもかかわらず母材とほぼ同程度の強度を示す。これは、本研究のように局所的な低強度の層を持つ材料は引張り荷重を受けると、低強度部で先行して生じる塑性変形が強度の高い隣接部によって拘束され、低強度部は多軸引張り応力状態になる。それにより材料を破壊するのに必要な応力は低強度部そのものと比べて大きくなると考えられる。

3.4 疲労特性

(a) DSS, S45Cmatrix, A specimen

(b) S15Cmatrix, B specimen

Fig8 S-N curves of bonded specimens and parent metals

Fig8(a), (b)は両接合体のS-N曲線を示す。引張り特性と同様に同じ熱履歴を受けたそれぞれの母材も載せてある。

Fig8(a)より、A材は母材に比べて少し強度が低下しているのが認められる。さらに、母材よりデータのばらつきが大きいことが分かる。これは接合界面付近の組織の不均一性、特に低強度部の脱炭層において優先的にき裂が進展、成長するため、疲労特性に悪影響を及ぼすと考えられる。また、Fig8(b)よりB材は母材とほぼ同程度の強度がえられたが、少しのばらつきが確認できる。これは、パーライトが少ないために硬さには変化が見られなかったが、やはり脱炭層における組織の不均一性が影響していると考えられる。

つまり、接合時間が長くなると脱炭層の幅も大きくなると考えられるので、時間の短縮が必要不可欠である。その改善方法の有効な手段として、本研究のような超塑性材料の利用が考えられる。さらに接合同士の密着のしやすさを考えると、延性に優れた材料が接合に適していると考えられる。

4 結言

超塑性を発現させるため、特別な前処理を施した超塑性二相ステンレス鋼を用い、炭素鋼(S45C, S15C)との固相接合を行い、接合強度に及ぼす諸因子の影響を検討した。その結果、特にS15Cとの接合体では極めて低負荷、短時間の接合条件で母材と同程度の引張り強度を持つ接合体が得られた。疲労強度についてはS45C接合体は母材よりやや低下するが、S15C接合体では母材とほぼ同程度の強度が得られた。