

氏名	Dedi SURYADI (インドネシア)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博甲第393号
学位授与の日付	平成27年 9月25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	Strength Analysis and Coming out of Steel Shaft for Ceramic Roller Used in the Furnace under Both Thermal and Distributed Loads (鋼製軸と焼嵌め接合された加熱炉用セラミックローラーにおける接合部の強度と軸の抜け外れに関する研究)
論文審査委員	主査 教授 野田 尚昭 " 幸左 賢二 " 松田 健次 " 平木 講儒 丸栄化工株式会社 技術顧問 佐野 義一 (外部委員)

学位論文内容の要旨

本研究は、1,000° C を越える高温加熱炉で使われるセラミックローラーにおける構造設計に関するものである。本解析対象の加熱炉用ローラーでは、セラミックスリーブの両端に鋼製シャフトが焼嵌め接合され組立てられている。本研究では、まず、高温加熱炉中のセラミックローラーの熱応力の解析・検討を行い、次に焼嵌め接合された鋼製シャフトの抜け現象への諸因子の影響について解析・検討を行っている。

本論文は全5章で構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的を説明している。高級鋼材を生産するための熱処理炉では、これまでステンレス耐熱鋼にセラミックス溶射でコーティングされた胴部と、ステンレス耐熱鋼の軸部を溶射、焼嵌め等で接合し、中空部を水冷する構造のローラーが、主として用いられている。しかし、使用中に、ローラー表面にき裂や剥離を招き、ローラーの寿命を短くしている。そこで、本研究は、胴部材料にセラミックスを用い、中空部を空冷する構造のローラーを提案している。セラミックスにすることで、コーティングに起因する欠陥を防止でき、ローラー寿命を飛躍的に延長することが可能となる。

第2章では、セラミックスリーブと鋼製シャフトとの最適な接合方法について詳細に解析・検討されている。そこで、代表的な接合方法を用いてそれぞれに適合する接合構造を検討し、接合強度を比較・考察している。具体的には、3種類の接合方法、①接着接合、②メタルボンディング、③焼嵌めの強度が検討されている。①のモデルではエポキシ樹脂、

②のモデルでは、中間層にステンレス合金、タングステン・カーバイト、BA03-WC 2層を用いている。③のモデルでは、セラミックスリーブに鋼製シャフトが、低い焼嵌め率で接合される条件で、研究対象ローラー直径 300mm、スリーブ長 2600mm でシャフトに 18kN の曲げ荷重、加熱温度 1000℃における比較がなされている。室温及び高温で接合部に生じる曲げ荷重による最大応力を有限要素法を用いて、それぞれのモデルで評価した結果、室温では全てのモデルが使用可能であるけれども、高温では、焼嵌めのみ使用可能であることを示している。

第3章では、セラミックローラーの接合部の強度設計を静的および疲労の両面から考察している。具体的には、加熱による張割れ等の静的強度（瞬時破壊）及び、曲げを伴う疲労強度について検討を行い、最適な接合構造を見出すことを目的としている。その結果、(1) 簡略化2重円筒モデルの解析から、軸スリーブの肉厚を薄くすることでセラミックスリーブの張割れ応力を防止できることや、(2) 接合部のシャフトスリーブ断面形状の先端部肉厚を小さくしたテーパ化によって高温部の剛性を低くすることで、張割れ低減効果が得られること、などを明らかにしている。

第4章では、低焼嵌率の条件で懸念されるシャフトの稼働中における抜け現象のシミュレーション解析を行っている。その結果、(1) 今まで実験中や稼働中に経験してきたシャフトの抜けを、シミュレーションにより評価する方法を初めて提案している。また、(2) 回転曲げ負荷、すなわち曲げ荷重を受けたローラーの回転を、固定した状態のローラーに準静的な荷重が周方向に移動しながら作用する問題に置換して有限要素法により解析している。(3) 接合部のせん断応力に注目して抜けが生じるメカニズムを明らかにしている。

(4) 焼嵌率、摩擦係数、曲げ荷重の大きさの影響は当然として、接合部の寸法（接合部の長さ、シャフトスリーブの肉厚・断面形状）が抜けに及ぼす影響を考察している。その結果、接合長さが最も影響が大きいことを明らかにし、設計上有用な結果が得られている。

