

Confirmation de l'asymétrie traction-compression du NiTi à l'aide de "bulge tests circulaires" sur plaques minces

V. Grolleau^a, H. Louche^b, A. Penin^a, G. Rio^a, D. Favier^c

a. Université Européenne de Bretagne, LIMATB, Rue de Saint Maudé - BP 92116, 56321 LORIENT cedex

b. Université de Montpellier 2/CNRS, LMGC, CC 048, 34095 Montpellier Cedex, France

c. Université de Grenoble/CNRS, 3SR, BP 53, 38041 Grenoble Cedex 09, France

Résumé :

L'asymétrie traction-compression pour un alliage polycristallin NiTi en phase superélastique est étudiée à l'aide d'une part d'essais de traction et d'autre part de gonflement circulaires, appelé bulge test par la suite. Les tests de traction dans les sens long et travers de laminage de la tôle permettent d'évaluer l'anisotropie dans le plan. La réponse équi-biaxiale contrainte-déformation au sommet du bulge est calculée à partir de la pression et du champ cinématique mesuré. La partie déviatorique du tenseur des contraintes associée, est identique à celui d'un état de compression dans l'épaisseur. Les résultats montrent alors un comportement asymétrique similaire à celui observé en traction-compression dans le plan pour des éprouvettes planes.

Abstract :

Tension-compression asymmetry in a polycrystalline superelastic NiTi thin sheet is studied by means of circular diaphragm bulging test and tensile tests. Tensile tests along the rolling and transverse directions allow evaluation of planar anisotropy. Equibiaxial tensile stress-strain curve at the centre of the bulge specimen is calculated from pressure and kinematical full field measurements. The deviatoric stress tensor for this stress state is identical to that of uniaxial compression in thickness. Asymmetric behaviour similar to in-plane tension-compression asymmetry is observed.

Mots clefs : NiTi Shape Memory Alloy, Tension Compression Asymmetry, Bulge Test

1 Introduction

Les alliages à mémoire de forme NiTi quasi-équiatomique sont bien connus pour leurs propriétés remarquables en particulier superélastiques. Ces propriétés sont associées à des transformations à l'état solide entre 3 phases, incluant la phase austénitique (B2) à haute température, une phase monoclinique (B19') appelée conventionnellement martensitique et une phase triclinique appelée conventionnellement phase R. Les essais de traction et compression de mono-cristaux ou poly-cristaux superélastiques, ont révélé des comportements asymétriques [1, 2, 3, 4, 5]. Pour la plupart des alliages polycristallins NiTi de même que pour les mono-cristaux, les tests de compression mettent en évidence des contraintes de transformation plus hautes, des déformations de transformation plus faibles et des pentes plus importantes sur les courbes contrainte-déformation au niveau du plateau de contrainte, comparé à la traction. Cette asymétrie pour le comportement mécanique a été attribuée à la faible symétrie cristallographique de la structure martensitique, au démaclage de la martensite [4, 5, 6], et enfin à l'anisotropie microstructurale des matrices polycristallines texturées des alliages NiTi [5].

L'étude plus en détails de cette asymétrie est difficile compte tenu du flambage des éprouvettes planes en compression. Le gonflement de plaques minces isotropes dans le plan, conduit à la création d'un

état équi-biaxial de déformation au sommet de la déformée [7, 8]. Dans cette étude, nous avons réalisé pour la première fois dans la littérature, cet état particulier de contrainte par bulge test de manière à analyser le comportement asymétrique de plaques fines super-élastiques en NiTi, en étant particulièrement attentif à l'apparition éventuelle de localisation en déformation.

Le travail présenté ici, correspond à la publication récemment acceptée [9]

2 Expérimentations

Le matériau testé est sous forme de tôles Ti-50.8 à % Ni, de $t=0.11\text{mm}$ d'épaisseur. L'analyse DSC révèle une simple transformation $A \rightarrow R$ au refroidissement avec $R_s = 298\text{K}$ et $R_f = 258\text{K}$ et la transformation inverse $R \rightarrow A$ au réchauffement. La chaleur latente spécifique est de $\sim 4.0\text{J/g}$. Aucune transformation vers la martensite B19' n'est observée en dessous de 210K dans les mesures. L'alliage est chauffé à 373K avant d'effectuer les tests qui sont conduits à température ambiante ($\sim 288\text{K}$), ainsi la phase de départ est un assemblage d'austénite et de phase R.

