

氏 名	宮 本 吾 郎
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2605 号
学位授与の日付	平 成 18 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 材 料 工 学 専 攻
学位論文題目	鉄合金における炭窒化物析出の kinetics および結晶学に関する研究

論文調査委員	(主 査) 教 授 牧 正 志	教 授 長 村 光 造	教 授 落 合 庄 治 郎
--------	--------------------	-------------	---------------

論 文 内 容 の 要 旨

炭窒化物は、析出強化、クリープ強度向上、粒成長のピン止め、再結晶の抑制などに利用される鉄鋼材料の重要な構成要素である。本論文は、鉄鋼材料における炭窒化物の析出組織制御のための基礎的な知見を得るため、炭素鋼のマルテンサイトの焼もどしとフェライト系鉄合金のプラズマ窒化処理における炭窒化物析出を研究対象として、主として kinetics と結晶学の観点から検討を行った成果をまとめたものであり、6章より構成されている。

第1章は緒言であり、炭素鋼マルテンサイトの焼もどしおよびフェライト(α)系鉄合金の窒化における炭窒化物の析出挙動に関する従来の研究および未解決の問題点を総括している。また、炭窒化物の析出組織制御に関する研究の重要性と必要性を指摘し、本研究の意義、目的について述べている。

第2章では、鉄炭化物が多量に生成する高炭素鋼(Fe-0.6% C)マルテンサイトを対象に、1~2%のMn, Si, Al添加が鉄炭化物の析出に及ぼす影響を研究している。低温焼もどし(523K~723K)ではSi添加が、高温焼もどし(723K~923K)ではSiおよびMnの添加が軟化抑制に有効であることを見出している。SiおよびMn添加によって軟化が抑制される理由は、低温焼もどしにおいてはSi添加によって微細な ϵ 炭化物(Fe_{24}C)からセメンタイト(Fe_3C)(θ)への遷移が抑制され、高温焼もどしではSiおよびMn添加によって θ が微細になるためであることを明らかにしている。また、高温焼もどしではSiは焼もどし初期から θ から吐き出され母相 α 中に濃化するのに対して、Mnは焼もどしの進行に伴い徐々に θ へと濃化することを見出し、 α/θ 間でのSiおよびMnの分配が θ の微細化に及ぼす影響を明らかにしている。また、 α/θ 間での合金元素の分配を熱力学的に検討するため鉄炭化物の安定性を第一原理計算により求め、Siが固溶することで θ は顕著に不安定化すること、CrやMnの固溶は θ を安定化することを見出している。これを基に合金元素の分配を伴わない種々の擬平衡を考慮した状態図計算を行うことで、SiがMnよりも α/θ 間で分配しやすいことを熱力学的な観点から明らかにしている。また、従来はSiの分配に起因した θ の成長抑制よと考えられてきたSi添加による $\epsilon \rightarrow \theta$ 遷移抑制について、Siが分配しない低温焼もどしではSi添加量の増加に伴い θ の核生成の駆動力が減少することを定量的に示し、 θ の核生成抑制が $\epsilon \rightarrow \theta$ 遷移抑制の主要因となることを指摘している。

第3章ではTi, V, Al, Crを約1%含むFe-M 2元合金をフェライト温度域の843Kで種々の時間プラズマ窒化し、主に高分解能電顕観察により窒化物の微細な析出組織について研究している。Fe-Ti, Fe-V合金を窒化すると硬度が大きく上昇するが、Fe-Al, Fe-Cr合金での硬度上昇は小さいことを見出している。硬度上昇の大きなFe-Ti, Fe-Vの窒化では、微細なTi-NおよびV-Nクラスターが高密度に均一生成するが、硬度上昇の小さなFe-Al, Fe-Cr合金の窒化ではクラスターは生成せず、B1型構造のCrNやAlNおよびwurzite構造のAlNがより低密度で生成することを明らかにしている。また、熱力学的な検討により、Fe-(Ti, V)-N 3元系ではbcc中で α とMNへの相分離が熱力学的に可能であるのに対して、Fe-Al-N 3元系では熱力学的に相分離が起らず、Fe-Cr-Nでも相分離傾向が小さいことを明らかにしている。