第5章は、本研究で得られた主要な結論をまとめている。

学位論文審査の結果の要旨

本研究は、1,000° C を越える高温加熱炉で使われるセラミックローラーにおける構造設計に関するものである。本解析対象の加熱炉用ローラーでは、セラミックスリーブの両端に鋼製シャフトが焼嵌め接合され組立てられている。本研究では、まず、高温加熱炉中のセラミックローラーの熱応力の解析・検討を行い、次に焼嵌め接合された鋼製シャフトの抜け現象への諸因子の影響について解析・検討を行っている。

本論文は全5章で構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的を説明している。高級鋼材を生産するための熱処理炉では、これまでステンレス耐熱鋼にセラミック溶射でコーティングされた胴部と、ステンレス耐熱鋼の軸部を溶射、焼嵌め等で接合し、中空部を水冷する構造のローラーが、主

として用いられている。しかし、使用中に、ローラー表面にき裂や剥離を招き、ローラーの寿命を短くしている。そこで、本研究は、胴部材料にセラミックスを用い、中空部を空冷する構造のローラーを提案している。セラミックスにすることで、コーティングに起因する欠陥を防止でき、ローラー寿命を飛躍的に延長することが可能となる。

第2章では、セラミックスリーブと鋼製シャフトとの最適な接合方法について詳細に解析・検討されている。そこで、代表的な接合方法を用いてそれぞれに適合する接合構造を検討し、接合強度を比較・考察している。具体的には、3種類の接合方法、①接着接合、②メタルボンディング、③焼嵌めの強度が検討されている。①のモデルではエポキシ樹脂、②のモデルでは、中間層にステンレス合金、タングステン・カーバイト、BA03-WC 2層を用いている。③のモデルでは、セラミックスリーブに鋼製シャフトが、低い焼嵌め率で接合される条件で、研究対象ローラー直径 300mm、スリーブ長 2600mm でシャフトに 18kN の曲げ荷重、加熱温度 1000°Cにおける比較がなされている。室温及び高温で接合部に生じる曲げ荷重による最大応力を有限要素法を用いて、それぞれのモデルで評価した結果、室温では全てのモデルが使用可能であるけれども、高温では、焼嵌めのみ使用可能であることを示している。

第3章では、セラミックローラーの接合部の強度設計を静的および疲労の両面から考察している。具体的には、加熱による張割れ等の静的強度（瞬時破壊）及び、曲げを伴う疲労強度について検討を行い、最適な接合構造を見出すことを目的としている。その結果、(1) 簡略化2重円筒モデルの解析から、軸スリーブの肉厚を薄くすることでセラミックスリーブの張割れ応力を防止できることや、(2) 接合部のシャフトスリーブ断面形状の先端部肉厚を小さくしたテーパ化によって高温部の剛性を低くすることで、張割れ低減効果が得られること、などを明らかにしている。

第4章では、低焼嵌率の条件で懸念されるシャフトの稼働中における抜け現象のシミュレーション解析を行っている。その結果、(1) 今まで実験中や稼働中に経験してきたシャフトの抜けを、シミュレーションにより評価する方法を初めて提案している。また、(2) 回転曲げ負荷、すなわち曲げ荷重を受けたローラーの回転を、固定した状態のローラーに準静的な荷重が周方向に移動しながら作用する問題に置換して有限要素法により解析している。(3) 接合部のせん断応力に注目して抜けが生じるメカニズムを明らかにしている。

(4) 焼嵌率、摩擦係数、曲げ荷重の大きさの影響は当然として、接合部の寸法（接合部の長さ、シャフトスリーブの肉厚・断面形状）が抜けに及ぼす影響を考察している。その結果、接合長さが最も影響が大きいことを明らかにし、設計上有益な結果が得られている。

第5章は、本研究で得られた主要な結論をまとめている。

以上のように、本論文は形状・材質等の諸条件を変化させた場合の鋼製軸と焼嵌め接合された加熱炉用セラミックローラーにおける接合部の強度と軸の抜け外れに関する特性を詳細に示した上でその最適条件を明らかにしている。なかでも、焼嵌率の下限界をシャフトの抜けの観点から評価し、そのメカニズムを明らかにして、設計にも広く応用できる道を

拓くことができた，といえる．その応用として，高温加熱炉用新型セラミックローラーの構造設計の提案は，長寿命化を目指す加熱炉用ローラーの評価と信頼性向上に貢献するものと期待される．よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認められる．

なお，本論文に関し，審査委員並びに公聴会出席者からは，セラミックスの許容応力の算出方法，張割れ応力，抜け過程での滑り現象，高温時のメタルボンディングの接合強度等について詳細な質問がなされたが，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。