

高加工性冷延鋼板の再結晶挙動に関する研究

著者	奥田 金晴
号	50
学位授与番号	3586
URL	http://hdl.handle.net/10097/37254

氏名	おくだかね はる		
授与学位	奥田 金晴		
学位授与年月日	博士(工学)		
学位授与の根拠法規	平成18年3月24日		
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項		
	東北大学大学院工学研究科(博士課程)		
	金属フロンティア工学専攻		
学位論文題目	高加工性冷延鋼板の再結晶挙動に関する研究		
指導教員	東北大学教授 石田 清仁		
論文審査委員	主査 東北大学教授 石田 清仁	東北大学教授 大内 千秋	
	東北大学教授 粉川 博之	東北大学教授 小池 淳一	

論文内容要旨

高加工性冷延鋼板は、そのプロセスの変遷とともに進歩し、成分系やプロセス条件の最適化により、深絞り性の指標である r 値で 2.5 以上の深絞り用鋼板の製造が工業的可能となっている。しかしながら、冷延後の焼鈍段階における再結晶集合組織形成の機構については、未だ議論が分かれているのが現状である。また、今後の製品開発の迅速・効率化のためにも、シミュレーション手法の確立も求められている。本論文は、高加工性の冷延鋼板の製造工程でも組織形成に重要な役割を果たす焼鈍工程に着目し、そこで生じる再結晶や、変態現象にともなう組織変化についてシミュレーションと実験の両面から研究しているもので全編 5 章からなる。

第 1 章は緒言であり、本研究の背景と目的について述べている。

第 2 章は、粒成長のシミュレーションで用いられるモンテカルロ法を再結晶挙動（焼鈍過程）へ適用している。まず MC シミュレーションコードが正しく再結晶動力学をモデル化するか検証しており、蓄積エネルギーを有する周囲の加工結晶粒の影響を受けた孤立結晶粒の組織変化は再結晶モデルの有益なテストとなり、蓄積エネルギー（バルクエネルギー）範囲を限定すれば、Gibbs - Thomson 効果をモデル化できることを示している。

次に、再結晶における各素過程について検討している。核形成については「高エネルギーを有する亜粒界（サブグレイン）マトリックスからの異常粒の成長現象」と捉え、その再結晶核に成長について議論している。初期半径が臨界半径より小さいとマトリックスへと成長できないが、臨界サイズより大きい場合、成長が可能となり、初期サイズが成長率

長を促すので、周囲のサブグレイン組織は、臨界のサイズまで成長するためには核と小さな方位差を持っていなければならない。逆に、大きな方位差は、核形成の後での異常粒成長するために必要である。実際の再結晶では、臨界のサイズを核（エンブリオ）が勝ち得た時に、せん断帯の外側に出るなどの条件が重なり、核と周囲の加工組織との方位差が大きく、しかも外側の加工領域の蓄積歪が高い状況を作り出せれば、マトリックスに異常粒成長し、再結晶粒として観察できる大きさに成長可能と考えられる。

核発生後の成長については、粒界上での再結晶核の成長が重要になると考えられる。そこで粒界上での核成長におよぼす粒界性格の影響を調べている。せん断帯内とその周囲では、蓄積エネルギーや核との結晶方位関係が変化するためである。このシミュレーションは同時に、低炭素 Al キルド鋼をバッチ焼鈍した場合のパンケーキ状の粗大な再結晶粒が得られるのかについての検証にもなる。成長に関しては、全体が高傾角粒界に囲まれているよりも、一部が小傾角を有する方が、再結晶粒の成長には有利であり、析出物などがなくても、粒界の性格により、伸展した再結晶粒は形成される。析出物は、再結晶核生成サイトが限定する役割を果たしていると考えられる。

そこで、再結晶挙動におよぼす析出物の影響について次に議論している。蓄積エネルギーは、析出物よりも再結晶率に対して強い影響を与え、析出物は蓄積エネルギーが低い条件でのみ、再結晶を遅延する効果が現れる。粗大再結晶粒（再結晶粒となりうる核）が異常粒成長できる条件は、再結晶できるかどうかの臨界条件で得られ、その臨界条件は低蓄積エネルギーで、析出物もある程度存在する条件に対応する。一方、蓄積エネルギーが十分大きいならば、再結晶完了組織は、析出物分率に無関係に微細となることを明らかにしている。