第4章ではFe-(1~30)%Cr フェライト2元合金を743K~943Kで種々の時間プラズマ窒化し、窒化領域の成長 kinetics およびCr 窒化物の析出組織について研究している。窒化領域の成長は、高Cr 濃度および低窒化温度ほど遅くなるが、内部窒化理論を用いた成長 kinetics の解析により、従来の低合金鋼の窒化では考慮されていなかった試料表面における固溶N量のCr 濃度依存性が、高Cr 鋼での窒化領域の成長 kinetics に大きく影響することを明らかにしている。また、Fe-18%Cr 合金を943Kで窒化するとCrN およびCr₂Nが α 粒内に生成するが、843Kの窒化では(α +CrN)のラメラ組織を呈する窒化方向に伸びた柱状 α 粒が生成することを見出している。また、この柱状組織は、窒化温度が低くCr 濃度が高いほど生成しやすいことを明らかにしている。

第5章では前章で観察された低温窒化で形成する柱状 α 粒の生成機構を明らかにするため、プラズマ窒化した試料の母相 α の結晶方位について電子線後方散乱回折を用いて研究している。943K 窒化では初期 α 粒組織がそのまま維持されるが、843Kの窒化では、元の α 粒とは異なる方位を持つ α 粒が試料表面近傍の窒化領域で生成し、試料内部へ柱状に成長することを明らかにしている。また、柱状 α 粒は元の α 粒に対して $[001]_{\alpha}$ 周りの39°回転で表される $\Sigma 9$ の方位関係を有し、試料表面近傍に加えて、元の α 粒界および α 粒内でも核生成することを明らかにしている。以上の結果より、 α と体積が大きく異なるCrNが連続析出した際のひずみを駆動力とした α の再結晶が起こり、その後、再結晶 α 粒と元の α 粒の大角粒界でCrNが不連続析出しながら窒化領域が試料内部へ成長していくために、柱状 α 粒が生成すると結論している。

第6章は総括であり、本論文で得られた成果を要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、鉄鋼材料において重要な炭窒化物の析出制御のための基礎的知見を得るために、実用的に重要な炭素鋼マルテンサイトの焼もどしと代表的な表面処理であるフェライト(α)合金のプラズマ窒化を研究対象として取り上げ、鉄炭化物および合金窒化物の析出挙動に関して、主として kinetics および結晶学的観点から系統的に研究した結果を取りまとめたもので、その概要は以下の通りである。

1. 高炭素鋼マルテンサイトの ε 炭化物および θ 炭化物(セメントイト)の析出におよぼすSi, Mn, Al添加の影響について、特に炭化物/母相間での合金元素の分配挙動に注目して検討し、Si添加により $\varepsilon \rightarrow \theta$ への遷移が遅れること、Mn添加により θ の成長が大きく抑制されることを実験的に明確に示し、この現象を合金元素の θ への分配の観点から熱力学的考察によって説明した。

2. Ti, V, Al, Crを約1%含有する α 系Fe二元合金の窒化組織を観察し、TiおよびV添加材ではTi-NおよびV-Nクラスターが高密度に生成し大きな強化が生じること、Al, Cr添加材ではクラスターは生成せずAlNやCrNが析出することを明らかにした。さらに、熱力学的観点から相分離の可能性を検討し、合金元素によるクラスター形成の有無を説明することに成功した。

3. α 系Fe-(1~30%)Cr合金の窒化組織が窒化温度によって異なること、つまり、高温(943K)では通常の微細なCrNが α 中に均一に分散した組織であるが、低温(843K)で窒化すると窒化方向に大きく伸びた柱状 α 組織になることを見出し、その組織が α とCrNのラメラ組織から成ることを明らかにした。

4. いままでに詳細な報告のない低温窒化で生成する柱状 α 粒の成因を主として結晶学的観点から検討し、窒化初期にCrNが連続析出した際の歪みにより α の再結晶が起こり、その後CrNが不連続析出するという、新しい析出誘起再結晶モデルを提案した。

以上、要するに、本論文は炭素鋼マルテンサイトの焼もどしとフェライト系鉄合金のプラズマ窒化における炭窒化物の析出挙動を、結晶学および熱力学の両面から詳細に明らかにしたもので、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、平成18年1月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。