Les tests de traction uni-axiale sont effectués sur des bandes rectangulaires découpées dans les sens long et travers de laminage. Les dimensions sont de $50 \times 5 \times 0.11\text{mm}$ avec une longueur utile de 30mm . Les tests sont effectués à une vitesse de traverse constante de $3 \cdot 10^{-3}\text{mm/s}$, d'où une vitesse d'élongation proche de 10^{-4}s^{-1} . Le champ de déplacement est mesuré en continu, à l'aide d'un système 2D de corrélation d'images.

Les tests de gonflement sont menés sur des éprouvettes carrées $80 \times 80\text{mm}$ permettant d'obtenir au centre un bulge circulaire de diamètre $\phi = 60\text{mm}$ (cf. la figure 1a) d'où ici $\phi \gg t$. La tôle est pincée sur sa périphérie et la pression est appliquée sous l'éprouvette à l'aide d'eau et d'un piston de 60mm de diamètre, se déplaçant à 0.2mm/s . Durant le test, le déplacement 3D et le champ de déformation plan sur la surface centrale du bulge, sont obtenus à l'aide d'un système de corrélation d'image 3D avec 2 caméras.

3 Résultats

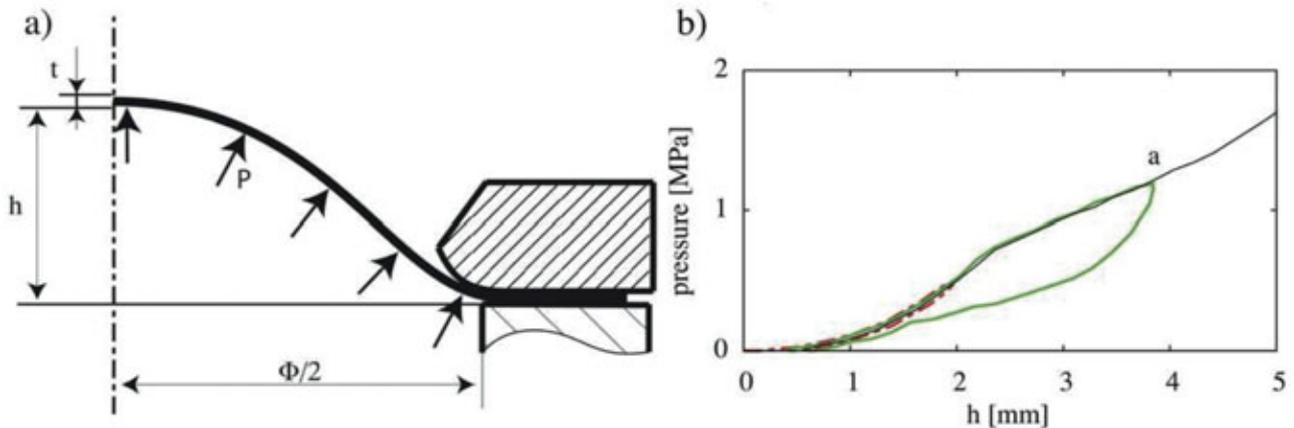


FIGURE 1 – Bulge test sur une tôle mince en NiTi : a) illustration schématique du test, b) courbe pression-déplacement du sommet pour deux cycles progressifs de chargement

La figure 1b présente l'évolution de la pression en fonction du déplacement au sommet pour 2 cycles de déformation. Le premier cycle de chargement s'effectue largement dans le régime élastique, jusqu'à 2mm de déplacement au sommet du bulge. Le déplacement vertical atteint 4mm dans le cas du second cycle, permettant de révéler une hystérésis et un comportement pseudo-élastique.

La figure 2 présente la distribution de déformations observée par corrélation d'images, sur le bulge test et dans le cas d'un essai de traction uni-axiale. La figure 2a montre le champ de déformations circonférentielles correspondant au point "a" repéré sur la figure 1b. Les courbes au-dessus présentent la distribution le long d'un rayon des déformations circonférentielles et radiales. On observe que les

