

論文審査報告書

氏名	かしたかはる 葉子貴晴
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博機第42号
学位授与日	平成30年9月25日
論文題目	表面被覆処理による冷間プレス金型の 疲労強度向上に関する研究
論文審査委員	(主査) 富山県立大学 教授 堀川 教世 教授 川上 崇 教授 森 孝男 准教授 宮島 敏郎 立命館大学 教授 上野 明

内容の要旨

自動車や鉄道車両の構造部材、家電等の工業製品の部品は主に金属材料を塑性加工することで作られており、プレス、鍛造、ダイキャスト、押出成形、射出成形と多岐に渡る加工手法が用いられている。いずれの手法も部品を安く大量に生産する製造手法であり、今日の製造業を支える根幹技術である。これら金属材料の塑性加工法では主として金型が用いられるため、金型の強度向上や長寿命化は製品の生産性の安定と保全費用の低減につながるため従来から数多くの研究が行われている。

近年、自動車産業において、環境問題への対策（排出ガス削減）が求められ、内燃機関のEV化やハイブリッド化といった多くの対策が取られている。それらの中でも費用対効果の面から現時点で最も大きな効果を生んでいるのが車体の軽量化である。そのため、材料開発が急速に進み、引張強度が440MPa以上の高張力鋼板（High Tensile Strength Steel; HTSS ハイテン鋼板）や引張強度が590MPa級から超ハイテン鋼板（Ultra-High Strength Steel; UHSS）と呼ばれる引張強度980MPaが既に実用化されており、最近では特殊鋼に迫るところまで高強度化が進んでいる。今後、ハイテン鋼板の使用率は増加していくことが予想されている。

このハイテンを成形する主たる手法が冷間プレスである。冷間プレス加工はハイテンの機械的特性の向上や製品の生産性の安定が望めるため優れた加工方法であるが、ハイテン鋼板の高強度化に伴い、金型への負荷が高くなり、金型寿命の低下が大きな問題となっている。対応策として、金型表層に窒化等の硬化処理やショットピーニングにより圧縮残留応力を付与することでプレス時に発生する微細クラック発生の抑制が行われているが金型への高負荷に対して十分対応しきれていないのが現状である。また、最近では金型への高負荷に対応するため、金型表面に硬質膜を被覆することも行われているが、その多くは被覆鋼

材の基材が炭素鋼やステンレス鋼等であり、冷間プレス金型に使われる炭素含有量が0.6%以上かつ破壊起点となる一次晶出炭化物を含む鋼材における研究事例は非常に少ない。さらに、疲労強度特性に関しては、研究対象の表面処理被覆はTiNやCrNといった単元系単層膜が多く、耐摩耗性や耐焼付き性のようなトライボロジー特性を重視したTiCrAlSiNやTiCrAlNのような多元系被膜の研究は少ないのが現状である。また、硬質膜中のドロップレット（内部欠陥）が疲労強度特性に与える影響を研究した事例は少ない。硬質膜は多種多様であるため硬質膜被覆による金型の設計指針の確立は極めて難しいが、現時点で有望とされる硬質膜に関連した研究は将来、上述の設計指針の確立につながるため重要であると言える。

以上より、本研究では高強度化するハイテン鋼板に用いられる冷間プレス成型金型の長寿命化に大きな影響を及ぼす疲労強度特性の向上を目的として、硬質膜の金型への被覆に着目し、硬質膜被覆金型の静的および疲労強度特性を明らかにすることで金型の寿命向上のための設計指針を検討している。本論文は全5章から構成されている。

第1章では金型の用途と破壊事例、過去から現在に至るまでの硬質膜被覆による金型の強化について概説し、従来研究を挙げながら金型の強化について問題点を指摘している。そして本研究の目的、意義、概要について述べている。

第2章では金型材を炭素含有量0.6%以上かつ一次晶出炭化物を含む鋼材とした場合について、硬質膜の表面処理被覆による金型材の疲労強度特性を明らかにしている。基材はSKH51とし、硬質膜は硬さや圧縮残留応力導入の観点からTiAlNとし、成膜方法は硬質膜と基材との密着性を考慮してAIPとUBMSとしている。膜厚と膜の残留応力の異なった数種類の硬質膜被覆SKH51の静的および疲労曲げ試験を行い、以下の結果を得ている。被覆鋼材の静的曲げ強度は基材単体に比べ10~15%低下し、この原因が膜と基材の密着性が高い場合には膜で発生したき裂がそのまま基材に続いて伝播するためとしている。密着性が低い場合は、膜に発生したき裂が膜と基材のはく離によりき裂が基材に伝播しないため基材と同等の強度になることを示している。一方、疲労強度に関しては、膜と基材の密着性が高い場合には疲労強度特性は基材単体に比べ向上し、向上度合いは被膜内部の圧縮残留応力値と相関があり、圧縮残留応力が大きいほど、疲労強度は向上する。膜と基材の密着性が低い場合には、はく離により圧縮残留応力が開放され、疲労強度の向上度合いは小さくなる。被覆鋼材の疲労強度は破壊起点の一次晶出炭化物の大きさから得られる破壊力学パラメータの最大応力拡大係数 $K_{I\max}$ で整理可能である。

