

京都大学	博士（工学）	氏名	廣野 陽子
論文題目	Cladding of High Hardness Materials by Directed Energy Deposition 指向性エネルギー堆積法による高硬度材クラッディングに関する研究		
（論文内容の要旨） 本論文は、レーザを熱源として用いた Directed Energy Deposition（DED）による高硬度材のクラッディングを実用化することを目的とし、硬くかつクラックのない積層物を得るための積層物の温度履歴の設計・制御方法を実プロセスでの制約を考慮して検討し、得られた知見を実製品の生産へ適用できることを検証した結果をまとめたものであり、全 7 章から成っている。 第 1 章は緒論であり、機械部品に対して部分的に耐摩耗性を付与できる高硬度材クラッディングの必要性を述べている。高硬度材のクラッディングでは、硬さとクラックの発生頻度の低さにトレードオフの関係がある。硬くかつ視認できるクラックのない積層物を得るためには、積層物の温度履歴の制御が重要となるが、安定した積層が可能な実用的な積層条件における積層物の温度履歴の設計・制御方法はこれまでの知見が少なく、クラッディング実用化の課題となっていることを述べている。 第 2 章では、DED を用いた高硬度材クラッディングの特徴と従来の研究を整理し、ニーズの多いコバルト基合金と高速度鋼のクラッディングに関して、実用的な温度履歴の目標とその実現方法が明らかになっていないことが課題であることを述べている。コバルト基合金ステライトに関して、予熱によって熱応力を低減し、クラックを抑制する方法が提案されているが、同時に硬さが低下する課題がある。高速度鋼に関しては、相変態が硬さとクラックに大きな影響を与えるため、積層物の温度履歴の設計が重要であるが、積層条件の検討に用いる 3 次元での熱シミュレーションに大きな計算コストが必要であり、積層条件の事前検討が困難である。また、積層物の温度履歴の制御方法に関しても、安定した形状の積層物を得るためには積層条件の制約がある。このような問題において、高速度鋼とステライトの積層での、硬くかつ視認できるクラックのない積層物を得るための温度履歴を明らかにするとともに、実用的な積層条件下で実現可能な温度履歴の範囲を明らかにすることが重要であると述べている。 第 3 章では、ステンレス鋼の薄壁積層において、温度履歴の実用的な制御方法であるドウエル時間の変化が積層物の温度履歴に与える影響を調べた結果を述べている。ドウエル時間は積層の走査経路における待ち時間であり、ドウエル時間を変えることで、レーザ出力など、ドウエル時間以外の積層条件を変更することなく、積層物の温度履歴を制御することができる。赤外線を用いて、短時間でのメルトプール付近の冷却速度と、比較的長時間での積層物の温度履歴を非接触で測定できる実験系を構築し、ドウエル時間の変化による冷却速度と温度履歴の変化を評価している。さらに、積層物の硬さを評価し、冷却速度と硬さの範囲および両者の相関関係を明らかにしている。また、従来の文献で示されていた結果とは異なり、ドウエル時間によって積層物の温度履歴は変化させられるが、冷却速度を変化させることは難しい場合があることを示している。 第 4 章では、コバルト基合金ステライトのクラッディングにおいて、予熱温度と積層条件が硬さとクラックの発生頻度に与える影響をそれぞれ調査した結果を述べている。系統的な実験によって、クラックの発生を抑制しつつ、硬さの低下を防止できるレーザ出力と予熱温度の組み合わせを発見し、642 HV の硬さをもつ積層物が実現できるこ			

