

技術資料



Technical Data

バッファ材による TiAl 合金 /Cr-Mo 鋼の接合強度の安定化

堀尾浩次*

Stabilization of Strength of Bonded Joint with TiAl Alloy / Cr-Mo Steel by Buffer Material

Hirotsugu Horio

Synopsis

TiAl alloy has been applied to turbine wheels in turbochargers of automobiles, from the viewpoint of high tensile properties and high creep strength at elevated temperature. The welding and joining techniques have been needed to join the turbine wheels made of TiAl alloy and the steel shafts.

The transition liquid-phase diffusion bonding process was carried out to join TiAl alloy and Cr-Mo steel with Ni brazing filler sheet. A buffer material with the thickness of 0.5 mm was inserted between the bonding interfaces. It consists of 19Cr heat-resistant ferritic stainless steel with low carbon. Tensile property of bonded joints with the buffer material was investigated by the heat cycle test at 1000 cycles from 343 K to 923 K and the thermal exposure test at 923 K during 1000 h. Diffusion situation on the bonded interface was observed by electron probe micro analyzer (EPMA).

The buffer material can have the following effects.

- Getting stable high tensile strength of bonded joint because of suppressing generation of carbides at the bonded interface.
- Keeping tensile strength of bonded joint stable after the heat cycle test and the thermal exposure test.
- Blocking the diffusion of carbon in Cr-Mo steel into TiAl alloy.
- Having the oxidation resistance of substantially equal to that of TiAl alloy at 923 K.

2012年11月12日受付

*大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

1. 緒言

近年、燃料費の高騰、低炭素社会の実現に向けた取組みにより、輸送機にAl合金、Ti合金などの軽金属が多く使用されてきている。その中の一つであるTiAl合金は高温における引張強度が高く、また高いクリープ強度を有する特長から、自動車用ターボチャージャーのタービンホイール^{1), 2)}、航空機エンジンのタービンブレード^{3), 4)}などの高温部材に適用が広がっている。

TiAl合金製のタービンホイールでは、シャフトとなる鋼との溶接技術・接合技術が必要である。TiAl合金と鋼との異材溶接・接合は拡散接合⁵⁾、ロウ付け⁶⁾などの接合技術について、研究開発が進められている。母材を溶融させる溶接では、TiAl合金のTiと鋼のFeが脆弱な金属間化合物を生成することが知られており、溶接の開発は殆ど実施されていない。そこで、本開発では、接合方法に母材を溶融させない液相拡散接合法^{8), 9)}を用いた。

また、クラッド鋼などの溶接割れが発生しやすい異材溶融溶接において、異材となる部分に中間層として、バッファ材の溶接を行うこと⁷⁾がある。バッファ材の役目として、析出物の抑制、溶接歪の緩和が挙げられる。本開発においても、上述の観点からTiAl合金と鋼の間に中間層として、バッファ材を挿入することを試みた。本稿ではバッファ材の接合強度に及ぼす効果を紹介する。

2. 実験方法

2. 1 供試材

今回、TiAl合金はタービンホイールで実績のあるDAT-TAl^{®10)}を供した。鋼はSCM435H鋼を用いた。

バッファ材は高温部位で使用され、炭素含有量が低く、線熱膨張係数がTiAl合金とSCM435Hの間である19Cr系のフェライトステンレス鋼を用いた。Table 1に今回使用した各種材料の化学成分を示す。Fig. 1には各種材料の熱膨張係数を示す。573 K以上の温度において、バッファ材の線熱膨張係数はTiAl合金とSCM435H鋼の中間の値となり、接合歪みの緩和が期待される。

なお、TiAl合金は精密鑄造されたタービンホイールを、SCM435H鋼はφ20 mmの丸棒を準備した。Fig. 2にTiAl合金およびSCM435H鋼の接合面形状の模式図を示す。また、バッファ材はφ20 mmを準備し、Fig. 3に示すように厚み0.5 mmのドーナツ状の試験片に加工した。