第3章では前章で得られた結果をもとに、疲労強度特性と同様に金型に要求されるトライボロジー特性を膜に付与するためにCrとSiを添加し、さらに基材と膜との密着性の向上のためにCrNを中間層にしたTiCrAlSiN/CrNを基材であるSKH51に被覆し、TiCrAlSiNとCrNの膜厚比の異なる数種類の硬質膜被覆鋼の静的および疲労曲げ試験を行った。その結果、静的曲げ強度と疲労強度の向上には、硬質膜と基材とはく離を防ぐCrN中間層の導入が有効であることを示した。また、疲労強度比は低サイクル域では膜厚比の増加とともに高くなり、膜厚比が1において疲労強度比が1.2と、疲労強度が20%上昇することを示した。また、この膜厚比でトライボロジー特性向上を狙い厚膜化した被覆鋼材においても疲労強度比は1.15であり、工業的にも有用な結果が得られた。高サイクル域では、疲労強度比は膜厚比に依存せず一定値（疲労強度比1.1）を示し、疲労強度の上昇は10%となった。トライボロジー特性向上を狙い厚膜化した被覆鋼材においても疲労強度比はほぼ同じ値を示した。高サイクル域ではCrN中間層の膜厚を増やしても、低サイクル域のような大幅な疲労強度の上昇は望めないが、TiCrAlSiN/CrNを被覆した鋼材が冷間プレス金型のような高い応力が作用する金型で使用されることを考慮すると、低サイクル域での結果から最適な膜厚比は1である。

第4章では、第2章、第3章の結果から疲労試験片の破壊起点は全て基材内部の一次晶出炭化物であり、最大応力拡大係数にて整理ができることから、介在物支配の破壊であることが明らかとなった。このことより、破壊起点となる基材内部の一次晶出炭化物を無くせば更なる疲労強度の向上が見込まれることから、炭素含有量が0.6%以上でありながら、一次晶出炭化物を含まないマトリックス系SKD11改良鋼に前章で高い疲労強度特性向上効果が得られた表面処理被覆TiCrAlSiN/CrN（膜厚比率=1）を被覆し、疲労強度特性の向上効果を確認した。その結果、TiCrAlSiN/CrNを被覆した場合の静的曲げ強度は、基材内部一次晶出炭化物の有無に関わらず基材単体より低下する。これは、静的曲げは被膜表層から破壊が発生する為であり、基材内部の影響は受けない。しかしながら、被膜欠陥度数には影響を受け、小さいほうが静的曲げ強度は高くなる。疲労強度特性は、基材内部一次晶出炭化物の有無に関わらず基材単体より向上する。また、一次晶出炭化物が少ない方が向上度合いは大きい。疲労破壊は内部起点型であり、基材内部の起点が少ない場合は起点が被膜界面に移動するが、膜の圧縮残留応力により、疲労強度特性が大きく向上する。

第5章では総括として第2章から第4章までの結言をまとめ、硬質膜被覆による冷間プレス金型を設計する上で工業的に有益となる知見を述べている。本研究において、実際の冷間プレス金型に使用される炭素含有量0.6%以上の鋼について、表面処理被覆が疲労強度に与える影響を明らかにした点や表面処理被膜においても、最近のハイテン成形金型に用いられるTiCrAlSiN（多元系被膜）、それを元に多層化した被膜での疲労強度特性を明らかにしたことは、現在も各表面処理メーカーより多元系かつ多層構造被膜が上市されていることから金型の寿命向上のための設計指針の確立や今後の産業界の発展に寄与できることは明らかである。

審査の結果の要旨

本論文は高強度化するハイテン鋼板を冷間プレス加工する際に使用する金型を対象として、表面被覆処理による金型の疲労強度向上のための設計指針に必要な硬質膜被覆鋼の疲労強度特性について論じたものであり、全5章で構成されている。

第1章では高強度化するハイテン鋼板とそれに伴う金型の強化事例と問題点、本研究の目的について述べられている。ハイテン鋼板の成型に使用される金型は炭素含有量0.6%以上かつ一次晶出炭化物を含む鋼材が多いが、硬質膜被覆による金型の疲労強度に関する研究例は少ないこと。従来、金型に被覆される硬質膜はTiNのような単元系の膜が主流であったが現在ではトライボロジー特性向上のためにAl、Cr、Siを添加したTiCrAlSiNのような多元系が使われている。しかし、多元系の膜に多いドロップレット（内部欠陥）と疲労強度に関する研究例は少ないこと。高強度化するハイテン鋼板の成型では金型に硬質膜が被覆されるが、単層ではハイテン鋼板の高強度化に対応しきれず多層化が行われている。TiCrAlSiNではCrNとの多層化によってトライボロジー特性が向上することが報告されているが、疲労強度特性については報告例が非常に少ない。現状では多元系多層膜に関する設計指針が無いため、まず、静的強度や疲労強度といった強度に関する基本特性の把握が重要であることを述べている。そして、これらを明らかにすることで上述の設計指針の確立に貢献することができ、金型業界のみならず産業界全体の発展に寄与できることを述べている。

