

学 位 論 文 題 名

オーステナイト系ステンレス鋼板の加工特性と
最適製造条件に関する金属組織学的研究

学位論文内容の要旨

ステンレス鋼は強度・延性・耐食性・耐熱性等に優れ、耐久消費財、機械・化学プラント材、電気・電子機器部品材など極めて多岐・多様に使用され、かつ今後の需要も大いに期待されている鋼である。中でもオーステナイト（ γ ）系ステンレス鋼は、フェライト系鋼種に比べプレス加工性に富むため、各種の形状に加工して使用されることが多い。しかし、より大型化かつ複雑形状化する市場からは、更なる加工性の向上を期待する強い要望がある。

また、薄板製造技術面では、省エネルギー、省工程の観点から、各種のプロセス改善が試みられて来ているが、これらの製造条件変更に伴う材質への影響を正しく把握し、品質を高位安定化させておくことも重要な課題となってきた。

この様な背景のもと、本研究は γ 系ステンレス鋼に焦点を絞り、薄板製造条件と加工特性の金属組織学的関係を明らかにすると共に、特性改善のための基盤製造技術を確立するために行ったものである。

本論文は全7章で構成され、各章の内容は以下の通りである。

第1章は序論であり、本研究の目的と必要性について述べている。とくに、 γ 系ステンレス鋼板のプレス加工においては、深絞り加工後の時効割れ性および塑性異方性の改善が今後の大きな技術課題であることを指摘し、それら特性の支配因子の解明と改善技術の研究が極めて重要であることを述べた。

第2章では、商用 γ 系ステンレス鋼板の加工特性を総合的に評価するため、国内の各社鉄鋼メーカーのSUS304ステンレス鋼を入手し、化学成分、材質等について詳細な分析、試験を行い、品質特性の比較、解析と問題点の把握を行った。

第3章では、 γ 系ステンレス鋼板の引張特性、加工特性および塑性異方性に及ぼす化学成分と金属組織の影響について詳細な検討を試みている。

この結果、耐力には侵入型元素（C，N）の固溶量が大きく影響すること、また、引張強さには、置換型元素（Ni，Mn，Cu）の場合は、 γ 安定度が低い成分系ほど強度を高めることを確認した。これは加工硬化が加工誘起マルテンサイト（ α' ）量に依存した挙動であるためと推定された。一方、C，Nの侵入型元素の場合は、上記元素に比べ影響度は小さい。伸びも引張強さと同様、加工誘起 α' 量と硬さに強く影響されるが、最適な γ 安定度が存在する。本実験成分系では、Ni当量値（ ΔNi ）が $-3 \sim -2$ の範囲で最大の伸びが得られた。

時効割れに関しては、C，Nはとくに悪影響を及ぼすが、これらは母材強度と加工誘起 α' 相の強度を上昇させ、深絞り加工後の残留応力を高めて、割れ感受性を上げるためと推定された。逆に、Ni，Cuは α' 変態を抑制し、割れを防止するように作用する。これらの化学成分と時効割れの限界絞り比との間には、一定の関係式が成り立つことを明らかにした。

第4章では、薄板製造の最終工程である焼鈍条件に注目し、それらの焼鈍雰囲気と時効割れ性および曲げ加工性について検討を行い、いずれの特性も水素を含む雰囲気での焼鈍により著しく劣化することを明らかにした。水素雰囲気の焼鈍により、鋼中へは水素が $6 \sim 8$ ppm 拡散侵入する。鋼中に侵入した水素は γ 相を不安定化するように働き、深絞り加工に於いては加工誘起 α' 相を多く発生させて内部応力を高め、時効割れを生じ易くさせると考えられた。一方、曲げ加工性の劣化は、加工温度、歪速度に大きく依存することが判明した。加工性劣化領域での活性化エネルギー測定の結果より、この劣化挙動が水素の拡散に支配された現象であることの裏づけを得た。