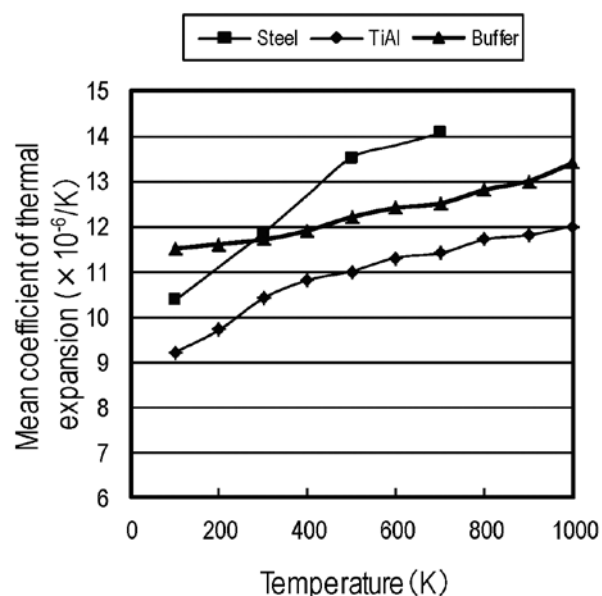


Fig. 1. Coefficient of linear thermal expansion of base metals and buffer material.

Table 1. Chemical composition of base metals and buffer material (mass%).

| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Fe | Nb | Al | Ti | Mo |
|-----------------|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| TiAl alloy | - | 0.2 | - | - | - | - | 1.0 | - | 4.8 | 33.5 | Bal. | - |
| SCM435H steel | 0.35 | 0.20 | 0.70 | 0.003 | 0.002 | - | 1.0 | Bal. | - | - | - | 0.20 |
| Buffer material | 0.015 | 0.20 | 0.20 | 0.02 | 0.001 | 0.23 | 19.5 | Bal. | 0.32 | 0.002 | 0.003 | 0.07 |

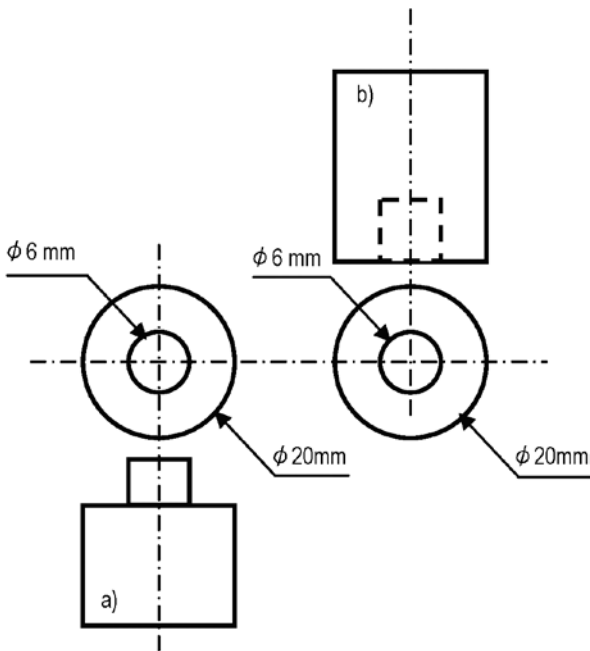


Fig. 2. Dimension of bonding test specimens. a) TiAl alloy. b) SCM435H steel.

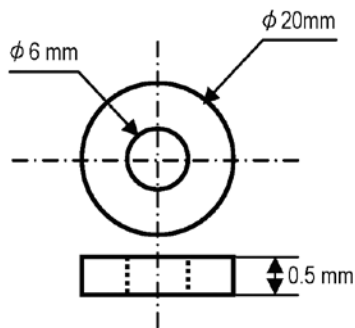


Fig. 3. Dimension of buffer material specimen.

