

| | |
|----------|--|
| 氏名（本籍） | 岡田 博成（愛知県） |
| 学位の種類 | 博士（工学） |
| 学位授与番号 | 甲第 398 号 |
| 学位授与日付 | 平成 23 年 3 月 25 日 |
| 専攻 | 生産開発システム工学専攻 |
| 学位論文題目 | 溶射および DLC/溶射複合皮膜材の疲労挙動と破壊機構 (Fatigue behaviour and fracture mechanism in structural materials with thermally sprayed and DLC/thermal spray hybrid coatings) |
| 学位論文審査委員 | (主査) 教授 戸 梶 恵 郎 (副査) 教授 王 志 剛 准教授 植 松 美 彦 |

論文内容の要旨

現在、技術の急速な進歩に伴い、構造用部材に求められる要求が厳しさを増している。その要求に応えるために優れた力学特性を有する新素材の開発と、既存材料の特性を改善する試みがなされている。表面改質技術もそのうちの一つであり、すでに多く分野で使用されている。また、その使用目的もさまざま、耐熱性や耐食性、耐摩耗性、絶縁など多岐に渡る。特に溶射は、様々な利点を有するため、構造用部材への適用に対して期待される。一方、DLC 皮膜は、耐食性、耐摩耗性、低摩擦係数などの長所を有することから、近年注目を浴びている表面処理手法である。そこで、DLC 皮膜と溶射皮膜の長所を合わせもつ複合皮膜が創製できれば、種々の従来材料を新たな用途へ展開することも可能である。また、このような複合皮膜を構造部材に適用する場合、繰返し負荷に対する疲労特性の把握が重要となる。こうした背景から、本論文では、高速フレーム溶射およびプラズマ溶射によるアルミナ皮膜を有するステンレス鋼 SUS403、DLC/WC-12Co 溶射複合皮膜を有するアルミニウム (Al) 合金 A5052 およびマグネシウム (Mg) 合金 AZ80A について、大気中で回転曲げ疲労試験を行い、疲労挙動と破壊機構に及ぼす皮膜の影響について検討した。

緒論では、「表面改質技術の工学的意義」、「表面改質材の疲労問題」、「表面改質の各種技術」、「溶射の特徴」、「溶射材料の特性と疲労に関する従来研究」、「DLC 皮膜の特徴」、「DLC 被覆材の特性と疲労に関する従来研究」、「複合皮膜の特性と疲労に関する従来研究」、「本論文の目的および構成」について述べる。

第 1 章では、マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403 を基材とし、2 種類の皮膜厚さで HVOF と従来の溶射手法である APS を使用してアルミナ被覆材を作製し、大気中における回転曲げ疲労試験を実施して、被覆材の疲労挙動と破壊機構を検討した。その結果、皮膜厚さを除外した応力を用いて評価した場合、APS 皮膜材では、疲労強度は皮膜厚さに関係なくプラスチックよりもやや高くなる。これは皮膜が有効に応力を負担するためである。一方、HVOF 皮膜材の疲労強度は膜厚が薄い場合には APS 皮膜材よりも高い疲労強度を示す。これは HVOF 皮膜の方が緻密であり、密着強度と弾性係数も高く、APS 皮膜よりも有効に応力を負担するためである。しかし、HVOF 皮膜が厚膜の場合、基材への密着強度および弾性係数が高いため、皮膜の応力負担が大きく初期に皮膜が割れ、その結果疲労強度はプラスチックと同等となった。以上のように HVOF は APS と比較して、緻密で密着性および弾性率の高い皮膜を形成できることを明らかにした。しかし、これらの結果はぜい性材料であるアルミナを被覆した場合であり、じん性の高い溶射材料を使用した場合、異なる結果が得られると考えられる。

第 2 章では、Al 合金に DLC/WC-12Co 溶射複合皮膜を製膜し、疲労挙動と破壊機構を検討した。DLC 製膜時に、溶射皮膜に基材まで到達する割れが発生した。これは皮膜と基材の熱膨張係数の違いによって、昇温時に Al 基材の膨張に WC-12Co 溶射皮膜が追従できず、このような割れが発生したと考えられる。しかし、割れの内部には DLC がすき間無く充填されており、き裂の発生には無関係であった。複合皮膜材および溶射皮膜材において中間層の役割は大きく、HVOF による WC-12Co 溶射層は、DLC と同程度の高い弾性係数にも関わらず、Co が延性材料であるため皮膜の割れに対しても強い。そのために高い弾性係数の中間層が、Al 基材の変形を抑えて皮膜が有効に応力負担し、疲労強度を改善した。また、複合皮膜化によって DLC 層が中間層の割れを抑制するため、中間層厚さが 70 μm の場合に疲労強度が著しく向上した。しかし、中間層厚さが 120 μm の場合、複合皮膜化の効果は認められなかった。これは中間層の膜厚の増加に伴い DLC 層の影響が相対的に小さくなるためである。したがって、複合皮膜として DLC 層の拘束力を活かして疲労強度を向上するには、効果的な中間層厚さがあることを明らかにした。

