HAL
open science

# Effet du durcissement sur la ténacité : germination par la contrainte appliquée à un alliage d'aluminium 6061

L. Helfen, T.-F. Morgeneyer, T. Petit, J. Besson, C. Ritter, K. Colas-Leroux

## To cite this version:

L. Helfen, T.-F. Morgeneyer, T. Petit, J. Besson, C. Ritter, et al.. Effet du durcissement sur la ténacité : germination par la contrainte appliquée à un alliage d'aluminium 6061. Journées Annuelles SF2M 2019, Oct 2019, Paris, France. cea-02614138

**HAL Id: cea-02614138**

**https://cea.hal.science/cea-02614138**

Submitted on 20 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Effet du durcissement sur la ténacité : germination par la contrainte appliquée à un alliage d'aluminium 6061

**Tom Petit[a], Jacques Besson[b], Claire Ritter[a], Kimberly Colas[a], Lukas Helfen[c,d], Thilo F. Morgeneyer[b]**

[a] DEN-Service d'Etudes des Matériaux Irradiés, CEA, Université Paris-Saclay, F-91191, Gif-sur-Yvette, France
[b] MINES ParisTech, PSL Research University, Centre des matériaux, CNRS UMR 7633, France
[c] Institute for Photon Science and Synchrotron Radiation, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany
[d] European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, France

## Résumé

Quatre temps de revenu sont appliqués à un alliage d'aluminium à durcissement structural. L'augmentation de ce temps de revenu provoque un durcissement en traction qui s'accompagne d'une diminution de la ténacité, notamment du module de déchirement. L'objectif de cette étude est de comprendre le lien entre ces deux évolutions. Une analyse multi-échelle corrélative (utilisant le microscope électronique à balayage, la sonde atomique tomographique, la laminographie par rayonnement synchrotron, la simulation par éléments finis) est développée.
La campagne expérimentale, qui combine investigations microstructurales et mécaniques, a montré que les mécanismes d'endommagement sont typiquement ductiles et ne diffèrent pas d'un traitement thermique à l'autre. Seul le durcissement de la matrice peut expliquer la baisse de la ténacité.
Ces comportements sont reproduits ici numériquement grâce à l'introduction dans un modèle d'endommagement d'un nouveau critère de germination de cavités piloté par la contrainte.
Le raisonnement mis en place est illustré dans la Figure 1.

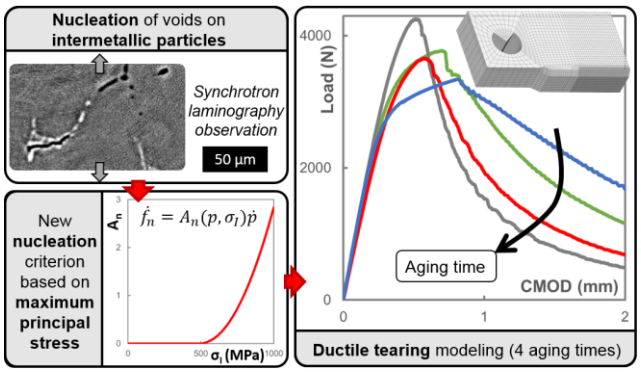


*Figure 1. Schéma représentant la démarche mise en place*

## Résultats

### Microstructure initiale et mécanismes d'endommagement

Il est montré que les grains, la précipitation grossière et les mécanismes d'endommagement ne dépendent pas du temps de revenu :

- La rupture est typiquement ductile et majoritairement intragranulaire, ce qui est prouvé notamment par des analyses EBSD réalisées sur des tranches d'éprouvettes de ténacité contenant des fissures arrêtées.
- Les précipités grossiers $Mg_2Si$ rompent à des niveaux de déformation plastique très bas, et des cavités germinent par du clivage sur des intermétalliques au fer lorsque la déformation plastique augmente.

Seule la nanoprécipitation durcissante augmente avec le temps de revenu (Figure 2). Quand celui-ci augmente, des aiguilles de Mg2Si nanométriques apparaissent, ce qui provoque le durcissement de la matrice. Ce durcissement favorise la germination de cavités sur les deux populations de précipités grossiers décrits précédemment. Ce phénomène mène à la diminution de la ténacité, notamment à la diminution du module de déchirement (qui quantifie la résistance à la propagation du matériau).

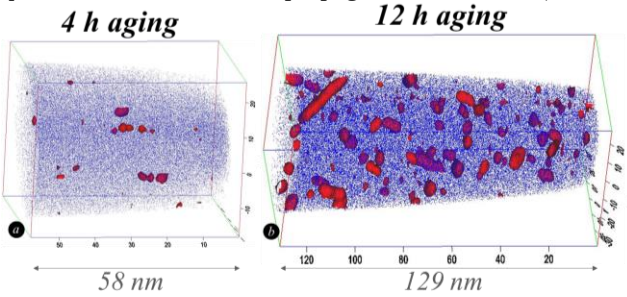


*Figure 2. Nanoprécipitation durcissante (Mg+Si en rouge) dans la matrice d'aluminium (en bleu), observée à la sonde atomique tomographique*

### Simulation de la ténacité

En se basant sur ces observations, un modèle d'endommagement de type Gurson-Tvergaard Needleman est proposé afin de simuler par éléments finis les essais de ténacité. Dans ce modèle est insérée une nouvelle cinétique de germination qui dépend de la contrainte maximale principale. En effet, le modèle plus classique de germination pilotée par la déformation plastique n'est pas suffisant pour reproduire une telle détérioration du module de déchirement, qui se traduit par des avancées très rapides de fissure pourtant typiquement ductiles.
Dans ce modèle, la loi d'endommagement est identique d'un traitement thermique à l'autre. La seule modification des lois élastoplastiques (dont les paramètres sont dans le

Tableau 1) identifiées en traction permettent de reproduire les comportements très différents observés en ténacité (Figure 1).

*Tableau I. Paramètres de la loi d'écrouissage identifiés en traction*

| Revenu (h) | $\sigma_S$ (MPa) | $\sigma_e$(MPa) | b |
|---|---|---|---|
| 4 | 322 | 154 | 12.12 |
| 8 | 345 | 199 | 12.72 |
| 12 | 352 | 267 | 14.27 |
| 16 | 355 | 255 | 17.34 |

# Conclusions

Le revenu provoque une diminution de la ténacité et du module de déchirement de l'alliage d'aluminium 6061. Cette détérioration est expliquée principalement par l'augmentation des propriétés en traction, qui provoque une élévation des niveaux de contraintes atteints dans le matériau. C'est ce phénomène qui favorise la germination de cavités par rupture de la précipitation grossière (intermétalliques et $Mg_2Si$) ou au niveau de son interface avec la matrice, précipitation qui est par ailleurs identique d'un traitement thermique à l'autre.

Afin de reproduire ce comportement, un nouveau modèle comprenant une cinétique de germination pilotée par la contrainte est proposé. Ce modèle permet de modéliser les différentes ténacité et vitesses de propagation de fissure, en utilisant une unique loi d'endommagement en en modifiant uniquement le comportement élastoplastique du matériau.