2. 2 接合実験

今回の接合方法は TiAl 合金, SCM435H 鋼およびバッファー材を溶融させない液相拡散接合法を用いた。液相を発生させるフィラーは JIS Z 3625 BNi-3 の Ni-Si-B 系の箔を接合面形状に合わせて使用し, Table 2 に示す条件で接合した。高周波誘導加熱による接合状況の模式図を Fig. 4 に示す。バッファー材は TiAl 合金と SCM435H

鋼の間に挟み, フィラーはバッファー材の接合面両面に挿入させ, 接合面を加圧させながら, 高周波誘導加熱により, 接合部を加熱して, 接合した。バッファー材の厚み 0.5 mm に対して, 高周波誘導加熱コイルの幅 25 mm により, 十分な設定温度の加熱幅が得られるため, 一度の高周波誘導加熱で, TiAl 合金とバッファー材, SCM435H とバッファー材を接合可能であった。また, バッファー材の効果を確認するため, バッファー材なしの接合継手も製作した。接合雰囲気は酸化を防ぐためにアルゴン雰囲気とした。接合後, 接合継手材を大気中で, 熱処理時間 723 K, 熱処理時間 0.5 h の歪取り焼鈍を実施した。

Table 2. Bonding condition.

| | |
|-------------------------|----------------------------------|
| Filler | JIS Z 3625 BNi-3 Ni-Si-B type |
| Bonding temperature (K) | 1293, 1323, 1373 |
| Holding time (s) | 30 |
| Bonding pressure (MPa) | 5.0 |

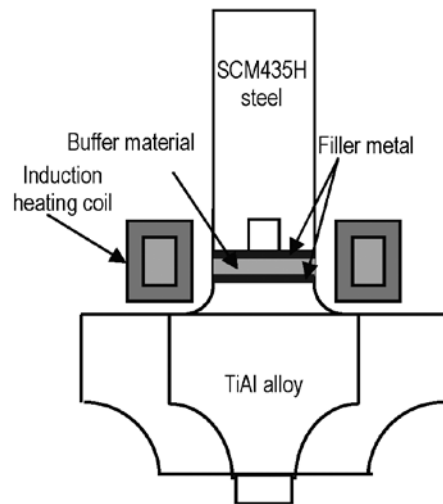


Fig. 4. Schematic diagram of bonding equipment.

2. 3 接合継手特性評価試験

(1) 評価試験片製作

バッファ材の有無に係わらず、全ての接合された試験片の接合部に、溶融して、はみ出したフィラーが確認された。接合継手特性評価試験において、その部位が切欠きになる懸念があるため、全周にわたり機械加工で除去した。

(2) 引張試験

Table 2 に示す接合温度 1323 K に対して、バッファ材の効果を確認するため、バッファ材ありとバッファ材なしの接合継手を引張試験に供した。また、バッファ材ありの接合継手において、引張強さに及ぼす接合温度の影響を調査した。引張試験は 500 kN 能力のアムスラー式万能試験機で実施した。

(3) 熱サイクル試験

バッファ材の有無を比較するため、Table 2 に示す接合温度 1323 K で接合したバッファ材ありとバッファ材なしの接合継手を熱サイクル試験に供した。熱疲労試験は高温槽と低温槽の 2 槽を持つ流動層を用い、Fig. 5 に示すように、923 K の流動層内で 300 s 保持した後、343 K の流動層内で 300 s 保持し、それを 1000 回繰り返した。熱サイクル試験後、接合部の浸透探傷試験および引張試験を行った。

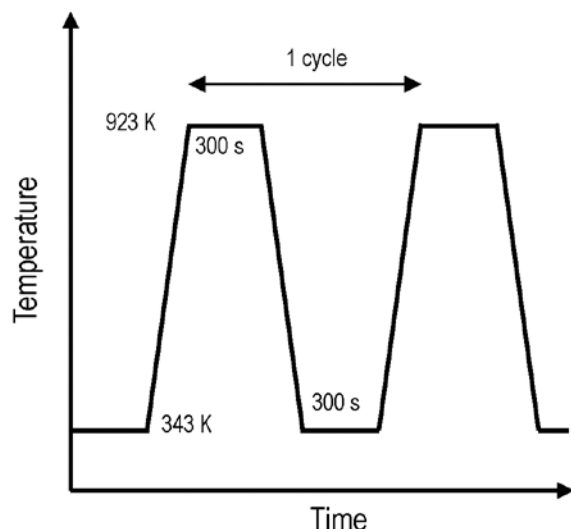


Fig. 5. Condition of heat cycle test.

