

補助事業番号 2024M-510

補助事業名 2024年度 空気中レーザー窒化処理による鉄鋼製品高寿命化技術の確立

補助事業者名 北見工業大学 大津直史

1 研究の概要

本事業の目的は、「空気中でのレーザー窒化プロセス」を活用して、鉄鋼製部品の表面に、膜厚5マイクロ以上の窒化皮膜を形成するノウハウを獲得することにある。空気中での窒化皮膜の施工は、応募者らが世界に先駆けて開発した、これまでの常識を打ち破る新技術であるが、形成皮膜の膜厚が不足しているため、現状では産業応用は難しい。本事業では、同プロセスで、鉄鋼製品に膜厚5マイクロ以上・硬さ400.HV以上の窒化皮膜を施工するノウハウを獲得し、当該プロセスを、耐久性を大きく改善できる表面加工技術として実用化する道筋を拓く。

2 研究の目的と背景

鉄鋼材料の表面に硬質窒化皮膜を形成すると、耐磨耗性や耐食性を向上し、鉄鋼製部品の寿命は飛躍的に伸びる。鉄鋼生産には多量の炭素放出を伴うので、長寿命化は炭素消費の削減に直結する。ところで、従来技術では、鉄鋼表面への窒化皮膜形成は、純窒素雰囲気の高気密性容器内で行う必要がある。故に、組み上げられた製品への後付け処理、あるいは経年劣化した製品への部分補修や補強への適用は困難である。加えて、製造ライン中で自動施工やそれを活用した遠隔操作も難しい

近年、上記課題の解決につながる革新的な窒化現象が発見されている。集光したパルスレーザー光を金属材料表面に照射すると、瞬間的にプラズマが発生する。このプラズマとチタン材料を反応させると、瞬間的に空気中の窒素を取り込み、空気中で窒化皮膜が形成される。この現象は、チタン材料のみで確認済みであり、鉄鋼材料に対する皮膜形成は不十分である。

そこで本事業の目的は、これを踏まえて、鉄鋼製品表面に、膜厚5マイクロ以上の皮膜を形成するノウハウの獲得することに挑んだ。鉄鋼製品に膜厚5マイクロ以上・硬さ400.HV以上の窒化皮膜を施工するノウハウを獲得し、当該プロセスの実用化への道筋を拓く事を目指した。

3 研究内容

「空気中レーザー窒化処理による鉄鋼製品高寿命化技術の確立」

<https://www.mtrl.kitami-it.ac.jp/~ohtsu/research.html>

① 超高速カメラによる瞬間的プラズマと金属表面の反応解析

瞬間的に発生するレーザー誘起プラズマを、超高速カメラを活用して、100ナノ秒ごとの変化を詳細に観察した。レーザービームを鉄鋼材料表面に照射すると、レーザー誘起プラズマが試料表面直上に発生するが、その空間分布はレーザービーム集光度により変化し、例えば、ビームを完全集光状態からデフォーカス状態に移行させると、プラズマは上方から材料表面に押し潰されたような形態になり、材料との接触面積が増大する。また、照射直後のプ

ラズマの試料表面近傍に集中して発生し、特定波長を含まない連続的なスペクトルを示すが、時間経過の伴い、プラズマは試料表面から沖合方向に膨張していき、さらに発光スペクトルにおける連続線は消滅し、鉄の発光線が支配的になっていき、およそ2マイクロ秒程度で消沈する。尚、このプラズマの寿命は、レーザービームの集光度に拠らずほぼ一定である。

② 鉄鋼とチタンの反応観察と比較

空气中レーザー窒化処理した鉄鋼材料およびチタン材料をX線回折により分析したところ、チタン材料では窒化皮膜が形成するが、フェライト系の炭素鋼にはほとんど形成していないことがわかった。一方で、同じ鉄鋼系材料であっても、オーステナイト系のステンレス鋼には窒化皮膜である拡張オーステナイト相皮膜が空气中で形成した。次にステンレス鋼に着目して実験してみたところ、拡張オーステナイト相皮膜に含まれる窒素濃度は、ベースとなるステンレス鋼のクロム濃度が多くなるに従い、増大することがわかった。

