



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

DISSERTATION

To be presented at

Université de Lorraine and Northwestern Polytechnical University

Ke HUA 花珂

To obtain the doctor's degree of

University of Lorraine and Northwestern Polytechnical University

SPECIAL FIELD: Engineering Sciences

OPTION: Materials Science

Displacive characteristics of β to α phase transformation and its impact on hot deformation behavior in Ti-7333 metastable β titanium alloy

Defended on June 15th, 2019 in front of the jury:

Anthony ROLLETT	Professor	Carnegie Mellon University, USA	Reviewer & Jury member
Rui YANG	Professor	Institute of Metal Research, China	Reviewer & Jury member
Benoit APPOLAIRE	Professor	Université de Lorraine, France	Jury member
Yongqing ZHAO	Professor	Northwest Institute For Non-ferrous Metal Research, China	Jury member
Yudong ZHANG	Doctor HDR	Université de Lorraine, France	Supervisor
Jinshan LI	Professor	Northwestern Polytechnical University, China	Supervisor
Weimin GAN	Doctor HDR	Helmholtz-Center Geesthacht, Germany	Co-Supervisor
Hongchao KOU	Professor	Northwestern Polytechnical University, China	Co-Supervisor
Claude ESLING	Professor	Université de Lorraine, France	Invited

Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux, LEM3
7 rue Félix Savart, 57070 Metz, France

Abstract

In the present work, a thorough investigation has been conducted on the Ti-7333 alloy in terms of the α to β phase transformation, the variant selection and the correlation between the microstructure evolution and the hot deformation behavior.

It was revealed that the intragranular α plates precipitated during the heat treatment obey the Burgers Orientation Relationship (BOR) with the β matrix. The structure transformation is realized by a contraction in the $\langle 1\bar{1}\bar{2} \rangle_{\beta}$, an elongation in the $\langle \bar{1}1\bar{1} \rangle_{\beta}$ and $\langle 110 \rangle_{\beta}$, and a shear on the $\{1\bar{1}\bar{2}\}_{\beta} \langle \bar{1}1\bar{1} \rangle_{\beta}$ slip system. Locally three variants interrelated by a $60^\circ \langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha}$ rotation form a triangular pattern. Each α precipitate is composed of two kinds of nano-sized α domains. One is situated on the broad face of the major α precipitate (named interface α), and the other goes through the major α (termed penetrating α). The interface α obeys the BOR with the β matrix and is related with the major α by a $60^\circ \langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha}$ rotation. The nucleation of such α is induced by the large shear strain generated by the formation of the major α . The penetrating α does not obey the BOR with the β matrix but is related with the major α by a 60° rotation around another $\langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha}$. The nucleation of such α is induced by the largest normal strain generated by the formation of the main α plate.

The selection of the α variants during hot deformation at 700°C happens with dependence on the local crystal perfection of the β grains. In the slightly deformed β grains, 2 BOR variants forming ‘cross-shaped’ clusters and interrelated by a 90° rotation around the $\langle 1\ 1.38\ \bar{2}.38\ 0 \rangle_{\alpha}$ axis are selected and form in large quantities. The selected variants make maximum contribution to the macroscopic deformation and receive the maximum resolved shear stress from the external load resolved on their $\{1\bar{1}\bar{2}\}_{\beta} \langle \bar{1}1\bar{1} \rangle_{\beta}$ systems for transformation. In the heavily deformed β grains occupied mainly by dislocation slip, 2 to 4 BOR variants are selected in smaller numbers. The selection criterion is still obeyed but with restriction from the local deformation. The α variant selection also occurs in the 600°C compression but under the only request for the maximum strain contribution to the macroscopic deformation.

The deformation behavior during 700°C compression presents three characteristic stress-strain stages: a linear stage (Stage I), a discontinuous yielding (Stage II) and a

steady-state (Stage III). At the end of Stage I, more than 90% of the β boundaries are occupied by grain boundaries α (α_{GB}). The onset of the plastic deformation happens at the late Stage I when the stress deviates from the Young's modulus. This behavior results from dislocation slip near the β grain boundary regions. The discontinuous yielding of Stage II originated from the fragmentation of the α_{GB} and the intensive formation of mobile dislocations near the β grain boundary areas. The steady-state of Stage III arises from two orientation dependent deformation modes of the β grains. For those in favorable activation orientation for their $\{110\}_{\beta}<1\bar{1}1>_{\beta}$ systems with respect to the external compressive load, the deformation is realized by the dislocation slip and by the formation of slip bands; whereas for those with their $\{1\bar{1}\bar{2}\}_{\beta}<\bar{1}\bar{1}\bar{1}>_{\beta}$ systems - the system for β to α transformation - in favorable orientations, the deformation is achieved by intensive formation of intragranular α precipitates. The deformation at 600 °C compression presents the same stress-strain characteristics for Stage I and II. After these two stages, the deformation experiences first work hardening resulting from massive β to α transformation, and then work softening from the formation of the spheroidized α and β bands.