(4) 熱暴露試験

熱暴露試験においても、上述と同様に、Table 2 に示す接合温度 1323 K で接合したバッファ材ありとバッファ材なしの接合継手を供した。加熱は電気炉を用いて、加熱温度 923 K、保持時間 1000 h、大気中雰囲気中で熱暴露試験を実施した。熱暴露試験後、引張試験を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 接合継手の引張強度

Fig. 6, 7 にバッファ材ありの接合継手とバッファ材なしの接合継手の引張試験の結果を示す。バッファ材ありの接合継手強度は TiAl 合金母材破断しており、バッファ材なしの接合継手強度より高く、安定していた。なお、バッファ材なしの接合継手は接合界面破断であった。Fig. 7 にバッファ材なしの接合継手の接合界面で破断した破面の外観を示しているが、破面の大部分は黒色を呈していた。

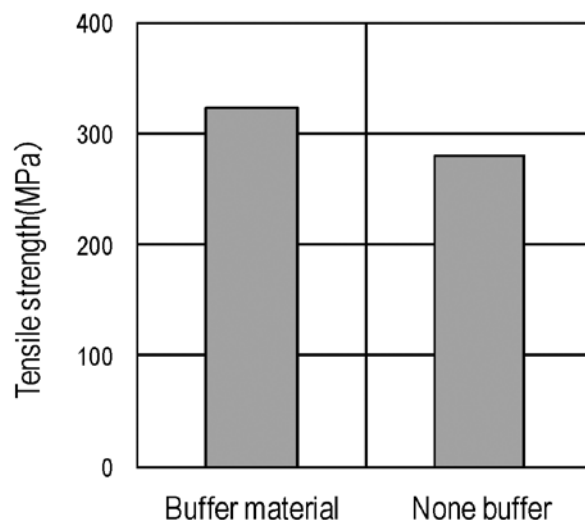


Fig. 6. Result of tensile test of TiAl alloy and SCM435H steel bonded joints.

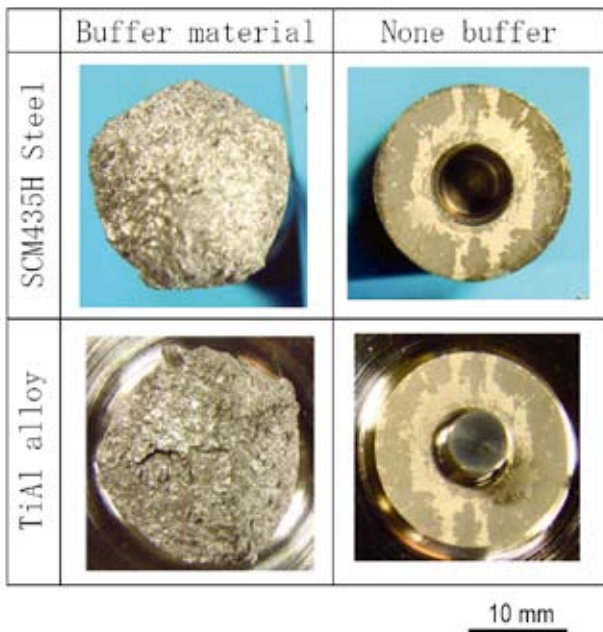


Fig. 7. Appearance of fractured TiAl alloy and SCM435H steel bonded joints (bonding temperature: 1323 K).

