

氏名	Kejun HU (中国)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博甲第433号
学位授与の日付	平成29年3月24日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	Study on Residual Stress for Hot Strip Rolling Bimetallic Rolls during the Heat Treatment Process (圧延用複合ロールの熱処理における残留応力に関する研究)
論文審査委員	主査 教授 野田 尚昭 " 秋山 哲也 " 赤星 保浩 " 松田 健次 技術顧問 佐野 義一 (丸栄化工株式会社) 教授 小田 和広 (大分大学)

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

圧延用複合ロールは高硬度で耐摩耗性に優れ、高温での使用に耐え得るため広く使用されている。熱間圧延では、熱延鋼板接触と水冷による加熱冷却サイクルを受けるため、その繰り返し応力によって微細なき裂がロール表面に生じる。そのき裂進展を防ぐため表面に圧縮残留応力が付与される。このときロール中心では、外層の圧縮残留応力に釣り合う引張残留応力が生じるため、圧延による引張の熱応力が負荷されると、ロール中心での破断が発生する可能性がある。この論文では、特殊なロール材料の膨大なデータを基に、熱処理による残留応力生成過程を数値的にシミュレーションしている。そして、表面での圧縮残留応力を最適にし、中心での引張残留応力を最小限に保つことにより、ロールの表面き裂や内部破壊のリスクを低減し、最終的には複合ロールの寿命を改善することを目的としている。この論文は計6章で構成されており、その各章の構成は以下のようになっている。

第1章では、熱間圧延で使用されるHSS製複合ロール(HSS: High-Speed Steel)を紹介している。このHSS製複合ロールは、日本で開発されて以降、まもなく世界中で使用されるようになった。この章では、従前の材料で製造される圧延ロールと比較してHSS製複合ロールの特徴について述べている。さらに、HSS製複合ロールの開発方法、応用例、製造方法について簡単に紹介している。また、これまでに行われた圧延ロールにおける残留応力の研究について論評している。そして、ロール内部までの残留応力分布を測定した報告が少ないことや、特に寸法の大きい圧延ロールの熱処理中の残留応力について解

析を行った論文はほとんど見当たらないことを指摘すると共に、この論文の研究動機と研究目的について説明している。

第2章では、均一加熱後の焼入れ熱処理過程において生じるHSS製複合ロールの残留応力を熱弾塑性有限要素法によって考察を行っている。まず焼き入れ後の残留応力分布に、試験温度に依存した内外層の材料特性が大きな影響を与えることを説明している。次に、均一加熱後の焼入れ過程における残留応力の発生メカニズムを数値シミュレーションによって説明している。そして、表面の圧縮応力を適切に保ち、中心の引張応力を最小限にするために、残留応力に影響を与える外層と内層の外内比（面積比）の影響、ロールの直径の影響、相変態の影響、熱処理過程の影響についてそれぞれ議論している。

第3章では、不均一加熱焼入れ過程によって生じる残留応力について、解析シミュレーションにより考察を行っている。新しく開発された不均一焼入れ法は、熱処理時間短縮や内層の残留応力低減や内層材の高温劣化防止など長所が多いために、注目され広く使用されるようになってきている。この章では、不均一加熱後の焼入れ過程によって生じる残留応力を、均一加熱後の焼入れ過程と比較して考察し、特に、ロール中心の引張応力を減少させることが可能であることを示している。また、そのメカニズムを考察した結果、焼き入れ過程途中のパーライト変態効果と内外温度差効果が焼入れ温度分布によって異なることによってロール中心の引張応力減少が実現できることを説明している。最後に、不均一加熱焼入れの有用性を、熱間圧延使用中に付加される引張熱応力によるロール中心の破損回避の観点から説明している。

第4章では、均一加熱焼入れ過程および不均加熱焼入れ過程中の一定温度保持過程のシミュレーションに用いたクリープ解析法の詳細を説明している。また、それを応用して、焼き入れ終了時の残留応力を低減させる焼戻し熱処理の影響について議論している。クリープ試験に基づき時間硬化則によりクリープ式を算出し、その精度を応力緩和試験で検証した上で、焼戻し過程が残留応力に与える影響について説明している。

第5章では、ロールの内部残留応力を測定する簡便な破壊法の一つである円板法の精度について検証している。円板法とは、ロールから切り出した円板側面の応力を測定することで、切り出し前のロール内部の残留応力を推定する方法であり、比較的よく使用されているが、その精度の正確な議論が見当たらない。はじめに、円板と円柱に軸対称温度場が与えられた時の弾性熱応力の理論式が成立する条件を検証している。次に、単一材質ロールの焼入れ速度を変えて生じる残留応力を数値シミュレーションにより求め、円板法の精度を、切り出す円板の厚さも変えて議論している。次に、複合ロールに関して、焼入れ速度を変え単一材質ロールとの比較に基づき、解析精度を明らかにしている。

