

機関番号：13102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：平成 21 年度～22 年度

課題番号：21760069

研究課題名（和文）超合金摩擦圧接異材継手の高温繰返し変形挙動の解明と疲労寿命評価モデルの構築

研究課題名（英文） High temperature cyclic deformation and fatigue life prediction for dissimilar friction welding of superalloy

研究代表者 阪口基己（SAKAGUCHI MOTOKI）

長岡技術科学大学・助教

研究者番号：60452083

研究成果の概要（和文）：

本研究では、固相接合法の一つである摩擦圧接法にて鍛造材と鋳造材からなる超合金異材継手を製作し、その高温下での繰返し変形挙動ならびに寿命特性を実験的に明らかにした。具体的には、まず、Ni 基超合金鍛造材（IN718）および鋳造材（MarM247）からなる異材継手に対し、低サイクル疲労、熱機械疲労、クリープ疲労環境下での繰返し変形・破損挙動について精査した。その結果、異材継手の低サイクル疲労寿命、熱疲労寿命は両母材とほぼ同等となるのに対し、クリープ疲労環境下では異材継手の寿命が大きく低下することが明らかとなった。つぎに、それらの実験結果を踏まえ、接合プロセスにより生じる熱影響部ならびに熱機械的影響部における力学的特性についての基礎データを取得するとともに、それぞれの界面での力学的不連続性を考慮した弾粘塑性変形解析を行い、クリープ疲労環境下での材料の変形挙動について検討した。その結果、クリープ疲労環境下で異材継手の寿命が短くなる要因は、(a)異材継手では、負荷の繰返しにともない応力範囲と応力比が変化すること、(b) 弾性追従機構にともないクリープ変形抵抗低い鍛造材側に非弾性ひずみが集中すること、(c) 強度的な不均一性により鍛造材側の接合界面近傍にて静水圧応力が増大すること、によることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

The high temperature fatigue strengths and cyclic deformation behavior of the dissimilar friction welded superalloys joint between the cast polycrystalline Mar-M247 and the forged IN718 alloys were investigated under low cycle and thermo-mechanical fatigue loadings, in comparison with those of the base metals. The experiments showed that the lives of the dissimilar joints were significantly influenced by the test conditions and loading modes. Not only the lives themselves but also the failure positions and mechanisms were sensitive to the loading mode. The fracture behaviors depending on the loading modes and test conditions were discussed, based on the macroscopic elastic follow-up mechanism and the microstructural inhomogeneity in the friction weld joint.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
21 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
22 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：高温材料強度学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：超合金、摩擦圧接、異材継手、疲労、寿命予測

1. 研究開始当初の背景

Ni 基耐熱超合金の接合については、従来から、アーク溶接や電子ビーム溶接といった熔融溶接法が試みられてきたが、母材の組み合わせによっては接合そのものが困難であり、また、仮に接合できた場合でも、溶接部における凝固割れや溶接による熱影響部 (HAZ) の形成、金属間化合物の生成等により著しい強度低下が生じるため、未だ高温高压部材への適用には至っていない。これら超合金の異材接合における問題克服には、母材の融点以下で接合プロセスを完了させる固相接合法が有用であるが、近年では、母材の突合せ・回転による摩擦熱を利用した摩擦圧接法に期待が集まり、実機への適用も検討され始めていた。しかし、異材継手の高温下での繰返し変形および破損挙動は金属学的にも力学的にも複雑であり、不明な点が多々存在していた。

2. 研究の目的

本研究では、摩擦圧接法にて鍛造材と鍛造材からなる超合金異材継手を製作し、その高温下での繰返し変形挙動ならびに寿命特性を実験的に明らかにすることを目的とした。特に、異材界面近傍の力学的・金属組織的不均一性と変形・破損プロセスとの関連性について精査しながら、弾粘塑性解析を基にした高温強度・寿命評価モデルを構築することを目指した。

3. 研究の方法

上述の目的達成に向け、まず、Ni 基超合金の鍛造材 (Mar-M247) と鍛造材 (IN718) からなる摩擦圧接異材継手を製作した。製作した異材継手に対し、さまざまな条件のもと、低サイクル疲労 (LCF) 試験ならびに熱機械疲労 (TMF) 試験を行い、各環境下での繰返し変形・破損挙動について精査した。つぎに、熱機関の運転中に生じるクリープ変形を模擬し、最大引張負荷時に 10 分の保持時間を取ったクリープ疲労試験を行い、クリープ疲労環境下での破損挙動・寿命特性に関するデータベースを集積した。最後に、圧接プロセスにより生じる熱影響部 (HAZ) ならびに熱機械影響部 (TMAZ) の力学的特性および金属組織的特徴に関する基礎データを取得するとともに、上記で得た各条件下での繰返し変形・破損プロセスとの関連性について検討した。