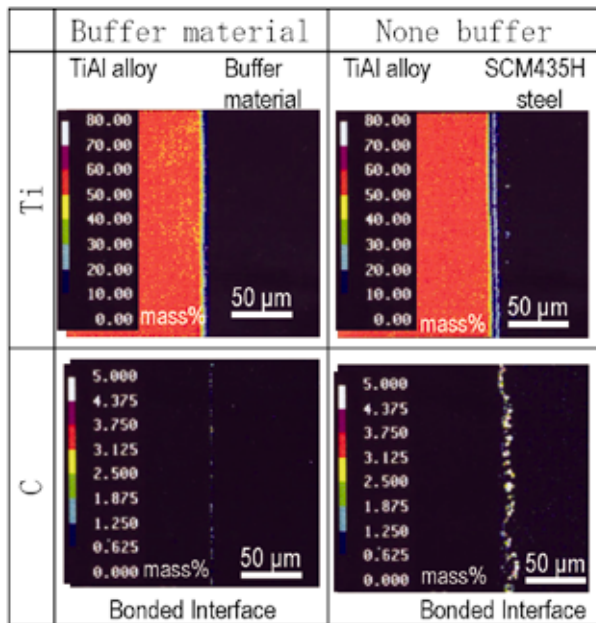


Fig. 8. Ti and C distributions of TiAl alloy and buffer material bonded joint and TiAl alloy and SCM435H steel bonded joint (bonding temperature: 1323 K).

バッファー材あり及びバッファー材なしの接合界面の拡散状態を EPMA (Electron probe micro analyzer) で調査した。Fig. 8 に Ti と C に対する結果を示す。

バッファー材ありのバッファー材と TiAl 合金の接合界面において、炭素の濃化が若干見られるが、バッファー材なしの SCM435H 鋼と TiAl 合金の接合界面に比べ、濃化の程度は非常に低かった。バッファー材の炭素量は 0.015 mass%, SCM435H 鋼の炭素量は 0.35 mass% と約 1/24 の値である。バッファー材が低炭素であることにより、炭素が TiAl 合金に拡散する量が少ないことがその要因と考えられる。また、バッファー材が SCM435H 鋼から TiAl 合金への炭素の拡散を遮断したことも要因の一つと考えられる。

一方、バッファー材なしの接合界面においては、TiAl 合金と SCM435H 鋼との炭素の濃度差が大きいため、炭素の拡散が進み、炭化物が一面に連なって析出している状況になったと考えられる。また、この析出物により、接合界面強度が低下し、その部位から破断したと考えられる。バッファー材なしの破面の外観が黒色を呈していたこともこの炭化物によるものであると考えられる。従って、炭化物の析出度合いが、接合継手の強度、安定性に強く寄与していることが明らかである。

Fig. 9 にバッファー材と SCM435H 鋼との接合界面の EPMA による Si と B の結果を示す。バッファー材と SCM435H 鋼との接合界面において、フィラーに含有している Si や B の濃化が認められた。

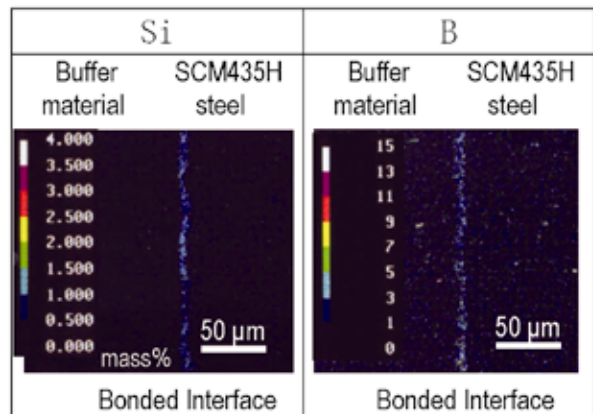


Fig. 9. Si and B distributions of buffer material and SCM435H steel bonded joint (bonding temperature: 1323 K).

