

論文の内容の要旨

論文題目 Ni基超合金Alloy718の低サイクル疲労強度に及ぼす
表面加工層の影響のモデル化

氏 名 蓮沼将太

航空機のジェットエンジンの安全のためには、Ni基超合金 Alloy718 の低サイクル疲労強度を明らかにすることが重要である。低サイクル疲労強度は表面加工層の影響を受けるため、表面加工層が Alloy718 の低サイクル疲労強度に及ぼす影響を明らかにすることが重要である。表面加工層が低サイクル疲労強度に及ぼす影響を明らかにするためには、表面加工層の簡便な評価方法の開発も重要である。さらに、表面加工層が低サイクル疲労強度に及ぼす影響をモデル化し、低サイクル疲労寿命予測法を確立することによって低コスト化が可能だと考えられる。

一方で、配管や圧力容器に用いられるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L などでも表面加工層の影響が問題となる。一般的に疲労強度やき裂発生進展挙動は材料に強く依存する。そのため、そのため、他の材料への適用範囲を調査する必要がある。

本研究では、加工を受けた Alloy718 の低サイクル疲労寿命予測モデルを構築することを目的とした。まず、Alloy718 の表面加工層を観察した。それにより、旋盤加工の表面加工層の評価方法を検討した。特に、EBSD を用いた微視組織観察を行い、EBSD を用いた表面加工層の評価方法について検討した。次に、表面加工層の各因子の分割方法について検討した。検討した表面仕上げを試験片に施し、低サイクル疲労試験を行った。それにより、表面加工層が低サイクル疲労強度に及ぼす影響について検討した。その際、残留応力の解放挙動が問題となった。そのため、結晶塑性有限要素法を用いて、残留応力解放挙動を詳細に検討した。低サイクル疲労試験および結晶塑性有限要素法解析を踏まえて、表面加工層が低サイクル疲労に及ぼす影響をモデル化した。さらに、提案したモデルを SUS316L に適用し、モデルの適用範囲について検討した。

得られた知見は以下のとおりである。

(1)表面加工層の観察手法

EBSD 法を用いた微視組織変化観察手法の開発を行った。透過型電子顕微鏡 TEM や硬さ試験結果をEBSDの観察結果と比較し、EBSDを用いた表面加工層観察法について検討した。その結果、旋盤加工された試験片の表面にはバルク層、塑性変形層および微細粒層に分かれていることを観察できた。そして、局所方位差パラメータを用いることで塑性変形層深

さと微細粒層深さを定量的に評価できることが明らかとなった。

表面形状変化については、レーザー顕微鏡および原子間力顕微鏡 AFM を用いて加工傷の形状に着目して観察した。旋盤加工された試験片の表面には加工傷が生じており、加工傷をレーザー顕微鏡で観察することで、加工傷の形状を詳細に観察することができた。加工傷は介在物によって生じていることがわかった。

残留応力については、X 線回折法 XRD を用いて残留応力を測定した。残留応力は XRD を用いることで測定が可能であった。

(2)Alloy718 の低サイクル疲労強度に及ぼす表面加工層の影響

低サイクル疲労試験を行い、表面加工層が低サイクル疲労強度に及ぼす影響について検討した。表面加工層には複数の因子があり、それらが複合的に疲労強度に影響を及ぼすため、個々の影響を個別に検討した上でそれらの影響を総合的に評価する必要がある。そこで、表面加工層の個々の因子を個別に検討するために、表面加工層の分離手法について検討した。電解研磨、エメリ紙研磨による表面除去および荷重条件により表面加工層の因子を分離した。(1)で示した手法を用いて表面加工層を観察し、表面加工層を定量的に評価した。その結果、表面加工層が適切に分離できており、この手法を用いることで表面加工層を分離できることが明らかとなった。

その試験片に対し、低サイクル疲労試験を行い、疲労寿命や微小き裂の発生進展挙動を比較することで、表面加工層のそれぞれの因子が低サイクル疲労寿命に及ぼす影響を検討した。低サイクル疲労試験を行った結果、最表面に微細粒層がある場合、き裂は加工傷および介在物から発生していた。微細粒層を除去した試験片ではき裂はすべり帯から発生していた。塑性変形層はき裂寸法に対して薄く、低サイクル疲労強度に及ぼす影響は小さかった。一方で、残留応力とその解放挙動が疲労強度に大きな影響を及ぼしていた。残留応力はき裂閉口に影響を与え、有効応力拡大係数を減少させ、疲労寿命の初期のき裂進展に影響を与えたと考えられる。Alloy718 に対する実験では、加工傷は疲労寿命に影響を与えていなかった。

SUS316L に対して低サイクル疲労試験を行い、加工傷が低サイクル疲労強度に及ぼす影響について検討した。加工傷が大きい場合、初期き裂寸法を大きくすることから疲労寿命が大きく低下していた。