4. 研究成果

まず、摩擦圧接により接合した Ni 基超合金 IN718/Mar-M247 継手材に対して、様々なひずみ速度条件のもと、LCF 試験ならびに TMF 試験を行い、各試験条件が破損寿命に及ぼす影響、ならびに、破損形態に及ぼす影響について実験的に検討した。LCF 試験結果を図 1 に示す。図 1 より、ひずみ速度の小さい s-s 型とひずみ速度の大きい f-f 型の破損寿命は、実用上重要な低ひずみ範囲において、f-f 型の LCF 寿命が s-s 型のそれよりも長く、一般の金属材料と同様のひずみ速度依存性を示すこと、異材継手の f-f 型 LCF 寿命は M247 単体の f-f 型 LCF 寿命と同程度であることがわかった。また、f-f 型 LCF の場合、破損は M247 側で生じ、M247 単体の f-f 型 LCF と同様で粒内破壊であった。s-s 型 LCF の破損は

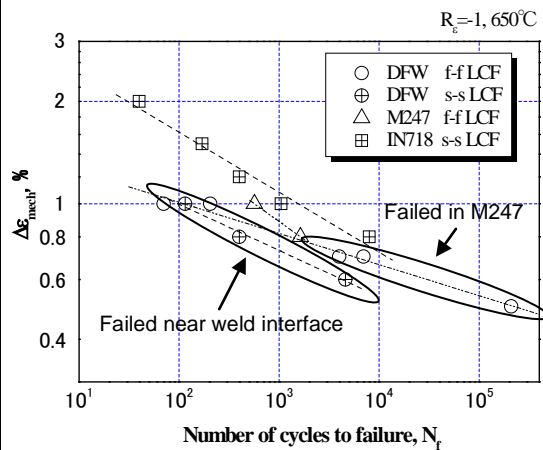


図1 超合金異材継手の低サイクル疲労特性

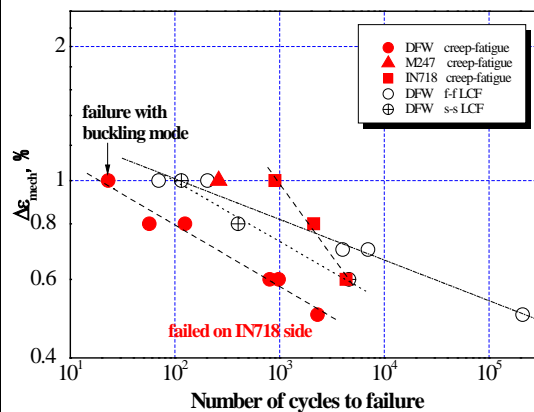


図2 超合金異材継手のクリープ疲労特性

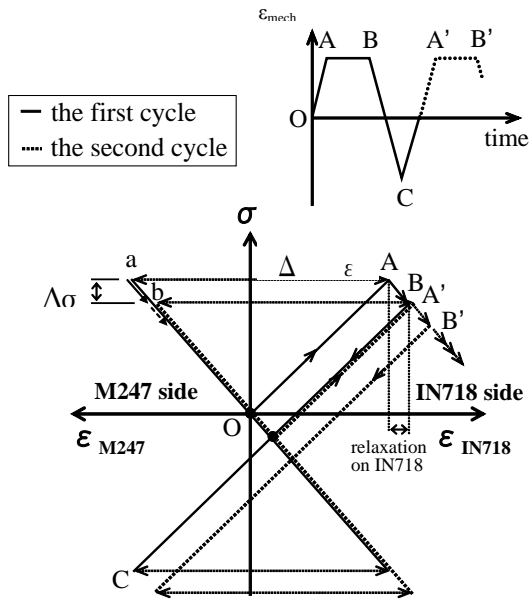


図3 超合金異材継手で生じる弾性追従機構

旧接合界面の微細結晶領域で粒界破壊により生じていた。また、TMF 試験からは、異材継手の TMF 寿命は、in-phase 型と out-of-phase 型でほぼ同等であることがわかった。これらの結果から、f-f 型 LCF ならびに TMF 環境下では、Mar-M247 が有する特有の組織形態が寿命を支配する主要な因子になるが、ひずみ速度の小さい s-s 型 LCF 環境下のように試験中のクリープの影響が無視できなくなると、旧接合界面で破損が生じ、両母材と比較して継手材の強度が低下する可能性があることが明らかとなった。

つぎに、同じ超合金異材継手に対し、引張負荷中に保持時間を持たせたクリープ疲労試験を行った。その結果を図 2 に示す。これにより、異材継手のクリープ疲労寿命は両母材単体のそれよりも有意に短く、また、継手材の s-s 型 LCF 寿命よりも短くなること、また、異材継手の破損は低ひずみ範囲では旧接合界面近傍の IN718 で、高ひずみ範囲では Mar-M247 の圧縮塑性座屈により生じることが明らかとなった。

