



HAL
open science

Modélisation de l'effet de la plasticité cumulée sur les propriétés de transformation des AMF en NiTi

Thomas Ara, Boris Piotrowski, Céline Bouby, Tarak Ben Zineb, Etienne Patoor

► **To cite this version:**

Thomas Ara, Boris Piotrowski, Céline Bouby, Tarak Ben Zineb, Etienne Patoor. Modélisation de l'effet de la plasticité cumulée sur les propriétés de transformation des AMF en NiTi. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422890

HAL Id: hal-03422890

<https://hal.science/hal-03422890>

Submitted on 9 Nov 2021

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.

Modélisation de l'effet de la plasticité cumulée sur les propriétés de transformation des AMF en NiTi

T. ARA^a, B. PIOTROWSKI^b, C. BOUBY^a, T. BEN ZINEB^a, E. PATOOR^b

a. LEMTA, Nancy-Université, CNRS, 2 rue Jean Lamour, 54500 VANDOEUVRE-LES-NANCY

b. LEM3, Arts et Métiers Paristech, UPVM, CNRS, Île du Saulcy, 57045 METZ

Résumé :

Nous proposons une loi décrivant le comportement des Alliages à Mémoire de Forme (AMF) et intégrant l'effet de la déformation plastique sur les propriétés de transformation. Elle présente quatre variables internes décrivant la déformation inélastique induite par transformation de phase et plasticité. Les évolutions des propriétés de transformation et de la martensite résiduelle en fonction de la plasticité cumulée sont intégrées. Cette loi de comportement a été implémentée dans le code éléments finis Abaqus et exploitée pour le dimensionnement des applications dans le domaine de la connectique.

Abstract :

A thermomechanical model describing Shape Memory Alloys behavior and integrating plastic strain effect on transformation properties is proposed. It presents four internal variables describing inelastic strain induced by phase transformation and plasticity. Transformation properties and retained martensite evolutions are integrated by functions of accumulated plastic strain. This model is implemented on F.E code Abaqus and applied for tightening application design.

Mots clefs : alliage à mémoire de forme, couplage transformation/plasticité, NiTi

1 Introduction

Les alliages à mémoire de forme (AMF) et en particulier ceux en NiTi sont désormais largement exploités pour le développement d'applications dans diverses domaines tel que l'aéronautique, l'automobile ou la biomécanique. Ce développement s'est accéléré ces dernières années grâce à une compréhension accrue du comportement des AMF et l'apparition d'outils numériques de dimensionnement spécifiques. Ces derniers présentent l'avantage d'intégrer des lois de comportement thermomécaniques assez représentatives de l'effet de la déformation inélastique réversible induite par transformation de phase et/ou par réorientation des variantes de martensite [1, 7, 9, 10]. Ces outils ne prennent pas en compte l'évolution des propriétés de transformation lors de l'élaboration et du fonctionnement des applications en AMF NiTi. En effet une déformation plastique peut provoquer une diminution de la déformation de transformation maximale (présence de la martensite piégée), diminution ou augmentation de la contrainte limite de transformation et augmentation de la pente de Clausius-Clapeyron dans le diagramme Contrainte-Température. L'optimisation des performances de ces applications en AMF NiTi nécessite la prise en compte de ces effets au niveau de la loi de comportement thermo-mécanique utilisée pour lors du dimensionnement par éléments finis.

Des modèles de comportement adaptés au AMF NiTi et prenant en compte la présence d'une déformation plastique commencent à émerger [3, 4, 12]. Par contre, aucun de ces modèles n'intègre les effets du couplage fort plasticité-transformation de phase cités ci-dessus et mis en évidence par les travaux expérimentaux réalisés dans [6, 8, 11]. Le modèle développé dans ce papier est une proposition dans cette direction en s'appuyant sur le modèle de Chemisky-Duval et al.[2]. Cette nouvelle formulation considère une déformation inélastique induite par transformation de phase et par plasticité. elle prend

en compte l'évolution des températures de début et de fin de transformation et de la déformation maximale de transformation et de la pente de Clausius-Clapeyron en fonction de la plasticité accumulée. Enfin elle distingue, au niveau de la martensite créée, la part piégée par la plasticité de celle demeurant réversible. Ce modèle a été implanté au niveau du code éléments finis *Abaqus*[®]. Des cas de chargement thermo-mécaniques ont montré sa bonne cohérence. Enfin, il a été exploité pour étudier par éléments finis l'effet de la plasticité dans un système de serrage utilisant une bague en AMF NiTi.