次節ではモンテカルロ法の実用性について検討しており、まず、いくつかの再結晶モデルを、モンテカルロモデルに適用し、加工状態から再結晶完了後の集合組織を予測することを試みている。特に、選択的成長モデルと優先核生成モデルによって形成された再結晶集合組織について比較検討を行い、 $\{111\}$ 再結晶集合組織は、すべり系に基づくモデル、粒界を挟む 2 つの加工粒方位を二分する方位が粒界で発生する「粒界モデル」で説明できることを示している。主方位は、局所的に転位が蓄積するタイミング、活動滑り系、核発生できる加工粒の蓄積エネルギーによって変化し、すべり系モデルと粒界モデルの併用が現実に近い集合組織が得られると考えられる。選択的成長モデルは、 $\langle 110 \rangle$ 軸周りの 26° 回

本シミュレーションでは他の再結晶モデルへも容易に拡張可能であり、モンテカルロ法は集合組織を取り扱うのに有利なことから、再結晶機構を解明するのに有用な武器となると考えられる。

続いて、OIM データをMCシミュレーションの初期マイクロ組織として適用することを試みている。この手法は、冷間圧延組織や、再結晶途中の組織から、さらに焼鈍した場合のマイクロ組織を予測するために非常に有益なシミュレーションとなる。但し、蓄積エネルギーとして Image Quality (IQ)、Taylor 因子、方位分散があり、どのように評価するべきか、回復粒と再結晶粒との蓄積エネルギーの評価などいくつかの課題があるものの、冷間圧延からの再結晶では、Taylor 因子が、温間圧延などでは IQ 値や平均粒界方位差が蓄積エネルギーの評価方法として有力であると思われる。

以上のように2章では、モンテカルロ法を焼鈍工程のシミュレーションへの適用性を検討し、モンテカルロ法の次元、格子タイプなどの条件にあった蓄積エネルギー、格子温度を選択すれば、再結晶におけるマイクロ組織変化、集合組織の変化を、他のシミュレーションに比較して簡便にシミュレーションできることを明らかとしている。また、再結晶だけでなく、高温側での変態挙動との競合現象についてもMC法の枠組みのなかで計算可能とし、実際にシミュレーションにより再結晶という現象を再現できることは意義があると考えられる。

第3章では、再結晶機構に関する情報を得るために再結晶に関する基礎的な実験を行っている。再結晶機構については、単結晶や双結晶を用いた実験が多くなされているが、今回は歪取り焼鈍によって作られた双結晶粒界と島状粒が混在した組織を有する鋼を出発材として、冷間圧延、焼鈍を行っている。島状粒は一種の第2相と捉えることができ、冷延時の変形状態や、再結晶優先サイトなどにおよぼす第2相と、その粒界の影響について議論している、加工粒と再結晶粒との方位関係を調べることにより、シミュレーションで議論した再結晶機構についての検証を行っている。粒界における方位差は、粒界面の傾きによって変化し、結晶の粒界面方位によっては、変形後に高角度粒界から小傾角粒界に変化する粒界が存在する。粒界面に応じて結晶回転様式は変化し、例えば、粒界を挟む粒の片側がもう一方の方位に向かって大きく変形しても、他の粒は変形に対して安定である。優先的に再結晶核の発生が生じた加工島状粒の周囲に着目すると、結晶方位が変化したある変形帯が形成され、その変形帯の結晶方位は、加工島状粒から加工マトリックス粒方位を

加工マトリックス粒方位の外側に位置し、しかも方位分散を有しており、2章で議論した再結晶の優先核生成モデルである「粒界モデル」が適用できないことを意味する。再結晶核とマトリックスとの方位関係について解析し、もう一つの優先核生成モデルである「すべり系モデル」により、実際の核方位を予測し、しかも、核形成サイトの応力状態は外部の応力状態とは異なり、局所的な応力状態にあることを推察している。すべり系モデルの有効性についてさらに検証するためには、局所的な応力状態の物理的意味を再検討する必要がある。