時効割れ性および曲げ加工性とも、脱水素処理を行い鋼中水素量を 2 ppm 以下に低減すれば、このような脆化現象は実用上防止できることを明らかにした。

第5章では、塑性異方性に大きく影響する集合組織の形成過程を各種の製造条件のもとで追跡した。とくに、薄板製造工程で形成される圧延集合組織と、それを焼鈍した時に生じる再結晶集合組織の方位関係について詳細に観察した結果、冷間圧延で形成される γ 相の集合組織 $\{110\} \langle 112 \rangle \gamma$ ， $\{110\} \langle 001 \rangle \gamma$ と α' 相の集合組織 $\{111\} \langle 112 \rangle \alpha'$ ， $\{100\} \langle 011 \rangle \alpha'$ ， $\{112\} \langle 110 \rangle \alpha'$ の間には Kurdjumov-Sachs (K-S) の関係および西山の関係他の方位関係が認められ、かつ、これらの α' 相は 700°C 焼鈍で再び γ 相に逆変態し、可逆的挙動を示すことが確認された。更に、 800°C 以上の焼鈍に於いて、加工で生じていた $\{110\} \gamma$ 結晶粒は $\{112\} \gamma$ ， $\{113\} \gamma$ の再結晶核により侵食され、 1010°C 以上の焼鈍を行う通常の製品板での優先結晶方位は $\{112\} \langle 111 \rangle \gamma$ ， $\{113\} \langle 332 \rangle \gamma$ になることを明らかにした。

これらの結果より、製品板での塑性異方性を低減させるためには、優先成長する $\{112\} \gamma$ お

よび $\{113\}$ γ の再結晶核の発生頻度を低下させ、これによって集合組織形成を抑制すること、および、主方位集合組織とは塑性異方性が相反する副方位の集合組織を混在させること、の2つの方法が効果的であることを示した。

第6章では、第5章で得られた知見をもとに、塑性異方性を低減させるための製造条件について検討を行った。

まず、集合組織形成を抑制することによって塑性異方性を低減させる方法を検討した。集合組織発達の結晶粒径依存性に注目し、冷圧前の組織が粗大粒、つまり、粒界面積が少ないほど、製品板での $\{112\}$ $\langle 111 \rangle$ γ の発達が弱まり、 45° ears が低減して等方性材料の得られることを明らかにした。熱延板焼鈍温度を高くすることは、この点から極めて効果的な異方性低減の方法である。

次いで、副方位の集合組織を適量混在させることによる塑性異方性の低減について検討を行った。 γ 系ステンレス鋼の製品板で通常生じている優先結晶方位の $\{112\}$ $\langle 111 \rangle$ γ や $\{113\}$ $\langle 332 \rangle$ γ と塑性異方性が相反する挙動を示す主な結晶方位には $\{110\}$ $\langle 001 \rangle$ γ や $\{210\}$ $\langle 001 \rangle$ γ があるが、これらの方位を製品板に混在させるためには、冷間圧延の温度を低下させ、冷延組織中に α' 変態量を増大させれば良いことを見出した。但し、 α' 変態量が過剰すぎると、製品板では $\{110\}$ γ や $\{210\}$ γ 結晶粒により形成される 0° 、 90° ears のイヤリングが新たに発達し、再び塑性異方性を増大させる。これらの結果より、冷間圧延で形成される α' 変態量は50%が最適と考えられた。

第7章では、本研究を総括すると共に、これまでの研究結果の組み合わせにより、加工特性と塑性異方性を共に改善するための最適製造条件を提示している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 丸 川 健三郎

副 査 教 授 前 晋 爾

副 査 教 授 高 橋 平七郎

ステンレス鋼は強度・延性・耐食性・耐熱性に優れており、多方面の用途に使用されているが、中でもオーステナイト系ステンレス鋼はプレス加工が可能なため、一体成形製品用の素材として

