

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)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	材料 材料	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	坂口 直輝		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	中田 伸生
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	木村 好里

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

スーパーインバー合金 (Fe-32mass%-5mass%Co) は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。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。しかしながら、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。本論文では、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をスーパーインバー鋳鋼に適用させ、これによる組織と力学特性の変化を調査した。

第1章「序論」では、本論文の目的とその背景を示した。

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た。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 A_1 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された。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した。この再結晶オーステナイトは凝固組織に起因した集合組織を解消し、結晶方位の複雑化を導いた。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がバルジングすることで再結晶した。その際、複合組織における転位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せ、凸部での優先的に焼鈍双晶形成が確認された。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を導かれることが明らかとなった。

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鋳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した。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を多量に生成させた。以上のダブルクライオアニール処理により、スーパーインバー鋳鋼のヤング率と強度は、鋳造まま材と比較してそれぞれ30%と90%程度向上した。

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鋳鋼の高強度化」では、スーパーインバー鋳鋼に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いた。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が示唆された。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について総括した。

備考：論文要旨は、和文2000字と英文300語を1部ずつ提出するか、もしくは英文800語を1部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース：	材料	系
Department of, Graduate major in	材料	コース
学生氏名：	坂口 直輝	
Student's Name		

申請学位 (専攻分野)：	博士	(工学)
Academic Degree Requested	Doctor of	
指導教員 (主)：	中田 伸生	
Academic Supervisor(main)		
指導教員 (副)：	木村 好里	
Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

Super invar cast steel, Fe-32%Ni-5%Co by mass %, with excellent low coefficient of thermal expansion has disadvantages in the both of Young's modulus and strength, because of coarse columnar solidification structure having <100> texture. To overcome these disadvantages, the variations of microstructure and mechanical properties through the novel heat treatment referred to as cryo-annealing, which is consisting of subzero treatment and subsequent annealing, were investigated in a super invar cast steel. The cryo-annealing promoted fcc-bcc martensitic transformation and then bcc-fcc martensitic reversion. The bidirectional martensitic transformations led to the formation of duplex austenitic structure consisting of untransformed and reversed austenite having a coarse-grained structure. Furthermore, it is found that the austenitic structure was varied depending on the annealing temperature of the cryo-annealing; reversed austenite was remained at lower annealing temperature, while it recrystallized to fine-grained structure as increasing annealing temperature. These recrystallized austenite grains were formed due to the bulging of the prior austenite grain boundaries at region where untransformed austenite was in contact with reversed austenite. The recrystallized austenite grains preferred growing toward the reversed austenite due to the high dislocation density. In addition, annealing twins nucleate at the growing interface due to fast migration and high density of dislocation, resulting in a complexly oriented fine-grained austenitic structure. The high-density dislocations in reversed austenite and the complex orientation of recrystallized austenite contributed to the development of strength and Young's modulus, respectively. Thereafter, it was proved that the simultaneous development of rigidity and strength is not achieved by single cryo-annealing, but can be achieved by two-cycle cryo-annealing. Moreover, for further strengthening, aging was added to the cryo-annealing process using Ti and Si bearing super invar cast steels. Consequently, the improved super invar cast steel has high tensile strength over 800 MPa, while maintaining low thermal expansion coefficient.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).