2 Modélisation thermo-mécanique du comportement des AMF

Considérons un Volume Élémentaire Représentatif (VER) de NiTi. La déformation totale E^{tot} de ce VER est issue de plusieurs mécanismes physiques induisant sa décomposition en cinq contributions :

$$E_{ij}^{tot} = E_{ij}^{el} + E_{ij}^{th} + E_{ij}^{tr} + E_{ij}^{tw} + E_{ij}^{pl} \quad (1)$$

où E^{el} désigne la déformation élastique, E^{th} la déformation de dilatation thermique, E^{tr} la déformation de transformation, E^{tw} la déformation d'accommodation inélastique des macles et E^{pl} la déformation plastique. Suivant l'approche développée dans [2], la déformation de transformation s'écrit en fonction de la fraction volumique de martensite f et de la déformation de transformation moyenne $\bar{\varepsilon}_{ij}^{tr}$:

$$E_{ij}^{tr} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij}^{tr} dV = \frac{V_M}{V} \frac{1}{V_M} \int_{V_M} \varepsilon_{ij}^{tr} dV = f \bar{\varepsilon}_{ij}^{tr} \text{ où } V_M : \text{Volume de martensite} \quad (2)$$

De même, la déformation d'accommodation inélastique des macles est donnée par :

$$E_{ij}^{tw} = \frac{V_M^{FA}}{V} \frac{1}{V_M^{FA}} \int_{V_M^{FA}} \varepsilon_{ij}^{tw} dV = f^{FA} \bar{\varepsilon}_{ij}^{tw} \text{ où } V_M^{FA} : \text{Volume de martensite auto-accommodée} \quad (3)$$

où $\bar{\varepsilon}_{ij}^{tw}$ est la déformation moyenne d'accommodation des macles et f^{FA} est la fraction de martensite formée, auto-accommodée.

L'énergie libre de Gibbs est adoptée comme potentiel thermodynamique du système. Initialement proposée par Peultier et al. [7], elle est modifiée par l'ajout d'une énergie plastique, la distinction de deux formes de martensite, l'une piégée par la déformation plastique, de fraction volumique f^P ; l'autre récupérable lors d'une transformation inverse, de fraction volumique f^R , et par la dépendance des paramètres de transformation à la plasticité cumulée. Cette énergie est alors dépendante de deux variables de pilotage T , Σ et de quatre variables internes : f^R la fraction de martensite récupérable, $\bar{\varepsilon}^{tr}$, $\bar{\varepsilon}^{tw}$ et la plasticité cumulée p :

$$\Delta G = -\Delta T S^A + f(\Delta U - T \Delta S) - \Sigma_{ij} E_{ij} + G^{int} + C_v(T - T_0) - T \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (4)$$

où G^{int} correspond à l'énergie élastique stockée lors d'une transformation ou d'une réorientation de variantes :

$$G^{int} = \frac{1}{2V} \int_V \sigma_{ij}(r)(\varepsilon^{tot} - \varepsilon^{th} - \varepsilon^{tr} - \varepsilon^{tw} - \varepsilon^{pl}) dV \quad (5)$$

d'où :

$$\begin{aligned} \Delta G = & \frac{1}{2} \Sigma_{ij} S_{ijkl} \Sigma_{kl} - \Sigma_{ij} \alpha_{ij} \Delta T - \Delta T S^A - \Sigma_{ij} (f^R + f^P) \bar{\varepsilon}_{ij}^T - \Sigma_{ij} f^{FA} \bar{\varepsilon}_{ij}^{tw} + B(T - T_0)(f^R + f^P) \\ & + \frac{1}{2} (f^R + f^P) H_\varepsilon \bar{\varepsilon}_{ij}^T \bar{\varepsilon}_{ij}^T + \frac{1}{2} H_f (f^R + f^P)^2 + \frac{1}{2} f^{FA} H_{tw} \bar{\varepsilon}_{ij}^{tw} \bar{\varepsilon}_{ij}^{tw} + \frac{2(n+1)H_p}{3n} p^{\frac{n+1}{n}} \eta_{ij} \eta_{ij} \quad (6) \end{aligned}$$

Dans cette expression, la direction d'écoulement plastique η est donnée par le déviateur des contraintes σ^D normée par la contrainte équivalente au sens de Von Mises $\sigma_{eq} : \eta_{ij} = 3\sigma_{ij}^D / 2\sigma_{eq}$; les paramètres H_f , H_ε , H_{tw} servent à représenter les différentes interactions (inter-grains, inter et intra variantes de

martensite); B est la pente de Clausius-Clapeyron, S est le tenseur de souplesse et α le tenseur de dilatation thermique. H_p et n décrivent l'écroutissage plastique.