第4章は、高加工性冷延鋼板の工業化について研究している。特に4.2節では、温間潤滑圧延を活用した超高 r 値鋼板の再結晶挙動を調査している。高 r 値を得るための重要な工程である再結晶過程の機構に関しては、未だ不明な点が多く、特に、 $\{111\}$ 方位粒の起源に関してはなお議論の余地が残されていた。そこで、フェライト域で潤滑圧延した $\{111\}$ 集合組織を持つ熱延板を冷間圧延した材料を用いて、その再結晶集合組織形成機構の解明を試みている。フェライト域圧延後、焼鈍処理されたTi+Nb IF鋼の熱延板が冷間圧延されると、主方位が ϵ -fiberに沿って $\{554\}\langle 225 \rangle$ から $\{111\}\langle 112 \rangle$ に変化するとともに、副方位として、 α -fiberに沿って、 $\{111\}\langle 110 \rangle$ から $\{223\}\langle 110 \rangle$ へと変化する。再結晶では、強い γ -と弱い α -fiber集合組織が、非常に強い γ -fiber集合組織へと変化する。これによって、最大強度は、 $\{111\}\langle 112 \rangle$ から $\{111\}\langle 110 \rangle$ に変化し、副方位 $\{554\}\langle 225 \rangle$ の発達も観察されることを示している。OIM測定より、 $\{111\}\langle 110 \rangle$ と、それよりも強度が低い $\{554\}\langle 225 \rangle$ は、再結晶初期に既に発生しており、23%再結晶後の再結晶された集合組織は、十分な再結晶後に得られた再結晶集合組織と非常に類似していることを示している。冷間圧延時の $\{111\}\langle 112 \rangle$ 成分が $\{111\}\langle 110 \rangle$ 再結晶粒によって優先的に消費されるので、 $\{111\}\langle 110 \rangle$ は、 $\{554\}\langle 225 \rangle$ 粒よりも、より大きく、より多数になると推察する。また、微細粒ほど、完全な γ -fiberから外れた方位を有しているので、 $\{111\}\langle 110 \rangle$ は、再結晶後期とその後の粒成長段階において部分 α -fiberを消費することに関して、 $\{554\}\langle 225 \rangle$ 方位よりも優位であると明らかとしている。冷間圧延のND// $\langle 111 \rangle$ マトリックスからの $\{111\}\langle uvw \rangle$ 再結晶は、すべり系モデルを仮定し、3つの個々の $\{110\}\langle 111 \rangle$ すべりの活動によって合理的に説明され得る。この場合、再結晶集合組織は、3つの $\langle 112 \rangle$ 回転によって説明されることを示している。

以上のように本論文では、高加工性の冷延鋼板の製造工程でも組織形成に重要な役割を果たす焼鈍工程に着目し、そこで生じる再結晶や、変態現象にともなう組織変化について

基礎的な実験により、シミュレーションとの検証を行っている。高加工性冷延鋼板の工業化についても、そのベースとなる技術は、上記の基礎検討、シミュレーション結果と密接に対応していることを示している。

論文審査結果の要旨

高加工性冷延鋼板は、そのプロセスの変遷とともに進歩し、成分系やプロセス条件の最適化により、深絞り性の指標である r 値（ランクフォード値）で2.5以上の深絞り用鋼板の製造が工業的可能となっている。しかしながら、冷延後の焼鈍段階における再結晶集合組織形成の機構については、未だ議論が分かれているのが現状である。また、今後の製品開発の迅速・効率化のためにも、シミュレーション手法の確立も求められている。本論文は、高加工性の冷延鋼板の製造工程でも組織形成に重要な役割を果たす焼鈍工程に着目し、そこで生じる再結晶や、変態現象にともなう組織変化についてシミュレーションと実験の両面から研究を行ったもので全編5章からなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章は、モンテカルロ法の焼鈍工程シミュレーションへの適用性を検討している。モンテカルロ法における格子タイプと次元について述べ、蓄積エネルギー、格子温度を与える事によって再結晶におけるミクロ組織変化、集合組織の変化を簡便にシミュレーションできることを明らかにしている。

第3章は、再結晶機構に関する情報を得るための基礎的な実験を行っている。再結晶の優先核発生サイトである島状加工粒の周囲に存在する変形帯に着目して、再結晶核とマトリクスとの方位関係について解析し、優先核生成モデル「すべり系モデル」により、実際の核方位を予測できることを明らかにしている。

第4章は、高加工性冷延鋼板の工業化について述べており、特に温間潤滑圧延を活用した超高 r 値鋼板の再結晶挙動を調査している。再結晶直後の再結晶粒からの集合組織は、再結晶完了後の集合組織と類似しており、優先核生成説を支持していることを明らかにしている。さらに、多結晶体についてもすべり系モデルの適用が可能であることを示している。

第5章は結言である。

以上要するに、本論文は、高加工性の冷延鋼板の製造工程でも組織形成に重要な役割を果たす焼鈍工程に着目し、そこで生じる組織変化をモンテカルロ法によりシミュレーションを行い、さらに実験により鋼の再結晶機構を明らかとしたもので、材料工学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。