拡散接合の観点では、拡散が不十分であるが、引張試験でこの接合界面から破断していないことから強度的には十分であると考えられる。

Fig. 10 にバッファ材ありの接合継手の引張強度に及ぼす接合温度の影響を示す。接合温度が増すにつれ、接合強度が増大する傾向が認められた。接合温度 1293 K ではバッファ材と SCM435H 鋼の接合界面で破断した。拡散不足が接合界面で破断した要因と考えられる。1323 K 以上では TiAl 合金破断に至った。接合温度 1373 K においても、TiAl 合金で破断しており、炭化物が抑制され、接合界面の健全性が確保されていることが認められた。

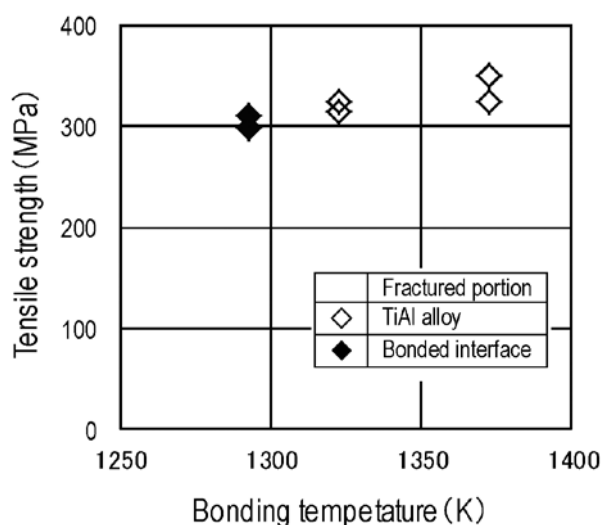


Fig. 10. Effect of bonding temperature on tensile strength of TiAl alloy and SCM435H steel bonded joints with buffer material.

3. 2 熱サイクル試験結果

Fig. 11 に熱サイクル試験後の接合部の浸透探傷試験の結果を示す。バッファ材ありなしに関わらず割れは認められなかった。線膨脹係数の差異により、熱応力が発生するが、この試験温度範囲において、バッファ材なしの接合継手強度でも十分な強度を有していると考えられる。熱サイクル試験後の引張試験において、バッファ材ありの接合継手は TiAl 合金で破断しており、熱サイクル試験後も安定した強度が保持されていた。一方、バッファ材なしの接合継手は接合界面で破断し、強度も低下した。SCM435H 鋼では 923 K の温度に曝されることにより、酸化スケールが形成され、減肉が生じ

ていたが、TiAl 合金では酸化スケールが付与されていなかった。接合界面の表層部分が切欠きの状態となっていたことが強度低下の要因であると考えられる。

Fig. 12 にバッファ材ありの熱サイクル試験後の接合部表層のマイクロ組織を示す。TiAl 合金とバッファ材の表層に酸化スケールは無く、SCM435H 鋼に酸化ス

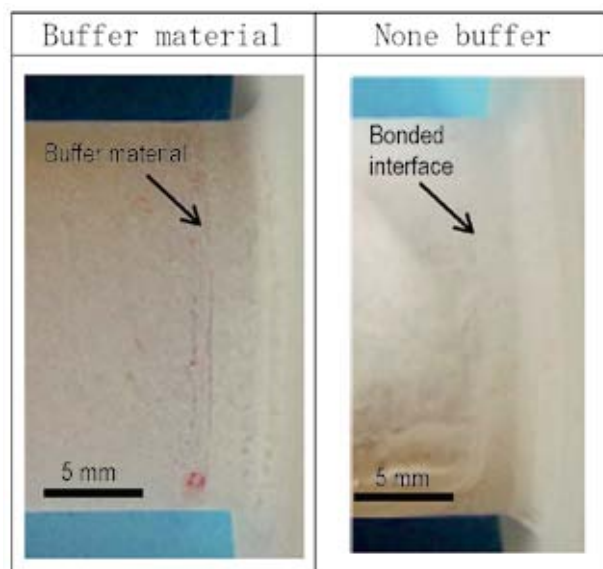


Fig. 11. Result of penetrant testing after heat cycle test.