Les forces thermodynamiques associées aux variables internes (transformation, orientation, démasclage, entropique, élastique et plastique), décrivant le système, sont issues de la dérivation de l'énergie libre de Gibbs, introduite dans l'inégalité de Clausius-Duhem.

$$F_{f^R} = -\frac{\partial(\Delta G)}{\partial f^R} = \Sigma_{ij}\bar{\varepsilon}_{ij}^T - B(T - T_0) - H_f(f^R + f^P) - \frac{1}{2}H_\varepsilon\bar{\varepsilon}_{ij}^T\bar{\varepsilon}_{ij}^T \quad (7)$$

$$(f^R + f^P).F_{\bar{\varepsilon}_{ij}^T} = -\frac{\partial(\Delta G)}{\partial \bar{\varepsilon}_{ij}^T} = (f^R + f^P)(\Sigma_{ij} - \delta_{ij}\frac{\Sigma_{kk}}{3} - H_\varepsilon\bar{\varepsilon}_{ij}^T) \quad (8)$$

$$f^{FA}.F_{\bar{\varepsilon}_{ij}^{twin}} = -\frac{\partial(\Delta G)}{\partial \bar{\varepsilon}_{ij}^{twin}} = f^{FA}(\Sigma_{ij}^D - H_{twin}\bar{\varepsilon}_{ij}^{twin}) \quad (9)$$

$$F_T = \Sigma_{ij}\alpha_{ij} + S^A - B(f^R + f^P) \quad (10)$$

$$F_{\Sigma_{ij}} = S_{ijkl}\Sigma_{kl} + \alpha_{ij}\Delta T + (f^R + f^P)\bar{\varepsilon}_{ij}^T + f^{FA}\bar{\varepsilon}_{ij}^{twin} + \varepsilon_{ij}^P \quad (11)$$

$$F_p = -\frac{\partial(\Delta G)}{\partial p} = H_p p^{\frac{1}{n}} + \Sigma_{eq} + \frac{\partial f^P}{\partial p} F_{f^R} \quad (12)$$

Afin de connaître les mécanismes actifs durant un chargement thermo-mécanique, ces forces motrices thermodynamiques sont comparées aux forces critiques, entités thermodynamiques variant suivant le matériau en présence et l'historique du chargement.

La prise en compte de l'effet de la plasticité sur les différents paramètres de transformation est introduite par une dépendance directe de ceux-ci à la plasticité cumulée. En première approximation et en accord avec les constatations expérimentales (figure 1), on considérera que la variation des températures de transformation et des pentes de Clausius-Clapeyron en fonction de p est linéaire. La fraction de martensite piégée a une variation de type tangente hyperbolique afin de représenter deux saturations présentes en cas de faible et extrême déformation plastique.

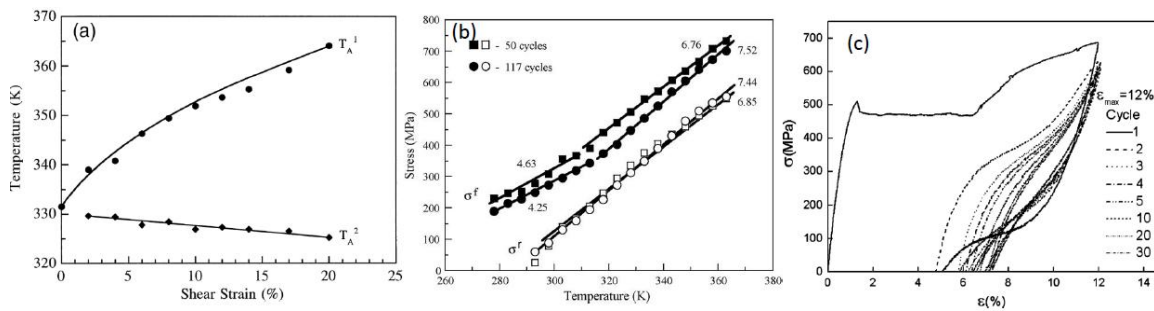


FIGURE 1 – a) Influence de la déformation sur les températures de transformation d'après [7]. b) Dépendance des pentes de Clausius-Clapeyron à la plasticité d'après [9]. c) Réduction de la déformation de transformation par plasticité cyclique d'après [10].

