

学位論文の要旨

「真空浸炭による鉄鋼材料の表面改質に関する研究」

氏名 井上 吉弘

本研究では真空浸炭を支配する諸要因を解明することにより、次世代型真空浸炭炉の操業条件を設定するための基礎データを整備し、真空浸炭の特徴を活かした部品の表面改質技術を確立することを目的とした。

第1章「序論」では、上記した研究の背景、目的および進め方を述べた。

第2章「真空浸炭炉の構造および操業上の諸要因」では、導入した次世代型真空浸炭炉が購入仕様を満足しているかを検証した。炉内温度分布は 750mmW×1200mmL×700mmH の有効加熱帯内で購入仕様である設定温度±10K以内を満足し、真空排気速度は 30min で 65Pa 以下の仕様に対して 26Pa であり、主な仕様は満足する設備であった。真空浸炭処理の対象部品のうち小型のφ15 半球シューと最も大型の直動案内部品を選定し、試験操業によって浸炭炉の性能を評価した。浸炭ガス噴射ノズルを 2 本から 16 本に増設し、ガス噴射方法の最適化および浸炭ガスの種類を、C₃H₆ を主成分とするスーパーガスから C₂H₂ への変更等の改善により、品質要求水準を満足する設備とした。

第3章「SCr420H 鋼の真空浸炭に関する研究」では、真空浸炭において次に示す浸炭メカニズムを明らかにした。

- 1) 鉄鋼表面に炭化水素ガスが吸着し黒鉛を析出する。
- 2) 黒鉛が鉄と反応してセメンタイトを生成し、浸炭時間 10min ではセメンタイトの膜を形成する。
- 3) 膜を介して γ 相中に炭素が侵入しセメンタイトに富んだ化合物層を形成する。

SCr420H 鋼では化合物中のセメンタイト量は面積比でおよそ 50%であった。

- 4) 化合物層が炭素の供給源となり γ 相中に炭素が拡散し浸炭が進行する。

真空浸炭挙動を反応速度論的に解析し、真空浸炭が高速浸炭といわれる根拠を定量値として求め、真空浸炭はガス浸炭の 3 倍の速さで浸炭されることを確かめた。真空浸炭における各温度での拡散係数を実験的に求めることにより、炭素濃度分布を計算によって推定することを可能にした。炭素量と焼入れ硬さの関係も明らかとなっているため、硬さ分布曲線もおおよそ推測できることになる。

本研究の CD (Carbide Dispersion の略、炭化物分散) 浸炭技術に関する研究では、浸炭層に CD 浸炭組織ならびに γ R を含有した CD 浸炭組織 (本研究では複合 CD 浸炭組織と名付けた) を形成するための浸炭条件の探索を行い、CD 浸炭組織ならび複合 CD 浸炭組織を実現した。

真空浸炭に関する基礎研究で得られたデータを基に各種試験片を作成し、金属組織、硬さ、残留応力等の性状調査および疲労試験を実施した。ローラーピッチング疲労試験では10⁷回耐久限における面圧はガス浸炭の2353MPaに対して複合CD浸炭では3333MPaと約1000MPa向上した。複合CD浸炭の耐久限はガス浸炭の142%である。この耐久性の向上は球状セメンタイトによるマルテンサイトの微細化と γ_R に起因するもので、試験中に γ_R が加工誘起マルテンサイト変態を起こし、その結果強大な圧縮残留応力が発生する。この圧縮残留応力により耐久性が向上したことが γ_R 量の計測および残留応力の測定から明らかとなった。

第4章「ステンレス鋼の真空浸炭に関する研究」では、真空浸炭によりステンレス鋼への浸炭が可能になるという特徴を活かすべく、オーステナイト系、フェライト系および二相系ステンレス鋼の浸炭挙動について実験し、次の結果を得た。

- 1) 表面層の炭素濃度はCr量の高いSUS329J3L鋼（二相系）が最も高く、約9mass%まで浸炭する。
- 2) いずれの鋼種でも浸炭層にはCr₇C₃型炭化物が多量に析出する。
- 3) SUS304鋼（オーステナイト系）およびSUS329J3L鋼では炭化物量の増加と共に硬さが上昇する。SUS444鋼（フェライト系）ではCr炭化物の析出硬化に加えてマトリックスのマルテンサイト化による硬化が付加されるため、著しく硬さが上昇すると同時に硬化域も深くなる。
- 4) 浸炭処理により耐摩耗性は向上し、3鋼種の中ではSUS329J3L鋼が最も優れる。
- 5) 浸炭処理により形成された炭化物の硬さによる摩耗特性の向上、および炭化物間の油溜まり効果により潤滑摩擦摩耗特性は向上する。

第5章「真空浸炭処理の実用部品への適用」では、カーエアコン用半球シュー、直動案内用ベアリング、自動車用ネジ軸、粉末成形歯車およびマルテンサイト系ステンレス鋼の直動案内について真空浸炭を実施し、真空浸炭の特徴を実用部品で検証した。