第6章は、この論文の最終章であり、この研究で得られた主要な結論を要約している。

学位論文審査の結果の要旨

圧延用複合ロールは高硬度で耐摩耗性に優れ、高温での使用に耐え得るため広く使用されている。熱間圧延では、熱延鋼板接触と水冷による加熱冷却サイクルを受けるため、その繰り返し応力によって微細なき裂がロール表面に生じる。そのき裂進展を防ぐため表面に圧縮残留応力が付与される。このときロール中心では、外層の圧縮残留応力に釣り合う引張残留応力が生じるため、圧延による引張の熱応力が負荷されると、ロール中心での破断が発生する可能性がある。この論文では、特殊なロール材料の膨大なデータを基に、熱処理による残留応力生成過程を数値的にシミュレーションしている。そして、表面での圧縮残留応力を最適にし、中心での引張残留応力を最小限に保つことにより、ロールの表面き裂や内部破壊のリスクを低減し、最終的には複合ロールの寿命を改善することを目的としている。この論文は計 6 章で構成されており、その各章の構成は以下のようになっている。

第 1 章では、熱間圧延で使用される HSS 製複合ロール (HSS: High-Speed Steel) を紹介している。この HSS 製複合ロールは、日本で開発されて以降、まもなく世界中で使用されるようになった。この章では、従前の材料で製造される圧延ロールと比較して HSS 製複合ロールの特徴について述べている。さらに、HSS 製複合ロールの開発方法、応用例、製造方法について簡単に紹介している。また、これまでに行われた圧延ロールにおける残留応力の研究について論評している。そして、ロール内部までの残留応力分布を測定した報告が少ないことや、特に寸法の大きい圧延ロールの熱処理中の残留応力について解析を行った論文はほとんど見当たらないことを指摘すると共に、この論文の研究動機と研究目的について説明している。

第 2 章では、均一加熱後の焼入れ熱処理過程において生じる HSS 製複合ロールの残留応力を熱弾塑性有限要素法によって考察を行っている。まず、焼き入れ後の残留応力分布に、試験温度に依存した内外層の材料特性が大きな影響を与えることを説明している。次に、均一加熱後の焼入れ過程における残留応力の発生メカニズムを数値シミュレーションによって説明している。そして、表面の圧縮応力を適切に保ち、中心の引張応力を最小限にするために、残留応力に影響を与える外層と内層の外内比 (面積比) の影響、ロールの直径の影響、相変態の影響、熱処理過程の影響についてそれぞれ議論している。

第 3 章では、不均一加熱焼入れ過程によって生じる残留応力について、解析シミュレーションにより考察を行っている。新しく開発された不均一焼入れ法は、熱処理時間短縮や内層の残留応力低減や内層材の高温劣化防止など長所が多いために、注目され広く使用されるようになってきている。この章では、不均一加熱後の焼入れ過程によって生じる残留応力を、均一加熱後の焼入れ過程と比較して考察し、特に、ロール中心の引張応力を減少させることが可能であることを示している。また、そのメカニズムを考察した結果、

焼き入れ過程途中のパーライト変態効果と内外温度差効果が焼き入れ温度分布によって異なることによってロール中心の引張応力減少が実現できることを説明している。最後に、不均一加熱焼き入れの有用性を、熱間圧延使用中に付加される引張熱応力によるロール中心の破損回避の観点から説明している。

第4章では、不均一加熱焼き入れ過程および不均加熱一焼き入れ過程中の一定温度保持過程のシミュレーションに用いたクリープ解析法の詳細を説明している。また、それを応用して、焼き入れ終了時の残留応力を低減させる焼戻し熱処理の影響について議論している。クリープ試験に基づき時間硬化則によりクリープ式を算出し、その精度を応力緩和試験で検証した上で、焼戻し過程が残留応力に与える影響について説明している。

第5章では、ロールの内部残留応力を測定する簡便な破壊法の一つである円板法の精度について検証している。円板法とは、ロールから切り出した円板側面の応力を測定することで、切り出し前のロール内部の残留応力を推定する方法であり、比較的よく使用されているが、その精度の正確な議論が見当たらない。はじめに、円板と円柱に軸対称温度場が与えられた時の弾性熱応力の理論式が成立する条件を検証している。次に、単一材質ロールの焼き入れ速度を変えて生じる残留応力を数値シミュレーションにより求め、円板法の精度を、切り出す円板の厚さも変えて議論している。次に、複合ロールに関して、焼き入れ速度を変え単一材ロールとの比較に基づき、解析精度を明らかにしている。

第6章は、この論文の最終章であり、この研究で得られた主要な結論を要約している。以上本論文ではHSS製複合ロールの熱処理における残留応力のシミュレーション方法をクリープ解析まで含めて提案し、残留応力分布に及ぼすロール直径など諸因子の影響を明らかにするとともに、不均一加熱焼き入れ法の長所も明らかにしている。また円板法の予測精度にも言及しており、機械工学上寄与するところ大である。

本論文に関し審査委員並びに公聴会出席者からは、ロール直径や外内比の影響、焼き入れ後の残留応力分布の形状、ロール材料特性の与え方、残留応力生成のメカニズム、クリープの解析法とその残留応力への影響、破壊の危険性の評価方法等について種々の質問がなされたが、いずれも適切な回答がなされた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士(工学)の学位に十分値するものであると判断した。