

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	鉄系マルテンサイトにおける変態内部応力と低温脆性破壊に関する研究
Title(English)	Study on transformation internal stress and cryogenic brittle fracture in ferrous martensite
著者(和文)	福井大介
Author(English)	Daisuke Fukui
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12409号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:中田 伸生,尾中 晋,木村 好里,稲邑 朋也,寺田 芳弘
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12409号, Conferred date:2023/3/26, 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

(博士課程)
Doctoral Program

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	福井 大介		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	中田 伸生
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	尾中 晋

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、ラスマルテンサイト組織に分布する微視的内部応力を実測することで、組織学および結晶学の観点からその発現機構と分布を解明し、さらに、これがラスマルテンサイト組織の低温脆性破壊に及ぼす影響を調査した研究成果を取りまとめたものであり、5章構成からなっている。

第1章「序論」では、本論文の背景とその目的を示している。鉄鋼材料は、構造用材料として幅広く活用されており、近年では、社会的な高強度化ニーズの高まりによって、高強度鋼の研究が注目されている。特に、他の変態組織に比べて高強度かつ広範囲な強度レベルを有するマルテンサイト(M)組織に関する研究が盛んに行われており、マルテンサイト組織の力学特性や強化機構を解明することが重要視されている。マルテンサイト組織の中でも、低炭素鋼を焼入れした時に得られるラスマルテンサイト組織は、高強度鋼の基地組織として利用されていることもあり、膨大な研究成果が蓄積されているが、不明な点も数多く残されている。過去の研究では、ラスマルテンサイト組織における強化因子として、「過飽和に固溶した炭素(C)原子」、「高密度な転位」、「階層的な下部組織構造」などが報告されているが、最近では、新たな強化因子の一つとして、マルテンサイト変態の変態ひずみに由来する微視的な内部応力(変態内部応力)の影響が指摘されている。しかしながら、微視的な変態内部応力の発現機構や分布を定量的に調査し、それが力学特性に及ぼす影響を報告した例はほとんどない。そこで、本論文では、マルテンサイト組織中に発生する微視的な変態内部応力を定量的に評価し、その発現機構とそれに伴う力学特性評価、特に、低温脆性破壊への影響を検討したものである。

第2章「マルテンサイト変態の Bain ひずみに起因した変態内部応力」では、Cなどの侵入型元素の影響を完全に排除した IF(Interstitial-Free)の Fe-Ni 合金を用いて、ラスマルテンサイト組織中に分布する微視的な変態内部応力を FIB(Focused Ion Beam)と DIC(Digital Image Correlation)を併用した測定技術を使用し、電子線後方散乱回折法(Electron Backscatter Diffraction、EBSD)によって得られる結晶学的特徴との関係を調査した。さらに、中性子回折法と EBSD 法によって、マクロとミクロの観点から正方晶性を評価して、結晶構造と残留ひずみの関係を調査することで、変態内部応力の発現機構とその分布を解明し、ナノインデンテーション試験により力学特性を評価した。C を固溶しないマルテンサイトにおいても、焼入れままの状態でも正方晶性が存在し、不均一に生じたマルテンサイト変態中の Bain ひずみに起因した変態ひずみによって残留ひずみ(弾性ひずみ)が発生し、それによって bcc(body-centered cubic)構造のマルテンサイトが $[001]_M$ に沿って弾性的に伸長することを明らかにし

た。さらに、単一のマルテンサイトブロック内を FIB 加工した際、その加工によって解放される残留ひずみの異方性が Bain ひずみに由来する変態ひずみの異方性と対応することから、ラスマルテンサイト中には Bain グループを単位として微視的な残留ひずみが分布することを明らかにした。また、FIB 加工による残留ひずみの解放によってナノ硬度が顕著に低下することから、微視的な変態内部応力が力学特性に大きく影響することを示した。