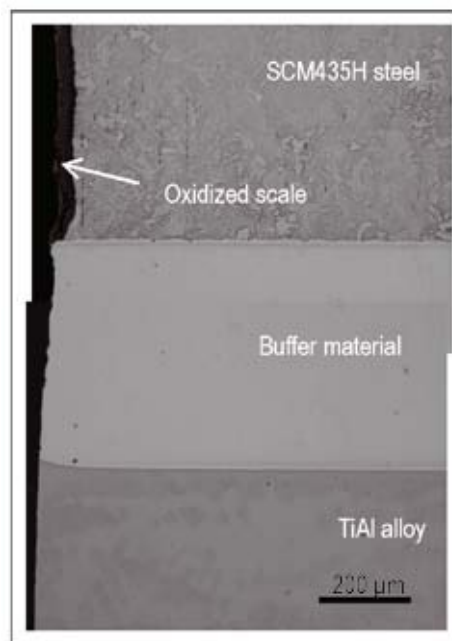


Fig. 12. Microstructure of TiAl alloy and SCM435H steel bonded joints with buffer material.

ケールが認められ、バッファー材と SCM435H 鋼との接合界面が切欠きの状態となっていた。しかしながら、この切欠きとは関係が無く、引張試験において、TiAl 合金で破断した。バッファー材と SCM435H 鋼の接合界面強度は TiAl 合金とバッファー材のものとは比べ、非常に高強度であることが分かる。

3. 3 熱暴露試験結果

大気中における加熱温度 923 K、保持時間 1000 h の熱暴露試験後の接合継手の外観を Fig. 13 に示す。SCM435H 鋼に酸化スケールの剥離が発生していた。熱暴露試験後の引張試験において、バッファー材ありの接合継手は TiAl 合金で破断しており、熱暴露試験後も安定した強度が保持されていた。一方、バッファー材なしの接合継手は接合界面で破断し、強度は熱サイクル試験後の強度よりも更に低下した。更なる低下は温度 923 K に曝される時間が熱サイクル試験の 12 倍になったため、SCM435H 鋼の酸化スケールが厚く形成され、減肉が進行し、接合界面の表層の切欠きがより顕著になったことが大きな要因である。

Fig. 14 にバッファー材ありの接合継手の熱暴露試験後の接合界面の EPMA による Ti と C の結果をに示す。バッファー材ありの接合継手が熱暴露試験後も安定した強度が保持されているのは、接合界面において熱暴露による炭化物の生成が殆ど生じていないことがその要因として考えられる。

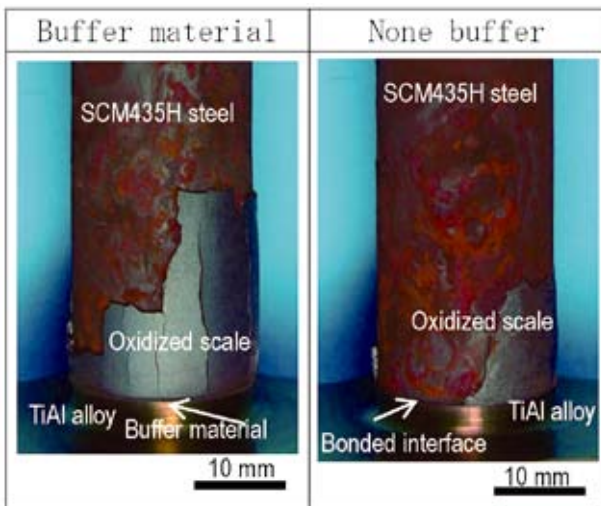


Fig. 13. Appearance of Bonded joints after thermal exposure test at 923 K during 1000 h.