(3)残留応力解放と微視組織変化の関係

Alloy718 は降伏応力が大きく、低サイクル疲労領域でも残留応力が影響していた。残留応力は降伏応力を超えると解放されるが、降伏が生じる応力である残留応力は微視組織により変化する。また、結晶粒ごとに異方性があることから、局所的に残留応力が解放される可能性がある。そこで、結晶塑性有限要素法により、加工の微視組織をモデル化し、残留応力解放挙動の解析を行った。それにより、残留応力解放と微視組織の相互作用について

て検討した。

残留応力解放シミュレーションを行った結果、ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{xx} = 1.4\%$ の場合、いずれの表面加工層でも残留応力が解放されていた。一方、 $\Delta\varepsilon_{xx} = 0.8\%$ の場合、旋盤加工の表面加工層のモデルでは、表面の残留応力は解放されなかった。微細粒層を取り除いたモデルでは、局所的に残留応力が解放されていた。表面加工層のないモデルでは残留応力が生じていない。この残留応力解放挙動は実験の疲労寿命と整合性が取れていた。塑性変形層では、背応力と残留応力の影響により圧縮負荷時に降伏が生じ、残留応力が解放されていた。微細粒層では、結晶粒径が小さくなった影響により、引張負荷時、圧縮負荷時ともに降伏が生じにくくなっていた。この残留応力解放挙動は実現象と対応していると考えられた。以上のことから、結晶塑性有限要素法によって得られた残留応力解放挙動と疲労寿命の関係は妥当であると考えられた。

塑性変形層の場合、引張負荷時には圧縮残留応力が解放しにくい、圧縮時には解放されやすい。特に、低サイクル疲労では応力が両振りになることが一般的であるため、塑性変形層の圧縮残留応力は特に解放されやすいと考えられる。一方、微細粒層では、引張時および圧縮時ともに圧縮残留応力が解放されにくい。以上のように、塑性変形層と微細粒層では残留応力の解放されやすさが異なる。そのため、圧縮残留応力による長寿命化を期待する場合、微視組織変化も考慮する必要があることがわかった。

(4)表面加工層が低サイクル疲労強度に及ぼす影響のモデル化

低サイクル疲労試験および結晶塑性有限要素法解析の内容をまとめ、表面加工層が低サイクル疲労強度に及ぼす影響をモデル化した。破壊力学を用いてき裂進展をモデル化し、それに表面加工層の影響を適用し、疲労寿命予測モデルを構築した。表面粗さはひずみ範囲の増加としてモデル化した。微視組織変化は、結晶塑性有限要素法による残留応力解放シミュレーションを行い、解放後の残留応力分布を求めることでモデル化した。残留応力については、外力による応力拡大係数と残留応力による応力拡大係数を足し合わせ、き裂開口率を考慮することでモデル化した。加工傷は初期き裂寸法によってモデル化した。この時、加工傷の表面長さ a_0 と深さを初期き裂長さ c_0 としても安全側の予測とはならず、加工傷の表面長さを初期表面き裂長さ $2c_0$ とし、初期アスペクト比 $a_0/c_0 = 1$ を仮定することで安全側の予測が得られる。

このモデルを用いて疲労寿命予測を行い、実験結果と比較して妥当性について検討した。実験結果と解析結果を比較したところ、解析結果は実験結果の90%~130%となった。そのため、提案したモデルは妥当であると言える。

(5)提案モデルの適用範囲

以上の提案した手法をSUS316Lに適用し、他の材料への適用性について検討した。提案した手法を用いて表面加工層を観察した結果、SUS316Lでも表面加工層が観察可能であっ

た。提案した手法を用いて表面加工層を分離したところ、SUS316Lでも表面加工層を分離できていた。その試験片に対し、低サイクル疲労試験を行った。最表面が微細粒層の場合、加工傷および介在物からき裂が発生していた。微細粒層を取り除いた場合、すべり帯からき裂が発生していた。加工傷が大きい場合、疲労寿命が大きく低下していた。一方で、残留応力の影響は小さかった。提案したモデルをSUS316Lに適用し、疲労寿命を予測した結果、安全側の疲労寿命を予測できていた。そのため、SUS316Lに対しても本研究で提案したモデルを適用できると言える。

表面加工層の因子が「残留応力」「加工傷」「粗さ」「微細粒層」「塑性変形層」で構成されており、これらの因子がき裂及ぼす影響が(2)に示したような影響ならば、他の材料にも適用可能であると考えられる。多くの材料の表面加工層は上記の条件を満たすため、一般的な材料では本研究のモデルは適用できる。

(6)今後の展望

本研究で用いた加工傷評価法、残留応力測定法およびEBSD観察を用いて表面加工層を評価し、表面加工層モデルに適用することで、実験を行わずとも疲労寿命を予測できる。これにより、実験を行わずとも疲労寿命を予測できることからコスト削減につながる。また、実製品の加工状態から疲労寿命を予測できるようになることから、加工不具合発生時の製品安全性評価等にも役立つと考えられる。