第 3 章「マルテンサイト鋼の変態内部応力によるへき開破壊の異方性」では、C 量の異なる種々の Fe-C-Mn 合金を用いて、マルテンサイト変態による微視的な変態内部応力が、ラスマルテンサイトの低温へき開破壊に及ぼす影響をシャルピー衝撃試験、EBSD 法ならびに FIB-DIC 法により調査した。その結果、Bain 格子対応に基づく結晶方位解析によって、ラスマルテンサイトでは $\{001\}_M$ へき開による低温脆性破壊が生じ、Bain グループが有効結晶粒として作用することが明らかとなった。さらに、各 Bain グループにおけるへき開破壊は、 $(100)_M$ に比べて $(001)_M$ でより生じ易く、Bain ひずみに起因する微視的な変態内部応力によって、 $\{001\}_M$ へき開破壊の異方性がみられることを明らかにした。また、この異方性を持った $\{001\}_M$ へき開破壊は、C 含有量の異なるマルテンサイト鋼でも生じることを示した。

第 4 章「マルテンサイト鋼の変態内部応力に起因した異方的へき開破壊の力学解析」では、三点曲げ試験による静的破壊試験と拡張有限要素法(eXtended Finite Element Method: XFEM)を併用して、微視的な変態内部応力が低温脆性破壊に及ぼす影響について数値解析の観点から検証した。その結果、動的破壊試験のみならず静的破壊試験においても、各 Bain グループにおける $\{001\}_M$ へき開破壊に明瞭な異方性が存在することが明らかとなった。さらに、XFEM を用いた数値解析において、異方性を持った微視的な変態内部応力を導入すると、へき開き裂は明瞭に偏向しながら伝播し、 $(001)_M$ に対応する引張内部応力がき裂開口を助長することを明らかにした。したがって、微視的な変態内部応力と巨視的な外部応力の重ね合わせによって、脆性き裂伝播挙動を整理することが可能であることを明らかにした。また、変態内部応力の存在によってき裂が大きく偏向しながら伝播し、微視的なき裂伝播過程でエネルギーが散逸されることから、マルテンサイト組織中の変態内部応力がき裂伝播抵抗を高める可能性があることを示した。

第 5 章「総括」では、本論文の各章の結果について要約した。

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).

(博士課程)
Doctoral Program

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 (工学) Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名 : Student's Name	福井 大介		指導教員 (主) : 中田 伸生 Academic Supervisor(main)
			指導教員 (副) : 尾中 晋 Academic Supervisor(sub)

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

The transformation microstructure and the mechanical properties of martensitic steels have been widely studied due to its use in advanced high-strength steels. Recently, it was reported that the mechanical properties of martensitic steels might be affected by microscopic internal stresses generated via martensitic transformation. In this thesis consisting of 5 chapters, the internal stresses and their effect on cryogenic brittle fracture behavior were investigated in various types of martensitic steels while considering the mechanism of martensitic transformation. Neutron diffractometry and electron backscatter diffraction analysis revealed that the tetragonality of martensite (M) remains even in Fe-Ni alloys where no solution carbon exists and that the bcc crystal of martensite is elastically distorted along $[001]_M$ by the transformation strain generated via martensitic transformation. By FIB-DIC analysis, it was discovered that anisotropic internal stresses originate from Bain lattice deformation in martensitic transformation and are microscopically distributed within each Bain group of lath martensite. In addition, the effect of the transformation-induced microscopic internal stress on cryogenic fracture behavior was investigated by conducting both of the dynamic Charpy impact tests and the static three-point bending tests and discussed in terms of crystallography and solid mechanics. As a result, it was confirmed that the cleavage cracks prefer to propagate on $(001)_M$ rather than $(100)_M$ in the lath martensite due to the $[001]_M$ tensile internal stress caused by Bain strain. Furthermore, the numerical analysis using the extended finite element method revealed that the bending of the main crack is caused by the presence of transformation internal stresses, and fracture energy is dissipated during the microscopic crack propagation. From these results, it can be concluded that microscopic internal stress originating from Bain strain is one of the effective factors dominating the mechanical properties of martensitic steels.

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).