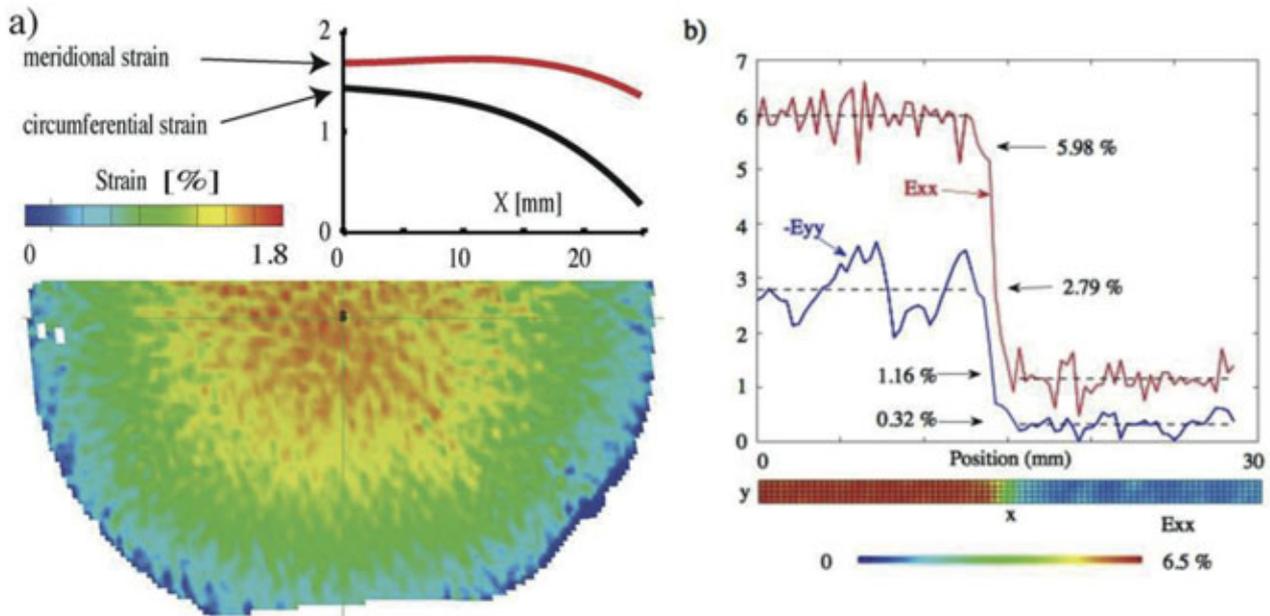


FIGURE 2 – Répartition des déformations pour le bulge test et la traction uni-axiale. a) Bulge test : champ de déformation circouférentielle pour un niveau de déformation correspondant au point "a" repéré sur la figure 1b. Courbes le long d'un rayon, de l'évolution des déformations circouférentielles et radiales. b) Test de traction uni-axiale : champ de déformations axiales pour une déformation globale d'environ 4%, durant le chargement. Les courbes représentent les profils de déformation selon l'axe de traction, pour les sens long et travers de l'éprouvette.

iso-valeurs de déformations apparaissent quasiment circulaires, indiquant une certaine isotropie dans le plan. On remarque également que les deux courbes d'évolutions ne présentent pas de brusques variations, ce qui montre une absence de localisation de déformation de type Lüders, contrairement aux cas des essais de traction [4, 10, 14, 19, 16, 17, 18]. La figure 2b présente les isovaleurs de déformations axiales (E_{xx}) pour une éprouvette obtenue dans le sens de laminage, ceci pour une déformation globale d'environ 4%. Les courbes au-dessus, représentent les profils instantanés des déformations dans les sens long et travers de l'éprouvette. On y voit clairement le phénomène de localisation, avec une propagation de la gauche vers la droite.

La figure 3 présente l'évolution de la contrainte de Cauchy en fonction de la déformation axiale logarithmique, ceci pour des tests de traction dans les sens long et travers de laminage. Les débuts des charges et décharges, révèlent des pentes identiques pour les deux éprouvettes avec $E^{(l)} = 30GPa$ au chargement et $E^{(u)} = 40GPa$ au déchargement. Durant le plateau, le matériau présente une légère anisotropie dans le plan de la plaque, avec une contrainte de transformation plus grande et une longueur de plateau plus petite dans la direction transverse, comparé au sens long de laminage. Les rapports des contraintes de transformation et des longueurs des plateaux, entre les deux directions sont respectivement : $\frac{\sigma_t^+}{\sigma_t^-} = \frac{360}{330} = 1.11$ et $\frac{\epsilon_t^+}{\epsilon_t^-} = \frac{3.5\%}{4.25\%} = 0.83$.

