

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	マルテンサイト逆変態を活用したスーパーインバー鋳鋼の力学特性向上
Title(English)	
著者(和文)	坂口直輝
Author(English)	Naoki Sakaguchi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11767号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:中田 伸生,木村 好里,尾中 晋,寺田 芳弘,田原 正樹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11767号, Conferred date:2022/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第		号	学位申請者氏名		坂口 直輝	
論文審査 審査員		氏 名	職 名		氏 名	職 名	
	主査	中田 伸生	准教授	審査員	田原 正樹	准教授	
	審査員	尾中 晋	教授				
		木村 好里	教授				
		寺田 芳弘	准教授				

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「マルテンサイト逆変態を活用したスーパーインバー鋳鋼の力学特性向上」と題し、全 6 章より構成されている。

第 1 章「序論」では、スーパーインバー合金 (Fe-32mass%Ni-5mass%Co) が極めて低い熱膨張特性を有することから様々な精密機器部材に使用されていること、とくに、近年では精密機器の更なる高精度化および生産性のスループット向上を目指した構造体自体の大型化が加速しており、鋳鋼の需要が高まっていることを述べている。そして、スーパーインバー鋳鋼は凝固過程で発達する粗大な<100>集合組織によって、低い強度ならびに低いヤング率を示し、構造体として大きな欠点を抱えていることを指摘している。さらに、Fe-Ni 合金の相変態に関する過去の研究を説明し、サブゼロ処理およびその後の焼鈍処理から成るクライオアニール処理がスーパーインバー鋳鋼に組織変化をもたらし、強度とヤング率が改善される可能性を述べている。

第 2 章「マルテンサイト逆変態に誘起されるオーステナイト再結晶を利用したスーパーインバー鋳鋼の剛性改善」では、サブゼロ処理による fcc-bcc マルテンサイト変態およびその後の焼鈍処理による bcc-fcc マルテンサイト逆変態を発現させ、この相変態によって生じる組織変化とそれに伴うヤング率の変化を調査した (fcc: face centered cubic, bcc: body centered cubic)。サブゼロ処理後、Ni 偏析に起因して、粗大なオーステナイト凝固組織中のデンドライトに沿ってレンズマルテンサイトが不均一に分布し、このマルテンサイトと未変態オーステナイトから成る 2 相組織を Af 点直上の 873 K で焼鈍した場合、逆変態前の粗大なオーステナイトが復元したが、2 度のマルテンサイト変態によって逆変態オーステナイト中には高密度の転位が含有することを明らかにした。一方で、焼鈍温度がより高温の 1103 K では、逆変態オーステナイトが再結晶し、微細なオーステナイト組織が形成することで凝固組織に起因した集合組織を解消し、結晶方位が複雑化することを示した。その結果、塑性加工を必要としない熱処理のみでスーパーインバー鋳鋼のヤング率を鍛鋼品と同等まで改善することに成功した。

第 3 章「スーパーインバー鋳鋼におけるマルテンサイト逆変態に誘起されたオーステナイト再結晶メカニズム」では、マルテンサイト逆変態に誘起したオーステナイト再結晶メカニズムの解明のため、電子線後方散乱回折法を用いた結晶学的調査を実施した。クライオアニール処理によって形成した高い転位密度を有する逆変態オーステナイトと低い転位密度の未変態オーステナイトの複合組織では、転位密度差を駆動力として、旧オーステナイト粒界のバルジ再結晶が発現することを観察した。その際、複合組織における転位密度の不均一な分布によって、大きな凹凸の成長界面が形成され、凸

部で優先的に焼鈍双晶が形成することを示した。以上の結果より、バルジング再結晶に伴う焼鈍双晶の形成によりオーステナイトの微細粒化と結晶方位の複雑化が導かれることを明らかにした。

第4章「マルテンサイト逆変態を活用したスーパーインバー鑄鋼の剛性と強度の同時最適化」では、1度のクライオアニール処理ではヤング率と強度の同時改善が達成できないため、2度のクライオアニール処理を組み合わせるダブルクライオアニール処理を提案した。その最適プロセスでは、最初のクライオアニール処理において焼鈍温度を意図的に高くすることで、マルテンサイト逆変態に誘起したオーステナイト再結晶を発現させヤング率を改善するとともに、再結晶オーステナイトの粒成長を促すことの重要性が述べられた。そして、2度目のクライオアニール処理では、焼鈍温度を A_f 点直上 (873 K) に設定することで、転位強化された高強度の逆変態オーステナイトが多量に生成することを明らかにした。以上のダブルクライオアニール処理により、スーパーインバー鑄鋼のヤング率と強度は、鑄造まま材と比較してそれぞれ 30%と 90%程度向上することを報告した。

第5章「金属間化合物の析出を利用したスーパーインバー鑄鋼の高強度化」では、スーパーインバー鑄鋼に 2mass%Ti および 3mass%Si をそれぞれ添加し、クライオアニール処理に時効処理を追加することで、粒子分散強化による更なる高強度化を検討した。サブゼロ処理後の 723 K 時効処理により、核生成サイト、大きな析出の駆動力と速い拡散速度を要因として、レンズマルテンサイトに $L1_2$ 構造の Ni_3Ti および Ni_3Si の金属間化合物が微細に優先析出することを示した。そして、焼鈍処理によってマルテンサイト逆変態が生じた後も、レンズマルテンサイトに分散した金属間化合物は逆変態オーステナイト中に残留し、逆変態オーステナイトの高強度化を導くことを述べた。Orowan および Ashby Orowan 機構から見積もられる逆変態オーステナイトの強化量は実験値より大きく、これにより、逆変態オーステナイト中の金属間化合物が転位に対して弱い障害物として作用することを示した。粒子分散強化により高強度化した逆変態オーステナイトは、複合組織を有するオーステナイト鋼の加工硬化率を大きく向上させ、800 MPa 以上の引張強度を示すことが明らかとなった。

第6章は「結論」では、本論文の各章の結果をについて総括した。

以上を要するに本論文は、クライオアニール処理によって生じるマルテンサイト変態とマルテンサイト逆変態、さらにこれに誘起されるオーステナイト再結晶がスーパーインバー鑄鋼の力学特性改善に非常に有効であることを学術的に示したものである。

得られた知見は鑄鋼品を中心とする大型構造部材に対する新たな組織制御指針を与えるものであり、工学上・工業上貢献するところが大きい。よって本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値があると認められる。