



Doctoral Thesis

## **Ferromagnetic metastable $\tau$ -MnAl-C: diffusional-displacive mechanism of formation**

**Author(s):**

Sologubenko, Alla S.

**Publication Date:**

2005

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005024577> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 16123

# **Ferromagnetic metastable $\tau$ -MnAl-C: diffusional-displacive mechanism of formation**

Dissertation submitted to the  
**Swiss Federal Institute of Technology Zürich**

for the degree of  
Doctor of Natural Science

presented by  
**Alla S. Sologubenko**  
Dipl. Phys. A. M. Gorki University, Kharkov  
born December 6, 1966  
citizen of Ukraine

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. G. Kostorz, examiner  
Prof. Dr. P. Müllner, co-examiner  
Prof. Dr. W. Steurer, co-examiner

# Summary

In this work, the formation of the ferromagnetic metastable  $\tau$ -phase in Mn- $X$ at.% Al- $Y$ at.% C alloys ( $39 \leq X \leq 48.32$ ,  $0 \leq Y \leq 3.61$ ) was studied mainly by using transmission electron microscopy (TEM). The  $\tau$ -MnAl-C-phase forms from the supercooled high-temperature  $\varepsilon$ -phase by two transformation paths and results in two morphological modifications (“plate-like” and “flower-like”). The two paths may be followed simultaneously, i.e. the modifications can coexist. This study focuses on the detailed description of the displacive mode of the  $\varepsilon \rightarrow \tau$  transformation resulting in the plate-like modification. Plate-like  $\tau$  retains a specific orientation relationship  $(0001)\varepsilon \parallel (111)\tau$ ,  $[11\bar{2}]\varepsilon \parallel [\bar{1}10]\tau$  to the matrix  $\varepsilon$ -phase during the intermediate steps of the displacive transformation mode.

The factors controlling the selection of either of the two transformation paths were found from a metallographic study and energy-dispersive x-ray fluorescence spectroscopy. The important factors are found to be the manganese content [Mn] and the isothermal annealing temperature  $T$ . The  $\tau$ -phase forms from  $\varepsilon$  during annealing in the temperature range from 300 °C to about 700 °C. For [Mn]  $\geq$  57 at.% and at  $T \leq$  400 °C, plate-like  $\tau$  dominates. For [Mn] = 60 at.%, only plate-like  $\tau$  exists. For [Mn] < 57 at.%, the flower-like modification forms preferentially. Annealing at temperatures  $T >$  600 °C yields only flower-like  $\tau$ . At intermediate temperatures, the Mn concentration is a decisive parameter.

The diffusional-displacive mode of the plate-like  $\tau$ -phase formation was studied in detail in Mn-39.2 at.% Al-0.8 at.% C and confirmed for crystals of several other compositions, by metallographic study, electron diffraction, conventional and high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM). TEM studies show that the diffusional-displacive mode of  $\tau$  formation is a discontinuous process. The transformation sequence transmits the crystallographic correspondence between  $\varepsilon$  and  $\tau$  during the whole process. The intermediate long-range-ordered  $\varepsilon'$ -phase nucleates and grows coherently within the disordered  $\varepsilon$ -matrix. Symmetry reduction due to the  $\varepsilon \rightarrow \varepsilon'$  transformation yields three orientation variants (structural domains) of  $\varepsilon'$ . As  $\varepsilon'$ -domains evolve, elastic strains increase at the  $\varepsilon'$ -domain interfaces until shear occurs in  $\varepsilon'$ -domains to reduce the transformation strain. Stacking faults appear between  $\varepsilon'$ -domain boundaries. Structural ordering of the stacking faults within the  $\varepsilon'$ -domains results in the formation of internally twinned polytypes. Transformation dislocations bounding the polytype stacking layers are pinned at

$\epsilon'$ -domain boundaries. Finally, the magnetic ordering of the magnetic moments on Mn sites triggers structural reordering of the polytype stacking layers. The collective motion of transformation dislocations that overcome the  $\epsilon'$ -domain boundaries, results in the formation of twinned  $\tau$  plates. The  $\epsilon'$ -domain boundaries limit the spatial extension of the transformation during the intermediate steps. Dense nets of antiphase boundaries (APBs) cross the structural domains of  $\epsilon'$ . The intersections of the APBs with  $\epsilon'$ -domain boundaries can serve as nucleation sites for the subsequent transformation step.