This work provides comprehensive information on the displacive feature of the β to α transformation, the underlying mechanisms of α variant selection under thermal and thermomechanical processing and the transformation related hot deformation mechanisms of metastable β titanium alloys.

Key words: Titanium alloy; Phase transformation; Transformation strain; Strain accommodation; Variant selection; thermomechanical processing.

Résumé

Dans le présent travail, une étude approfondie a été menée sur l'alliage Ti-7333 en termes de transformation de phase α en β , de sélection de variantes et de corrélation entre l'évolution de la microstructure et le comportement à la déformation à chaud.

Il a été montré que les plaques α intragranulaires précipitées pendant le traitement thermique obéissent à la relation d'orientation de Burgers (BOR) avec la matrice β . La transformation de la structure est réalisée par une contraction dans $\langle 1\bar{1}\bar{2} \rangle_{\beta}$, un allongement dans $\langle \bar{1}1\bar{1} \rangle_{\beta}$ et $\langle 110 \rangle_{\beta}$, et un cisaillement sur le système de glissement $\{1\bar{1}\bar{2}\}_{\beta} \langle \bar{1}1\bar{1} \rangle_{\beta}$. Localement, trois variantes liées entre elles par une rotation de $60^\circ \langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha}$ forment un motif triangulaire. Chaque précipité α est composé de deux types de domaines α de taille nanométrique. L'un est situé sur la face large du précipité α majeur (interface α), l'autre traverse le α majeur (α pénétrant). L'interface α obéit au BOR avec la matrice β et est reliée à la majeure α par une rotation de $60^\circ \langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha}$. La nucléation de cet α est induite par la contrainte importante de cisaillement générée par la formation du α majeur. Le α pénétrant n'obéit pas au BOR avec la matrice β mais est relié au α principal par une rotation de 60° autour d'un autre $\langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha}$. La nucléation de cet α est induite par la plus grande contrainte normale générée par la formation de la plaque α principale.

La sélection des variantes α lors de la déformation à chaud à 700°C s'effectue en fonction de la perfection cristalline locale des grains β . Dans les grains β légèrement déformés, 2 variantes de BOR liées entre elles par $90^\circ \langle 1\ 1.38\ \bar{2}.38\ 0 \rangle_{\alpha}$ rotation sont sélectionnées en grands nombres. Les variantes sélectionnées apportent une contribution maximale à la déformation macroscopique et subissent la contrainte de cisaillement résolue maximale de la charge externe résolue sur leurs systèmes de transformation $\{1\bar{1}\bar{2}\}_{\beta} \langle \bar{1}1\bar{1} \rangle_{\beta}$. Dans les grains β fortement déformés occupés principalement par des bandes de glissement, 2 à 4 variantes de BOR sont sélectionnées. Le critère de sélection est toujours respecté mais avec une restriction de la déformation locale. La sélection de la variante α se produit également lors de la compression à 600°C mais sous la seule condition de la contribution maximale de la déformation à la déformation macroscopique.

Le comportement en déformation lors de la compression à 700 °C présente trois stades contraintes-déformations caractéristiques: un stade linéaire (stade I), un stade d'écoulement discontinu (stade II) et un stade stable (stade III). À la fin du stade I, plus de 90% des joints de grains β sont occupés par des joints de grains α (α_{GB}). Le rendement discontinu du stade II provient de la fragmentation de α_{GB} et de la formation intensive de dislocations mobiles près des joints de grains β . L'état d'équilibre du stade III résulte de deux modes de déformation. Pour ceux dont l'orientation d'activation est favorable pour leurs systèmes $\{110\}_{\beta} \langle \bar{1}\bar{1} \rangle_{\beta}$ par rapport à la charge de compression, la déformation est réalisée par le glissement de dislocation et par la formation de bandes de glissement; alors que pour ceux avec leur $\{1\bar{1}\bar{2}\}_{\beta} \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle_{\beta}$ systèmes - le système de transformation de β à α - dans des orientations favorables, la déformation est obtenue par formation intensive de précipités α intragranulaires. La déformation à une compression de 600 °C présente les mêmes caractéristiques de contrainte-déformation pour les stades I et II. Après ces deux étapes, la déformation subit d'abord un durcissement résultant de la transformation massive de β en α , puis un adoucissement résultant de la formation des bandes α et β sphéroïdalisées.

Ce travail fournit des informations détaillées sur la caractéristique de déplacement de la transformation β à α , les mécanismes sous-jacents de la sélection des variantes α sous traitement thermique et thermomécanique et les mécanismes de déformation à chaud liés à la transformation des alliages de titane β métastable.

Mots-clés: Alliage de titane; Transformation de phase; Déformation de transformation; Accommodation de déformation; Sélection de variantes; traitement thermomécanique