有用なものである。しかし最近の、より大型化・複雑形状化する用途に対応するため一層の加工性向上が望まれている。

本論文は、オーステナイト系ステンレス鋼板の加工性を中心とした品質向上を目標としてなされた研究をまとめたものであって、製造条件と製品板の加工特性との関係を金属組織学的に究明し、これに基づいて最適製造条件を求めている。

第1章序論では、研究の目的について述べているが、特に重要な技術的課題として、加工性向上のほかに、強加工に伴う時効割れへの対策、塑性異方性の改善の二つを挙げている。引続き第2章では、市販されているステンレス鋼板について加工特性試験を行い、現時点での品質レベルの評価を行っている。

第3章では、各種の合金組成に調整した素材を作製し、これを用いて組成と加工特性との関係を調べている。オーステナイト系ステンレス鋼の加工性がオーステナイト相（ γ 相）からマルテンサイト相（ α 相）への変態誘起塑性効果に強く依存していることに注目し、各元素の加工性への寄与を変態の起こりやすさの指標であるNi当量値によって整理して、良好な相関関係を見出した。これより最適Ni当量値を求め、合金設計への指針とした。

第4章では、時効割れと最終焼鈍工程との関係を調べて、水素を含む雰囲気での焼鈍によって品質が著しく劣化することを見出した。ついで、曲げ加工性を目安として水素の影響をさらに詳しく追求し、水素の鋼中への拡散と時効割れとの関係を調べた。これによって、時効割れは適温で脱水素処理を行い、鋼内水素量を2 ppm以下に低減することによって防止できることを明らかにした。

第5章では、塑性異方性の原因が鋼板の結晶集合組織に起因していることを指摘したうえで、各種製造条件のもとでの集合組織形成過程をX線回析法を用いて系統的に調べている。まず、冷間圧延工程で形成されている γ 相組織として、 $\{110\} \langle 112 \rangle$ と $\{110\} \langle 001 \rangle$ とを見出している。またこれらとKurdjumov-Sachs (K-S) 関係にある α 相組織も確認した。つぎに、1010℃以上の高温焼鈍工程によってこれらが $\{112\} \langle 111 \rangle$ と $\{113\} \langle 332 \rangle$ に変化することを明らかにした。通常の製品板では、このようにして生じた $\{112\}$ と $\{113\}$ の組織が支配的に存在しており、これが塑性異方性をもたらすことを指摘している。

第6章では、第5章で得られた知見をもとに、塑性異方性を低減させるための製造条件について検討を行っている。まず、集合組織形成そのものを抑制することによって塑性異方性を低減させる方法を検討している。集合組織発達の結晶粒径依存性に注目し、冷圧前の組織の結晶粒が大きいほど製品板での $\{112\} \langle 111 \rangle$ の発達が弱まり、等方性材料が得られやすいことを明らかに

した。さらに、熱延板焼鈍温度を高くすることが結晶粒を粗大化し、異方性を低減するのに効果的であることを指摘した。ついで、副方位の集合組織を適量混在させることによる塑性異方性の低減について検討している。すなわち、集合組織 $\{110\} \langle 001 \rangle$ や $\{210\} \langle 001 \rangle$ が優先集合組織である $\{112\} \langle 111 \rangle$ や $\{111\} \langle 332 \rangle$ とは相反する塑性異方性を示すことに注目し、これらの組織を混在させる条件を検討した。その結果、これらを混在させるためには、冷間圧延の温度を低下させ、冷延組織巾のマルテンサイト変態量を増大させればよいことを見出した。さらに冷間圧延で形成されるマルテンサイト変態量の最適値として50%を定めた。

最後に第7章では、研究を総括すると共に、研究結果の組合せにより、加工特性と塑性異方性を共に改善するための最適製造条件を提示している。

これを要するに、本論文はステンレス鋼板の加工性に及ぼす金属組織学的諸因子を明らかにすると共に、製造条件の適正化による組織制御方法、加工性改善方法について多くの新知見を得たものであって、応用物理学、金属材料工学に寄与するところが大である。よって、著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。