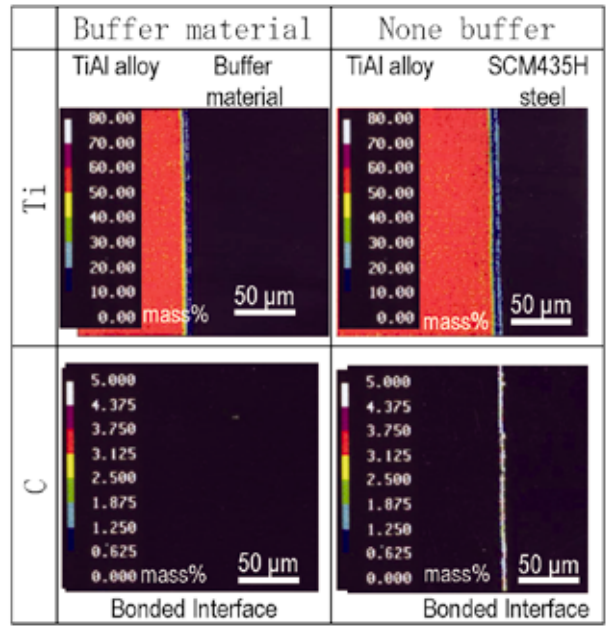


Fig. 14. Ti and C distributions of TiAl alloy and buffer material bonded joint and TiAl alloy and SCM435H steel bonded joint after thermal exposure test at 923 K during 1000 h.

4. まとめ

TiAl 合金と鋼の液相拡散接合において、低炭素量の耐熱フェライト系ステンレス鋼をバッファー材として用いることにより、以下の効果を得た。

- ・バッファー材の厚みを 0.5 mm にすることにより、一度の加熱で TiAl 合金とバッファー材の接合、バッファー材と鋼の接合が可能であった。
- ・バッファー材により、接合界面における炭化物の生成が抑制され、高く安定した接合強度を得られた。引張試験において、接合温度が 1323 K 以上で TiAl 合金から破断した。
- ・バッファー材は SCM435H 鋼から TiAl 合金への炭素の拡散を遮断し、バリア材としての効果も有していた。
- ・熱サイクル試験および熱暴露試験においても、バッファー材により、高く安定した接合強度が保持されていた。

- ・バッファ材は接合界面における炭化物の生成の抑制, SCM435H 鋼から TiAl 合金への炭素の拡散の遮断だけでなく, TiAl 合金とほぼ同等な耐酸化特性を示したことも, 熱サイクル試験および熱暴露試験で, 高く安定した接合強度が保持されていた要因と考えられる.

5. 謝 辞

今回, 接合試験片の準備および接合実験にご協力頂いた株式会社 大同キャスティングスに感謝致します.

(文 献)

- 1) 野田俊治: チタン, 50(2002), 17.
- 2) 鉄井利光, 三浦義光: チタン, 48(2000), 211.
- 3) 錦織貞郎, 松田謙治: 鉄と鋼, 84(1998), 49.
- 4) 荒木隆人, 青木祥宏, 植田祐介, 佐藤彰洋, 細谷昌厚: 石川島播磨技法, 44(2004), 266.
- 5) Y. Morizono, M. Nishida, Y. Kodama, T. Yamamuro, T. Terai, N. Nitta and Y. Ohno: International Symposium on Joining Technologies Advanced Automobile Assembly 2005, 2005, 107.
- 6) T. Noda, T. Shimizu, M. Okabe and T. Iikubo: Mater.Sci. Eng. A239-240(1997), 613.
- 7) 溝豊, 杉山茂嘉, 川嶋巖: 溶接学会全国大会講演概要, 43(1988), 162.
- 8) 竹之内優, 冷水孝夫, 堀尾浩次: 電気製鋼, 67(1996), 161.
- 9) 堀尾浩次, 山田龍三, 冷水孝夫: 電気製鋼, 72(2001), 163.
- 10) 小柳禎彦: 電気製鋼, 82(2012), 79.