京都大学	博士（工学）	氏名	廣野 陽子
とを示している。また、積層物の材料分析によって、硬さとクラックの発生頻度の低さの間のトレードオフには脆化物である Cr 相の析出割合が関係しており、Cr 相の析出割合が 40%以下となることがクラックの発生を抑制できる条件の目安となると述べている。 第 5 章では、高速度鋼 M2 のクラッディングにおいて、積層物の温度履歴を実用的な時間でシミュレートするために、材料パラメータの相変態や温度への依存性などを無視した簡易伝熱モデルを構築し、積層物温度のシミュレーション結果にもとづいてドウェル時間を設定することの有効性を検証している。シミュレーション結果にもとづき、連続的に積層を行って積層物の温度をマルテンサイト変態温度以上に保つことで、積層中の焼き戻し軟化を防ぎ、硬くかつ視認できるクラックのない積層物が得られることを実験で示している。また、ドウェル時間を長く設けた場合に硬さの低下が生じた位置は、シミュレーションにおいて焼き戻し軟化が生じると予想された位置とおおよそ一致していることを示している。これらの結果から、構築した簡易シミュレーションは高速度鋼のクラッディングにおけるレーザ出力、走査速度、走査経路、ドウェル時間の検討に有用であると結論づけている。 第 6 章では、工作機械の主軸に使用されるドロワーを対象とし、第 5 章で構築した積層物の温度履歴の設計・制御方法を用いて、実用での要求仕様を満たす M2 のクラッディングが可能であることと、クラッディングによるリードタイムの短縮効果を検証している。積層物の温度をマルテンサイト変態温度以上に保つために、ドウェル時間を設けずに連続積層を行うことで、65 HRC の硬さをもち、視認できるクラックのない積層物が得られることを実験で示している。また、Cr めっきを用いて生産した従来のドロワーとの比較のために摩耗試験を行い、DED によるクラッディングを用いて生産したドロワーの摩耗量が従来品と同等であることを示している。本クラッディングの実現により、従来の Cr めっきによる生産プロセスと比較して、リードタイムを 14 日間から 2 時間へと大幅に短縮できることを示しており、DED によるクラッディングと除去加工を組み合わせた生産プロセスの有効性を主張している。 第 7 章は結論であり、実プロセスでの制約の中で、M2 とステライトのクラッディングを実現するための積層物の温度履歴の設計・制御方法を検討した結果をまとめている。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、レーザを熱源として用いた Directed Energy Deposition (DED) による高硬度材のクラディングを実用化することを目的とし、硬くかつクラックのない積層物を得るための積層物の温度履歴の設計・制御方法を実プロセスでの制約を考慮して検討し、得られた知見を実製品の生産へ適用できることを検証した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. ステンレス鋼の薄壁積層において、積層物の温度履歴の実用的な制御方法であるドウェル時間の変化による冷却速度と温度履歴の変化を評価した。さらに、積層物の硬さを評価し、冷却速度と積層物の硬さの範囲と両者の相関関係を明らかにした。また、ドウェル時間によって積層物の温度履歴は変化させられるが、冷却速度を変化させることは難しい場合があることを示した。
2. コバルト基合金ステライトのクラディングにおいて、レーザ出力と予熱温度の組み合わせにより、クラックの発生を抑制しつつ、642 HV の硬さをもつ積層物が実現できることを示した。硬さとクラックの発生頻度の低さの間のトレードオフには、脆化物である Cr 相が関連していることを材料分析の結果から明らかにした。Cr 相の析出割合が 40%以下となることがクラックの発生を抑制できる条件の目安となることを示した。
3. 高速度鋼 M2 のクラディングにおいて、積層物の温度履歴を実用的な時間でシミュレートするための簡易モデルを構築し、シミュレーションの結果にもとづいてドウェル時間を決めることの有効性を検証した。連続的に積層を行って積層物の温度をマルテンサイト変態温度以上に保つことで、積層中の焼き戻し軟化を防ぎ、硬くかつ視認できるクラックのない積層物が得られることを実験により示した。また、実験での積層物において硬さの低下が生じた位置は、シミュレーションにおいて焼き戻し軟化が生じると予想された位置とおおよそ一致していることを示し、構築した簡易モデルが高速度鋼のレーザ出力、走査速度、走査経路、ドウェル時間の検討に有用であると結論づけた。
4. 得られた知見を実製品の生産へ適用できることを検証するために、工作機械の主軸に使用されるドローバーを対象にケーススタディを行った。構築した簡易温度シミュレーションの結果にもとづいて求めた条件で積層した積層物は 65 HRC の硬さをもち、かつ視認できるクラックが生じていないことを実験により示した。本結果により、従来の Cr めっきに代わる、DED による高硬度材クラディングの実用例を示した。

以上、本論文は、DED を用いた高硬度材のクラディングにおける積層物の温度履歴の設計・制御方法を体系的に研究して、得られた知見を実用に適用できることを示しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 8 月 1 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。