第2章では、金型材に炭素含有量0.6%以上かつ一次晶出炭化物を含む条件を満たすものとしてSKH51とし、被膜はTiNをベースとしたTiAlNとして、圧縮残留応力、硬さ、基材と膜の密着性の異なった被膜鋼材を作製し、これらの特性と疲労強度特性との関係を明らかにしている。その結果、圧縮残留応力は疲労強度の向上に有効であり、圧縮残留応力値が高いほど疲労強度も高くなることを明らかにしている。一方、膜と基材との密着性は、静的曲げ強度については密着性が高い場合は強度は低下し、密着性が低い場合は強度は基材と同等になることを明らかにしている。疲労強度においては、密着性が高い場合は疲労強度も高くなることを明らかにしており、これらの結果を総合して、硬質膜被覆による金型の強度向上には高い圧縮残留応力と高い密着性が重要であることを見出している。さらに、破面観察から破壊メカニズムを示すとともに、破壊力学的検討を行い、金型の疲労強度が基材で生じた破壊起点（介在物）の面積から計算した最大応力拡大係数で推定可能であることを明らかにしている。

第3章では前章で得られた密着性と圧縮残留応力の結果を踏まえて、TiCrAlSiNに基材と膜との密着性の向上のためにCrNを中間層にしたTiCrAlSiN/CrNを被膜として選定している。そして、基材であるSKH51に被覆し、TiCrAlSiNとCrNの膜厚比の異なる数種類の硬質膜被覆鋼の静的および疲労曲げ試験を行っている。その結果、静的曲げ強度の低下の抑制と疲労強度の向上には、硬質膜と基材との離れを防ぐCrN中間層の導入が有効であることを明らかにしている。また、TiCrAlSiNとCrNの最適な膜厚比が1であることを実験的に明らかにしており、冷間プレス金型の被膜設計の指針として工業的に有用な値を得ている。

第4章では、第2章、第3章の結果から硬質膜被覆鋼材の破壊起点は全て基材内部の一次晶出炭化物であり、最大応力拡大係数にて整理ができることから、金型の破壊は介在物支配であると推定し、破壊起点となる基材内部の一次晶出炭化物を無くすことにより更なる疲労強度の向上が期待できると述べている。そして、この考えを実証するために、炭素含有量が0.6%以上でありながら、一次晶出炭化物を含まないマトリックス系SKD11改良鋼を金型材とし、TiCrAlSiN/CrNを前章で得られた最適な膜厚比で被覆し、静

的および疲労試験を行っている。その結果、被覆鋼材の静的曲げ強度は、基材内部一次晶出炭化物の有無に関わらず基材単体より低下することを示している。これは、破壊が被膜表層から発生し、基材内部の影響は受けなためであるとしている。また、被膜の欠陥度数に影響を受け、欠陥度数の小さいほうが静的曲げ強度は高くなることを明らかにしている。疲労強度特性については、基材内部の一次晶出炭化物の有無に関わらず基材単体より向上することを示している。また、疲労破壊は内部起点型であり、基材内部の欠陥が少ない場合は破壊起点が被膜界面に移動するが、被膜の圧縮残留応力により、疲労強度特性が大きく向上することを明らかにしている。以上の結果は、第2章、第3章から導き出した本章冒頭の硬質膜被覆による金型の高強度化に関する考えが妥当であることを証明している。

第5章では総括として第2章から第4章までの結言をまとめ、硬質膜被覆による冷間プレス金型の設計指針を確立するために必要でかつ工業的に有益となる知見を述べている。

以上、本論文は、研究の方法論、研究手法、得られた結果とその解釈が適切であり、的確な文章表現が与えられている。その研究の手法、結果には独創性が認められ、その成果は硬質膜被覆による金型の設計指針の確立に繋がるものである。また、機械工学の設計分野における工学的な価値が認められ、工業の発展に貢献できると評価される。研究成果の一部は、既に申請者が筆頭者の2件の学術論文として学術論文誌に掲載されている。

審査委員会は、平成30年8月10日に富山県立大学学位規程第6条及び第7条に則り、博士論文の審査及び最終試験を行った。その結果、本論文は本学が学修の指針に定める評価項目を満たし、申請者は学術研究にふさわしい討論ができ、独立して研究を遂行する能力を有するものと判断された。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として合格であると認められた。