

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	高温蒸気タービン用析出強化型Ni 基超合金の硬さ法によるクリープ損傷評価
Title(English)	
著者(和文)	生沼駿
Author(English)	Shun Oinuma
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11947号, 授与年月日:2021年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:竹山 雅夫,小林 覚,木村 好里,寺田 芳弘,村石 信二
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11947号, Conferred date:2021/3/26, 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	生沼 駿		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	竹山 雅夫
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	小林 覚

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

本論文は「高温蒸気タービン用析出強化型 Ni 基超合金の硬さ法によるクリープ損傷評価」と題し、7 章から構成されている。

第 1 章「緒論」では、CO<sub>2</sub> 排出量を削減する 700°C 級 A-USC 火力発電システムの開発の現状について概説し、本システムの実現の鍵となるタービンロータ用材料として優れた高温強度と熱間鍛造性を両立する Ni 基合金の製造技術開発がほぼ達成され、そのクリープ破断強度の特徴について述べている。また、システムの実用化に向けては保全技術が求められ、特に材料のクリープ損傷評価手法の確立が課題であり、その最も簡便な非破壊検査手法として硬さ法の重要性を指摘し、本論文の意義、目的および構成を示している。

第 2 章「クリープ変形挙動と硬さによる損傷評価方法」では、新たに開発された  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>(Al,Ti) 相の体積率が約 20% であり結晶粒径約 150~200 $\mu$ m の Ni 基鍛造合金 TOSIX-2 を用いて 700°C~750°C, 145~400MPa にて最長 40,000 時間のクリープ破断試験を行い、クリープ変形挙動を調べている。その結果、クリープは、温度および応力によらず、全寿命の 8 割をクリープ加速の程度が一定となる加速域 (領域 II) で占められ、その最大ひずみ量は約 20% となること、また、この領域の変形はひずみの増加に伴い粒界近傍において僅かに優先的に進行するものの、粒内において均一に進行することを明らかにしている。以上から、室温での硬さ法によるクリープ損傷評価は、応力加速試験においても、領域 II における 20% 以下のひずみにおいて粒内領域を十分含む圧痕を用いれば可能であることを示している。

第 3 章「硬さに及ぼす応力時効の影響」では、前章の結果から TOSIX-2 のクリープ破断材を用いて、平行部全体の室温における硬さを、単純時効に相当するねじ部とともに測定し、硬さにおよぼす応力時効 (ひずみ) の影響を調べている。その結果、平行部の硬さは、クリープのマクロひずみ  $\epsilon_c$  の増加に伴って増加し、この硬さのねじ部に対する増分  $\Delta HV$  は  $\epsilon_c$  の 1/2 乗と比例関係にあり、これはひずみの導入による転位密度の増加に起因すると述べている。したがって、領域 II における  $\Delta HV$  を評価すれば  $\epsilon_c$  を推定でき、硬さ法により信頼性のある損傷評価が可能であると結論している。

第 4 章「応力時効材の硬さに及ぼす温度および応力の影響」では、第 3 章で得られた知見に基づいて、実機の  $\Delta HV$  から  $\epsilon_c$  を推定することを目的に、TOSIX-2 を用いて破断時間が数千時間以内となる温度および応力加速条件にてひずみが 20% 以内でのクリープ中断試験を行い、 $\Delta HV$  と  $\epsilon_c$  の関係を調べている。その結果、 $\Delta HV$  は  $\epsilon_c$  の 1/2 乗と比例関係にあること、また、その傾きは高温および低応力長時間ほど低下することを明らかにしている。この傾きの低下は、高温ほどクリープ中の回復によるサブバウンダリーの形成が顕著になることによる転位密度の減少に起因すると述べている。したがって、加速試験により実機の寿命を評価するための  $\Delta HV$  と  $\epsilon_c$  の基準線を得るためには、応力加速試験が適切であると指摘している。

第 5 章「応力時効材の硬さに及ぼす  $\gamma'$  相の体積率の影響」では、粒内  $\gamma'$  相の体積率  $V_{\gamma'}$  が 4% (Alloy 617) および 32% (Alloy 520) の商用合金を用いてクリープ中断試験を行い、 $\Delta HV$  と  $\epsilon_c$  の関係を調べている。その結果、いずれの場合も  $\Delta HV$  は  $\epsilon_c$  の 1/2 乗と比例関係にあるが、その傾きは  $V_{\gamma'}$  の減少に伴い低下することを見出し、この低下はサブバウンダリーの形成による転位密度

の減少に起因すると述べている。したがって、硬さ法による損傷評価は、 $\varepsilon_c$  に対して  $\Delta HV$  が明確に捉えられる  $V_f$  が十数%以上の合金に適用可能であると述べている。

第6章「硬さ法によるクリープ損傷評価手法の構築」では、前章までに得た知見を基に、実機ロータの評価対象部分のクリープひずみやクリープ余寿命を硬さ測定によって推定する具体的な手順を明示している。また、その妥当性を確認するために、実機の損傷を模擬した *TOSIX-2* のクリープ試験材を対象に、本評価法の推定精度を検証している。その結果、硬さ測定値からクリープひずみおよびクリープ時間を、損傷評価精度の指標となる **Factor of 2** の範囲内にて推定可能であることを実証し、本手法は  $V_f$  が十数%以上の合金のクリープ損傷を評価する上において工業的に利用できる有効な方法であることを示している。

第7章「結論」では各章で得られた結果をまとめ、本論文を総括している。

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).

(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	生沼 駿		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	竹山 雅夫
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	小林 寛

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

This thesis proposed practical creep damage evaluation method by means of hardness measurement applied for  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>(Al,Ti) precipitation strengthened Ni-based wrought superalloys, especially developed for 700°C class Advanced USC steam turbine rotor material, TOSIX-2. The long term creep testing up to 40,000 hours of TOSIX-2 revealed that 80% of creep life, and up to 20% of creep strain,  $\epsilon_c$ , is dominated by acceleration regime (II), in wide range of temperature and stress accelerated conditions. It is preferred that vickers hardness should be measured at homogeneous creep deformation at grain boundary and interior during regime (II). The hardness increase,  $\Delta HV$ , at crept portion of the ruptured specimens is proportional to the square root of local creep strain,  $\epsilon_c$ , suggesting that creep strain can be estimated by measuring hardness increase at stress aged portion. The  $\Delta HV$ -  $\epsilon_c$  relation shows testing temperature dependency due to recovery at high temperature, and thus  $\Delta HV$ -  $\epsilon_c$  estimation standard line should be established by stress accelerated creep testing. Hardness measurement with various commercial alloys revealed that  $\Delta HV$ -  $\epsilon_c$  relation shows  $\gamma'$  volume fraction dependency due to recovery in low volume fraction alloys, suggesting that hardness method can be applied to alloys which contain more than 10-20% of  $\gamma'$ . Creep strain,  $\epsilon_c$ , and creep time,  $t$ , of TOSIX-2 was estimated with factor of 2 accuracy from  $\Delta HV$ -  $\epsilon_c$  relations and  $\theta$  prediction method, concluding that the established hardness methodology is capable to be used in practical evaluation of serviced rotors.

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).