第 3 章では、Mg 合金に DLC/WC-12Co 溶射複合皮膜を製膜し、疲労挙動と破壊機構を検討した。Al 合金基材と同様に、溶射皮膜に基材まで到達する割れが確認されたが、き裂の発生には無関係であった。複合皮膜は DLC 単層皮膜より疲労限度向上の効果が小さかった。複合皮膜材では、WC-12Co 溶射時に生じた基材の凹部における応力集中によりき裂が発生したためであり、最も膜厚の薄い複合皮膜材では、疲労強度は基材より低下した。これは薄い皮膜が基材凹部におけるき裂発生を抑制できなかったためである。複合皮膜材において疲労強度を比較すると、中間層厚さが厚いほど複合皮膜としての疲労強度への効果は大きく、

中間層厚さが80 μm の場合に有限寿命域の疲労強度も向上した。これはAl合金基材の場合と同様に、高剛性の中間層が、Mg基材の変形を抑えるとともに皮膜が有効に応力負担するためである。

結論では、第1章から第3章の結果を総括するとともに、本研究で得られた成果の工学的有用性について述べた。

論文審査結果の要旨

近年、急速な技術の進歩に伴い構造用部材に課せられる要求は厳しさを増し、優れた力学的特性を有する新素材の開発や既存材料の特性を改善する試みがなされている。表面改質はその手法のひとつであり、すでに多くの分野で使用されている。その使用目的も様々であり、耐熱性、耐食性、耐摩耗性、絶縁など多岐に渡る。種々の表面改質法の中で、溶射技術は様々な利点を有するため構造用部材への適用が期待されている。またDLC皮膜は、耐食性、耐摩耗性、低摩擦係数などの長所を有することから近年注目を浴びている。したがって、これらの二つの皮膜の長所を合わせ持つ複合皮膜が創製できれば、従来材料を新たな用途へ展開することも可能である。このような複合皮膜を構造部材に適用する場合、繰返し負荷に対する疲労特性の把握が重要となるが、溶射とDLCを組み合わせた複合皮膜の形成プロセスや複合皮膜材の疲労挙動に関する研究はほとんど行われていない。

こうした背景から、本論文では、DLC皮膜とWC-12Co溶射皮膜から成る複合皮膜を作製するとともに、アルミナ皮膜を有するステンレス鋼やDLC/WC-12Co溶射複合皮膜を有するアルミニウム (Al) 合金およびマグネシウム (Mg) 合金の回転曲げ疲労試験を行い、疲労挙動と破壊機構に及ぼす皮膜の影響について検討している。本研究で得られた成果は、複合皮膜の実用化に多大な貢献をなすものであり、学術的かつ工学的に意義深いものである。したがって、本論文は学位論文として十分な内容と価値を有するものと認められる。以下に本論文の主要な結果を述べる。

第1章では、2種類の溶射手法、すなわち高速フレーム (HVOF) 溶射と従来の溶射手法である大気圧プラズマ溶射 (APS) によってアルミナセラミックスを被覆したステンレス鋼 SUS403 を用いて回転曲げ疲労試験を実施し、溶射手法の相違が破壊機構に及ぼす影響の基礎的検討を行っている。その結果、膜厚が薄い場合にはHVOF皮膜材はAPS皮膜材よりも高い疲労強度を示すが、これはHVOF皮膜のほうが緻密であり、かつ基材への密着強度と弾性係数も高く、APS皮膜よりも有効に応力を負担するためであることを見出している。しかし、膜厚が厚い場合、密着強度と弾性係数の高いHVOF皮膜では基材との変形不整合の影響が強く現れるために荷重繰返し初期に皮膜が割れ、その結果APS皮膜材よりも疲労強度が低下することを示し、製膜方法と破壊機構の相関を明らかにしている。

第2章では、DLC/WC-12Co溶射複合皮膜を被覆したAl合金A5052について疲労挙動と破壊機構について検討している。溶射皮膜と基材の線膨張係数の相違によって、DLC製膜時に複合皮膜に基材まで到達する割れが発生することを明らかにし、DLC製膜温度の制御が複合皮膜形成の重要なパラメータであることを示している。複合皮膜によって疲労強度は改善されることを明らかにし、これはAl合金よりも高い弾性係数を有する中間層のWC-12Co溶射皮膜がAl基材の変形を抑制するとともに、皮膜が有効に応力負担すること、さらにDLC皮膜が中間層の割れを抑制するためであることを指摘している。一方、DLC皮膜に対して中間層の厚さが相対的に厚くなると、複合皮膜化による強度向上の効果が減少することを示し、複合皮膜によって有効に疲労強度を向上させるための最適な中間層厚さが存在することを示している。

第3章では、Al合金よりも軽量で、構造用材料として期待の高いMg合金AZ80Aに対してDLC/WC-12Co溶射複合皮膜を製膜し、疲労挙動と破壊機構について検討している。Mg合金を基材とした場合でも複合皮膜に基材まで到達する割れが確認され、有効な複合皮膜の作製にはDLC製膜温度の低下が必須であることを明らかにしている。一方、Mg合金はステンレス鋼やAl合金と比較して弾性係数が低いため、皮膜と基材の弾性係数の相違が大きく、皮膜の応力状態は最も厳しくなる。しかしAl合金の場合と同様に、複合皮膜によって疲労強度の向上が達成できること、高強度化に適した最適な中間層厚さが存在することを明らかにしている。

最終試験結果の要旨

審査委員会は、上記のように本論文が学位論文として十分な内容と価値ある知見を含むこと、申請者が専門の分野で学位授与にふさわしい専門知識と語学力を有することを確認し、最終試験に合格と判定した。