これらの実験結果を受け、クリープ疲労環境下での継手材の寿命低下の原因を探るため、圧接プロセスにより生じる熱影響部 (HAZ) ならびに熱機械影響部 (TMAZ) の力学的特性および金属組織的特徴に関する基礎データを取得するとともに、変形・破損に及ぼす力学的要因と組織学的要因について検討した。その結果、継手材のクリープ疲労破損は、両母材の力学的性質の不均一性と金属組織の不均質性が重畳することにより、その過程が極めて複雑になり、特に、両母材のクリープ特性の相違が大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。このクリープ変形抵抗の相違により生じる弾性追従機構につ

いて力学的に考察した結果を図 3 に示す。ここでは、縦軸に応力、横軸の左向きに Mar-M247 の引張方向のひずみ、右向きに IN718 の引張ひずみを取り、クリープ疲労条件下での各母材での変形挙動を表したものである。まず、異材継手材に引張負荷が加わると、M247 は左側へ、IN718 は右側にひずみが増加し、最大引張時にはそれぞれ図中の a 点、および、A 点まで変形する。引張保持中、全体のひずみは保持期間中一定に保たれるため、継手材ではクリープによる応力緩和 ($\Delta\sigma$) が生じるが、M247 のクリープ変形抵抗は IN718 と比較して格段に大きいため、クリープによる応力緩和は IN718 でのみ生じ、M247 では弾性的に応力が低下する。この結果、引張保持終了時には、IN718 の力学的状態は点 A→B、M247 は点 a→b に移動するが、この弾性追従機構により、IN718 側には余分な引張クリープひずみ ($\Delta\epsilon_{cr,718}$) が生じることになる。この機構は次サイクル以降の引張保持中にも繰返し生じるため (点 A'→B')、IN718 側には引張クリープひずみがサイクル毎に蓄積されることになり、これによるクリープ損傷は IN718 単体材のものよりはるかに大きくなると考えられる。これらの弾性追従機構にともなうひずみの集中が接合体の寿命低下を引き起こすひとつの要因であると考えられる。

また、有限要素モデルを用いた弾塑性解析により、この弾性追従機構のほかにも、異材継手特有の繰返し負荷中の応力比の変化、接合界面近傍の IN718 での静水応力の増加などが継手材の寿命低下の要因となっていることも明らかとなった。これらの成果は、超合金の異材継手を実際の高温部材に適用する上で重要な設計指針を示すと考えられる。今後は、得られた知見を基に、さらに高精度な寿命設計が行える寿命評価モデルを構築していく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1) Motoki SAKAGUCHI, Yosuke SASAKI, Masakazu OKAZAKI and Koichi NAMBA, "Evaluation of Fatigue Crack Propagation in The Post-Service Gas Turbine Vane", Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.4, No.2, (2010), pp.131-142

2) Tran Hung Tra, Masahiro SEINO, Motoki SAKAGUCHI, Masakazu OKAZAKI, Fatigue Crack Propagation Behavior Relevant to Microstructural Inhomogeneity in A Friction Stir Weldment, Journal of Solid Mechanics and

Materials Engineering, Vol.4, No.6, (2010), pp.840-848

〔学会発表〕（計 7 件）

1) Motoki SAKAGUCHI, Momoko IKE, Masakazu OKAZAKI, "In-situ Estimation of High Temperature Stress Fields Based on Microstructural Analysis of Single Crystal Ni-based super alloys", The 13th Asia-Pacific Conference of Non-Destructive Testing, Yokohama, JAPAN, (2009.11)

2) Tran Hung Tra, Masahiro Seino, Motoki Sakaguchi, Masakazu Okazaki, "Fatigue crack propagation behavior relevant to inhomogeneity in the friction stir weld", Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics 2009, Yokohama, Japan, (2009.11)

3) Motoki SAKAGUCHI, Masakazu OKAZAKI, Momoko IKE, "Effects of Plastic Strain on Directional Coarsening in Ni-base Single Crystal Superalloy: Temperature Dependence and Difference from creep Strain", Superalloys Euro, Munich, Germany, (2010.5)

4) Motoki SAKAGUCHI, Masakazu OKAZAKI, Yousuke SASAKI, "Change of Local Fatigue Crack Propagation Resistance of Gas Turbine Vane after Long Term Service", International Conference on Fatigue Damage of Structural Materials VIII, Hyannis, USA, (2010.9)

5) 多田真人, 岡崎正和, 阪口基己, 山岸郷志, 清野昌宏, "摩擦攪拌接合による Ni 基合金と Al 合金の異材接合体の作製", 日本機械学会北陸信越支部 第 47 期総会・講演会, 新潟, (2010.3)

6) 阪口基己, 多田真人, 岡崎正和, "摩擦攪拌接合による Ni 基超合金と Al 合金の異材接合", 日本機械学会 M&M2010, 長岡, (2010.11)

7) 山野辺壯, 阪口基己, 岡崎正和, 難波浩一, "小型試験片 Ni 基超合金 IN939 のき裂進展特性に及ぼす板厚と結晶方位の影響", 第 48 回高温強度シンポジウム, 第 48 回高温強度シンポジウム, 高知, (2010.12)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

研究室ホームページ：

<http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~okazaki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阪口基己（研究者番号：60452083）
長岡技術科学大学／工学部／助教

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者