第6章「真空浸炭の実用化について」では、実用部品への試作および量産過程で抽出された課題について検討し、次の結果を得た。

- 1) 浸炭層に粗大セメンタイトが存在した場合、ローラーピッチング疲労強度を著しく低下させる。
- 2) 真空浸炭用鋼のDEG鋼はSCr420H鋼に比べ初析セメンタイトの析出が抑制される。
- 3) ガス浸炭用として一般に用いられている浸炭防止剤は真空浸炭においても有効である。
- 4) ステンレス鋼製の熱処理治具は真空浸炭によって浸炭され劣化するが、カロライジング処理やアルマー加工することにより治具寿命は2倍以上となり、ランニングコストの低減に効果がある。

第7章「結論」では、本研究で得られた結果をまとめ結論とし、今後の課題と展望についても言及した。

Overview of Academic Dissertation

Improvement of surface characteristics of carbon and stainless steels by vacuum carburization

Yoshihiro Inoue

This thesis is a research paper regarding the improvement of surface characteristics of steel materials by vacuum carburization. The objective of this research is the effective utilization of advanced vacuum carburization furnace system.

Chapter 1: "Introduction": Research background, objectives, and methodology were discussed.

Chapter 2: "The structure of the vacuum carburization furnace and the operational factors": Performance of the advanced vacuum carburization furnace was examined. Heat distribution inside the furnace was maintained within the range of $\pm 10\text{K}$ of the set temperature in the area of 750 mmW x 1200mmL x 700mmH. Vacuum ventilation rate was kept under 65Pa during the duration of 30 minutes. Based on the test operation outcome, the following improvements were implemented.

- 1) Increased the number of vacuum carburizing nozzles from two to sixteen.
- 2) Vacuum carburizing gas was changed from Super Gas to C_2H_2 .

Chapter 3: "Research on the vacuum carburization of SCr420H Steel"

(1) Vacuum carburization occurs in the following processes.

- 1) Adsorption of the C_2H_2 gas onto the steel surface results in the precipitation of graphite.
- 2) Reaction between graphite and steel formulates cementite. The formation of the cementite layer takes 10 minutes of carburizing.
- 3) A compound layer rich of cementite is formed. The amount of cementite in the compound is approximately 50%.
- 4) The compound layer serves as a source of carbon supply during the carburization.

(2) The vacuum carburizing effect was analyzed using the Process Rate (Theory); the following outcomes were obtained.

- 1) The vacuum carburization rate was approximately three times faster than the conventional gas carburization rate.
 - 2) A diffusion coefficient in the vacuum carburizing process was figured out empirically.
 - 3) Realized the estimation of the carbon density distribution by a calculation using the diffusion coefficient.
- (3) CD (Carbide Dispersion) carburizing technology was researched. The cementite spheroidizing method was established. Created a CD carburized structure containing γ_R (it was named “the compound CD carburized structure”).
- (4) The test pieces were created based on the data set collected in the preliminary phase of the research. The test pieces were examined for its characteristics and mechanical property. In the endurance test for the compound CD carburized test strip, durability was measured as 3333MPa, which was 142 % of the gas carburized material. This improved durability of the CD compound carburized structure is due to the effect of γ_R .

Chapter 4: “Research on the vacuum carburization of stainless steels” : The vacuum carburization technology realizes the carburization of stainless steels. Austenitic, Ferritic, and Dual-phase stainless steels were vacuum carburized, and the following outcomes were obtained.

- 1) Dual-phase stainless steel (SUS329J3L steel) had the highest carbon density on the surface layer. The carbon composition was approximately 9mass%.
- 2) In all types of stainless steels examined, high precipitation of Cr_7C_3 carbide was observed in the carburized layer.
- 3) The hardness increased in accordance with the rise of carbide amount in SUS304 steel (Austenitic) and SUS329J3L steel. In SUS 444 steel (Ferritic), a marked improvement in the hardness and the depth of treatment area was identified; this was induced by a combined effect of a Cr carbide precipitation hardening and a hardening due to the martensitic reaction of the matrix.
- 4) Abrasion resistance improves in general secondary to the carburization treatment; SUS329J3L showed the highest abrasion resistance level of the three types of stainless steels examined.
- 5) Because of the hardness of the carbide formulated in the carburizing process, abrasion resistance improves. Basin effect among carbide products contributes to the enhancement in lubrication friction abrasion characteristics.

Chapter 5: “Application of the vacuum carburization treatment to the industrial mechanical parts” : applied the vacuum carburization to the following industrial mechanical parts; hemispherical shoe for auto air-conditioner, linear guide bearing

parts, automotive screw shaft, powder-sintered gear , and martensitic stainless steel linear guide part. Characteristics of the vacuum carburization were examined using industrial mechanical parts.

Chapter 6: “Practical utilization of the vacuum carburization”: the following problems were identified regarding the application of the technology in prototyping and mass production of industrial mechanical parts.

- 1) roller-pitching strength was significantly affected when there was a cementite mass in the carburized layer.
- 2) DEG steel specifically designed for the vacuum carburization has a limited cementite precipitation in comparison to SCr420H steel.
- 3) Effectiveness of the anti-carburizer was confirmed in the vacuum carburization as well.
- 4) Calorizing treatment or Almer processing can double the life of quenching tools.

Chapter 7: “Conclusion”: the research outcomes were summarized in this chapter as a conclusion. Further research questions / gaps and future implications were also discussed.