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Bildung der ferromagnetischen metastabilen  $\tau$ -Phase in Mn- $X$ at.% Al- $Y$ at.% C Legierungen ( $39 \leq X \leq 48,32$ ;  $0 \leq Y \leq 3,61$ ) hauptsächlich mit Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) untersucht. Die  $\tau$ -MnAl-C-Phase bildet sich entlang zwei Umwandlungspfaden aus der unterkühlten Hochtemperaturphase  $\epsilon$ . Dabei ergeben sich zwei morphologisch unterschiedliche Modifikationen von  $\tau$  („plate-like“ = plattenförmig und „flower-like“ = blumig). Die Bildung von  $\tau$  kann simultan über beide Umwandlungspfade erfolgen, d.h. beide Modifikationen können nebeneinander auftreten. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der detaillierten Beschreibung des displaziven Modus der  $\epsilon \rightarrow \tau$ -Umwandlung, der über mehrere Zwischenschritte abläuft und für die Bildung der plattenförmigen Modifikation von  $\tau$  verantwortlich ist. Entlang diesem Umwandlungspfad behält die plattenförmige  $\tau$ -Phase eine spezifische Orientierungsbeziehung  $(0001)\epsilon \parallel (111)\tau$ ,  $[11\bar{2}]\epsilon \parallel [\bar{1}10]\tau$  zur  $\epsilon$ -Matrix bei.

Mittels metallographischer Untersuchungen und Röntgenfluoreszenzanalyse wurden die bestimmenden Faktoren gefunden, die für die Auswahl einer der beiden Umwandlungspfade verantwortlich sind. Die bestimmenden Faktoren sind der Mangangehalt [Mn] und die Auslagerungstemperatur  $T$ . Die  $\tau$ -Phase entsteht aus der  $\epsilon$ -Phase bei Auslagerung in einem Temperaturbereich von 300 bis ca. 700 °C. In Legierungen mit  $[\text{Mn}] \geq 57$  at.% dominiert bei  $T \leq 400$  °C plattenförmiges  $\tau$ . Bei  $[\text{Mn}] = 60$  at.% tritt nur plattenförmiges  $\tau$  auf. Die blumige Modifikation hingegen bildet sich vorzugsweise bei  $[\text{Mn}] < 57$  at.%. Bei Auslagerungstemperaturen höher als 600 °C entsteht nur blumiges  $\tau$ . Bei dazwischenliegenden Auslagerungstemperaturen ( $400$  °C  $\leq T \leq 600$  °C) ist der Mangangehalt [Mn] der entscheidende Faktor für die bevorzugte Bildung einer bestimmten  $\tau$ -Modifikation.

Die Einzelheiten der Bildung von plattenförmigem  $\tau$  wurden in Mn-39,2 at.% Al-0,8 at.% C mittels metallographischer Analyse, Elektronenbeugung, konventioneller und hochauflösender TEM (HRTEM) detailliert untersucht. Die Resultate wurden mit Untersuchungen an Legierungen mit anderen Zusammensetzungen bestätigt. TEM-Untersuchungen zeigen, dass die Bildung von plattenförmigem  $\tau$  diskontinuierlich erfolgt. Während der Umwandlungssequenz bleibt die kristallographische Korrespondenz zwischen  $\epsilon$  und  $\tau$  erhalten. Die Umwandlung beginnt mit der Keimbildung und dem kohärenten Wachstum der langreichweitig geordneten  $\epsilon'$ -Phase in der ungeordneten  $\epsilon$ -Matrix. Infolge der Symmetriere-

duktion während der  $\varepsilon \rightarrow \varepsilon'$ -Umwandlung treten drei Orientierungsvarianten (strukturelle Domänen) von  $\varepsilon'$  auf. Während des Wachstum der  $\varepsilon'$ -Domänen steigen die elastischen Spannungen an den  $\varepsilon'$ -Domänen-Grenzflächen, bis Scherung auftritt, um die Spannungen zu reduzieren. Zwischen den  $\varepsilon'$ -Domänen bilden sich Stapelfehler. Strukturelles Ordnen von Stapelfehlern innerhalb der  $\varepsilon'$ -Domänen führt zur Bildung von intern verzwilligten Polytypen. Die für diesen Umwandlungsschritt verantwortlichen Versetzungen, welche die Stapelfolgen der Polytypen begrenzen, sind an den  $\varepsilon'$ -Domänen-Grenzflächen verankert. Schliesslich ordnen sich die magnetischen Momente der Mn-Atome und induzieren neue strukturelle Ordnungsvorgänge der Stapelfolgen der Polytypen. Die korrelierte Bewegung der Umwandlungsversetzungen, die die  $\varepsilon'$ -Domänen-Grenzflächen durchdringen, ergibt verzwilligte  $\tau$ -Platten. Die  $\varepsilon'$ -Domänen-Grenzflächen beschränken die räumliche Ausdehnung des Umwandlungsbereichs während der Zwischenschritte der Umwandlung. Dichte Netze von Antiphasengrenzflächen (APBs) kreuzen die strukturellen Domänen von  $\varepsilon'$ . Durchschneidungen der APBs mit  $\varepsilon'$ -Domänen-Grenzflächen können als Zentren für die Keimbildung des folgenden Umwandlungsschrittes dienen.