Si l'on néglige la faible anisotropie dans le plan, on peut considérer le bulge gonflé comme un dôme circulaire, conformément à ce qui a été observé sur la figure 2a. Compte tenu de la faible épaisseur de l'échantillon relativement au rayon, nous pouvons négliger les effets de flexion et de cisaillement dans l'épaisseur. Sous ces conditions, la mesure de la pression et du champ de déplacement permet de calculer les champs équi-biaxiaux de déformations et de contraintes au sommet du bulge [7]. L'évolution de cette contrainte équi-biaxiale (σ_b) en fonction de la déformation équi-biaxiale (ϵ_b) est également représentée sur la figure 3. Au début du chargement et du déchargement, on observe une pente de $E_b^{(l)} = 100GPa$ à la charge et $E_b^{(u)} = 80GPa$ à la décharge. Les rapports entre les pentes de traction et du bulge sont

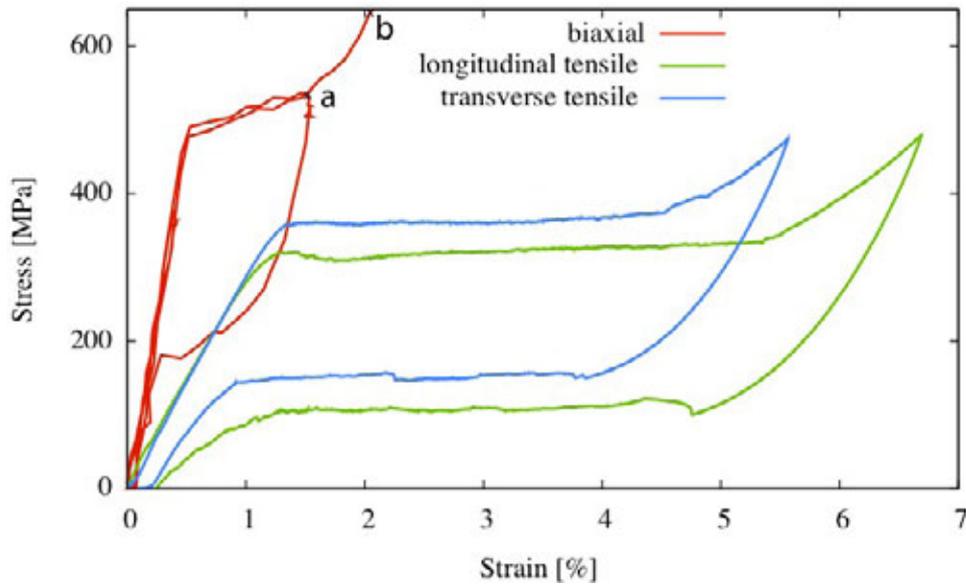


FIGURE 3 – Comportement mécanique de tôles minces en NiTi à la température ambiante (288 K). Courbe contrainte-déformation pour le matériau en traction uni-axiale le long de la direction de laminage ($//$, courbe verte) et dans la direction transverse (\perp , courbe bleu), et en traction equi-biaxiale (courbe rouge) déduite du bulge test

alors $\frac{E_b^{(l)}}{E^{(l)}} = \frac{100}{30} = 3.3$ pour la charge et $\frac{E_b^{(u)}}{E^{(u)}} = \frac{80}{40} = 2$ pour la décharge. Concernant les contraintes de transformation entre bulge et traction à température ambiante, on obtient $\frac{\sigma_b}{\sigma_t} = \frac{480}{330} = 1.47$ et $\frac{\sigma_b}{\sigma_t} = \frac{480}{360} = 1.33$

4 Discussion

4.1 Localisation de la déformation

Les figures 2b et 3 montrent clairement des phénomènes de localisation de type Lüders, conformes aux études déjà effectuées sur le sujet. La figure 2a montre également clairement qu'on ne voit pas apparaître des phénomènes de localisation de type Lüders dans le cas du bulge test, en particulier dans la zone centrale près du sommet du dôme. Il a été montré dans la littérature par différents dispositifs expérimentaux, que les déformations de type Lüders pour les NiTi polycristallins apparaissent en traction. Dans l'état actuel de nos connaissances, il n'a pas été fait d'observation similaire dans le cas du cisaillement ou de la compression [4]. Notre étude fournit une première illustration du fait que les effets de localisation n'apparaissent pas dans le cas de tension équi-biaxiale.