③ 皮膜膜厚増大のキーファクターの獲得

レーザービームの集光度は、発生するレーザー誘起プラズマの空間分布を支配する。この空間分布が「試料表面と接する面積が大きくなるように」調整すると、形成する窒化皮膜膜厚が増大する。さらに表面近傍に集中的に発生する初期時間のレーザー誘起プラズマが、窒化皮膜形成の支配的段階であることがわかった。一方、レーザーの走査速度を緩やかにすると、単位面積に対するレーザー照射時間が増大するため、形成する皮膜膜厚は増大するが、空気中に含まれる酸素の取り込みも増大してしまうため、形成皮膜は酸化物皮膜へと変わってしまう。すなわち、皮膜形成の促進はビームの集光度および走査速度の両方で達成できるが、酸化皮膜形成を避ける事を考慮すると、レーザービーム集光度がキーファクターであることが明らかとなった。

④ 窒化皮膜の硬さおよび耐摩耗性評価

空气中レーザー窒化処理で、ステンレス鋼(SUS316鋼)に形成した皮膜の硬さ試験および耐摩耗性試験を実施したところ、その表面に拡張オーステナイト相皮膜を主成分とする膜厚4ミクロン程度の窒化皮膜の形成を確認した。この皮膜の表面硬さは、未処理皮膜の約3倍程度であり、さらに、ジルコニアをカウンターとして耐摩耗性試験を実施したところ、表面に摩耗痕はほぼ形成されなかった。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究により、「空气中レーザー窒化処理プロセス」を活用して、鉄鋼材料のうち特にステンレス鋼に対して、空气中で窒化物被膜を形成出来る事を明らかにし、さらに耐摩耗性の向上が実現することを具体的に示している。当該プロセスはさらに研究を重ねることで、ものづくりの現場で用いるロボットアーム等に容易に組み込むことができるようになる。金属製品加工の現場で応用性が

高い新しい表面処理プロセスとして、機械部品の長寿命化や補修に資する産業技術として実社会に活かすことができる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

空気中でのレーザー窒化プロセスは、研究代表者が実用化を目指して約20年前から一貫して取り組んできた研究テーマである。当該プロセスに関する種々の実験データを取得してきているが、現象の根管に関わるメカニズムに関する知見が不十分であった。この要因は、瞬間的に発生するプラズマを観察する手段(装置)を保有していなかった事に起因する。当該事業を通じて、超高速カメラを入手でき、さらにそのカメラを活用して現象の本質となる「プラズマの時間変化」を、初めて明らかにすることが出来、現象の本質をとらえる事に成功した。

空気中でのレーザー窒化プロセスの研究の「飛躍的伸展につながる知見」を得ることができ、今後の研究歴における大きな成果となったと言える。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

N. Ohtsu, R. Endo, S. Takeda, Y. Sakuraba, M. Hirano, Open-atmosphere laser nitriding of austenitic steels to form wear-resistant surfaces, Surface and Coatings Technology 476 (2024) 130275

K. Yonemoto, A. Yoshino, Y. Kitadate, M/ Hirano, N. Ohtsu, Parametric investigation in an open atmosphere laser nitriding process of titanium aiming to minimize cracks, Surface and Coatings Technology 505 (2025) 132075

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

該当なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 国立大学法人北海道国立大学機構北見工業大学工学部

住 所: 〒090-8507

北海道北見市公園町165番地

担 当 者: 応用化学系 教授 大津 直史

E - m a i l: nohtsu@mail.kitami-it.ac.jp

U R L: <https://www.mtrl.kitami-it.ac.jp/~ohtsu/index.html>