4.2 Modules apparents d'élasticité

Il est aisé de montrer qu'en élasticité isotrope, durant l'évolution linéaire, le rapport des pentes pour les courbes contraintes-déformations entre la traction et la tension équi-biaxiale est : $\frac{E_b}{E} = \frac{1}{(1-\nu)}$. Le rapport E_b/E a été déterminé expérimentalement à 3.3 et 2 respectivement pour la charge et la décharge.

Durant le chargement, la pente en essai uni-axial est faible. Il est maintenant bien connu que cette faible valeur est due à l'apparition des transformations induites en contraintes, avant la contrainte plateau [10, 20] et dans notre cas, à une structure initiale du matériau qui est une combinaison d'austénite et de phase R. Le rapport $E_b/E = 3.3$ est très élevé, incompatible avec un coefficient de Poisson de l'ordre de 0.3, comme déterminé sur la figure 2b pour une zone non transformée. Une hypothèse est que la transformation A-R, qui apparait durant le chargement initial en tension uni-axiale et bi-axiale, est fortement influencée par le type d'état de contrainte. Cette hypothèse demande à être approfondie.

La valeur de $E_b/E = 2$ obtenue durant le déchargement, est cohérente avec un coefficient de Poisson de 0.5. Il a été montré [10] que l'étape initiale de déchargement correspond à une variation de déformation homogène mettant en œuvre les phénomènes de démaclage et de transformations inverses ainsi que d'élasticité. Le démaclage de la martensite ainsi que la transformation inverse de phase, sont iso-volumes avec $\nu = 0.5$. Ceci implique que le coefficient de Poisson global doit être compris entre 0.33 et 0.5, à la condition que chaque évolution (en tension uni-axiale ou en tension bi-axiale) soit due aux mêmes mécanismes au début du déchargement.

4.3 Contraintes de transformations

On peut noter que les composantes du déviateur des contraintes en traction équi-biaxiale sont identiques à celle d'une compression simple suivant l'épaisseur de la plaque [7]. Expérimentalement, le rapport de la contrainte de transformation pour la traction équi-biaxiale et la traction uni-axiale est 1.33 et 1.47 selon respectivement les sens travers et long de laminage, soit une valeur moyenne de 1.4. Ce rapport devrait être égal à 1 dans le cas d'un critère de Von Mises. La différence observée est similaire aux asymétries traction-compression déjà mentionnées dans la littérature [3]. Lors de tests effectués sur des plaques en NiTi, Orgéas et Favier [3, 4] ont déterminé un rapport de 1.33 entre traction et compression simple dans le plan de la plaque, le long d'une même direction. Cette valeur est similaire aux deux rapports mesurés dans ce travail. Deux explications sont avancées dans la littérature pour expliquer cette asymétrie, soit une anisotropie [4, 20], soit une dépendance du critère isotrope à l'angle de Lode [4, 21]. Orgéas et Favier ont prouvé à l'aide de tests de cisaillement selon différentes directions sur la plaque, qu'il y avait très peu d'anisotropie dans leur cas. Dans notre cas, cela pourrait être dû à un effet d'anisotropie, compte tenu de la différence observée entre les réponses en traction selon les sens long et travers de laminage de la tôle, cependant cet effet n'est pas suffisant pour expliquer les valeurs de 1.33 et 1.47.

4.4 Énergie et déformation de transformation

Il a été montré que le travail de transformation en superélasticité est indépendant du type de chargement [6, 4] pour des déformations relatives aux mêmes fractions de martensites. La déformation de transformation est définie comme associée à une transformation complète. La déformation logarithmique au niveau du plateau a été déterminée comme étant $\epsilon^{//} = 4.25\%$ et $\epsilon^{\perp} = 3.5\%$ pour les sens long et travers de laminage, en traction. L'égalité $\sigma^{//} \epsilon^{//} = \sigma^{\perp} \epsilon^{\perp}$ est alors vérifiée, ceci est probablement cohérent avec le fait que la même quantité de matériau est transformée au niveau des plateaux pour les deux tests de traction. Toutefois, la déformation de plateau n'est pas la déformation de transformation, dont la valeur se situe vers les 8% en traction uni-axiale, voir par exemple [3]. La détermination de la déformation de transformation en traction uni-axiale, et encore plus en traction équi-biaxiale, est en fait très difficile par l'utilisation de nos mesures macroscopiques. La seule voie valide pour comparer les énergies induites par les deux types de chargement serait de calculer les sources de chaleur à partir de mesures infra-rouges [22], un travail de ce type est en cours.

5 Conclusions

L'étude montre pour la première fois, l'intérêt de l'utilisation de bulge test avec des tôles en NiTi de faible épaisseur, pour la réalisation d'états équi-biaxiaux en tension. À l'aide de cette technique, il est ainsi montré que des localisations de type Lüders durant la transformation de phase du NiTi, n'apparaissent pas sous les conditions de chargement en traction équi-biaxiale.

Le module apparent d'élasticité en traction uni-axiale est plus bas que la valeur équivalente estimée à partir du test équi-biaxial en tension, pour le chargement avant le plateau de contrainte indiquant ainsi que l'apparition de la transformation induite par la contrainte, est retardée dans le cas d'un état équi-biaxial précédent le plateau de contrainte. Durant la décharge, les deux modules élastiques apparents satisfont la théorie élastique avec un coefficient de Poisson proche de 0.5, indiquant la forte contribution du démaclage de la martensite et la transformation inverse sur le retour élastique durant le début du déchargement.

La transformation martensitique induite par contrainte dans la tôle de NiTi, apparaît au niveau d'un plateau, à une contrainte supérieure dans le cas d'une tension équi-biaxiale comparé au cas d'une tension uni-axiale. Le rapport moyen des contraintes associées est $\sigma_{equi-biaxiale}/\sigma_{traction} = 1.4$

Références

- [1] R.J. Wasilewski Metall. Mater. Trans., 2, 2973, 1971.
- [2] P. Roumagnac PhD thesis, Université de Compiègne, France, 1993.
- [3] L. Orgéas and D. Favier J. Physique IV, 5, 605, 1995.
- [4] L. Orgéas and D. Favier JActa Mater. 46, 5579,1998.
- [5] K. Gall, H. Sehitoglu, R. Anderson, I. Karaman, Y.I. Chumlyakov and I. Kireeva Mater. Sci. Eng., A317,85, 2001 .
- [6] T.E. Buchheit and J. Wert Metall. Trans., 27A, 269, 1996.
- [7] R. Hill Phil. Mag., 41, 1133, 1950.
- [8] B. Vieille, J. Michel, M. Boubakar, and C. Lexcellent. *int. J. of Mech. Sciences*, 49 :280–297, 2007.
- [9] V. Grolleau, H. Louche, V. Delobelle, A. Penin, G. Rio, Y. Liu, and D. Favier. *Scripta Materialia*, In Press, Accepted Manuscript, DOI : 10.1016/j.scriptamat.2011.05.003
- [10] D. Favier, H. Louche, P. Schlosser, L. Orgéas, P. Vacher and L. Debove *Acta Materialia*, 55 , 5310, 2007.
- [11] V. Grolleau, B. Galpin, A. Penin and G. Rio *Int. J. Crashworthiness*, 13-4 , 363, 2008.
- [12] V. Grolleau, G. Gary, D. Mohr , *Experimental Mechanics*, 3 , 293, 2008.
- [13] N. Le Maout , S. Thuillier , P.Y. Manach , *Engineering Fracture Mechanics* 76 , 1202, 2009.
- [14] J.A. Shaw and S. Kyriakides . *J. Mech. Phys. Solids*, 43 , 1243, 1995.
- [15] Y. Liu, Y. Liu and J. Van Humbeeck *Scripta Mater*, 39 , 1047, 1998.
- [16] D. Favier, Y. Liu, L. Orgéas and G. Rio *Solid mechanics and its applications*, vol. 101, New York, edited by Q.P. Sun, published by Kluwer Academic Publishers, 205, 2001.
- [17] P. Sittner, Y. Liu and V. Novak *J. Mech. Phys. Solids* 53 , 1719, 2005.
- [18] Q.P. Sun and Z.Q. Li *Int. J. Solids Struct.* 39, 3797, 2002.
- [19] Y. Liu and H. Xiang *J. Alloys Compd.*, 270 , 154, 1998.
- [20] K. Gall, H. Sehitoglu, Y.I. Chumlyakov and I.V. Kireeva *Acta Mater.*, 47 , 1203, 1999.
- [21] R. Manken and S. Wilmans *Computational Materials Science*, 42 , 295, 2008.
- [22] P. Schlosser, H. Louche, D. Favier and L. Orgéas *Strain*, 43 , 260, 2007.