3 Implantation numérique et résultats

Afin de résoudre le système d'équations traduisant le comportement de l'AMF, on adopte un schéma de résolution de type prédiction-correction.

Les informations à l'incrément n permettent d'effectuer une prédiction élastique qui servira à détecter les processus actifs dans le matériau (transformation, orientation, plasticité). A un ensemble de processus actifs donnés, correspond un unique système non linéaire d'équations, constitué des différences entre les forces motrices et les forces critiques résolu de manière itérative par l'algorithme de Newton-Raphson. Une fois que l'algorithme a convergé, les variables définissant le système sont actualisées et les modules tangents mécanique et thermique sont calculés. Le modèle est implanté en C++ via la subroutine UMAT du code de calcul par éléments finis *Abaqus*[®].

Les paramètres matériaux ont été définis par Duval et al.[2], ils sont présentés dans le tableau 1.

$E(MPa)$	ν	$\bar{\varepsilon}_{ij}^{T^{trac}}$	$\bar{\varepsilon}_{ij}^{T^{comp}}$	$b(MPa/^{\circ}C)$	$M_s(^{\circ}C)$	$F_{\varepsilon}(MPa)$
70.000	0.3	0.05	0.05	10	0	160
$A_f(^{\circ}C)$	$H_{\varepsilon}(MPa)$	$H_f(MPa)$	$H_{twin}(MPa)$	$\sigma_{y_0}(MPa)$	$H_p(MPa)$	
30	5	2100	35000	700	350	

TABLE 1 – Valeurs des paramètres du matériau

A présent, nous présentons l'effet de la plasticité sur les deux comportements principaux des AMF : la super-élasticité et l'effet mémoire. Dans un premier temps, on valide la loi de comportement par une simulation sur un unique point d'intégration pour ensuite modéliser une application de connectique tubulaire.

3.1 Super-élasticité

Il s'agit d'un essai de traction à l'état austénitique provoquant une transformation martensitique à la contrainte $\sigma = B(T - M_s)$. Après une contrainte seuil σ_{y_0} , la martensite est plastifiée, modifiant les propriétés de transformation (figure 2).

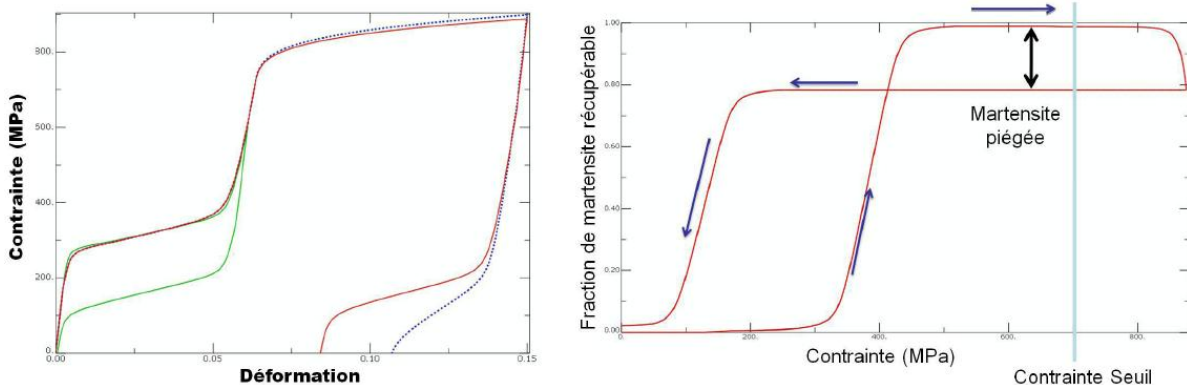


FIGURE 2 – 1) Courbe contrainte-déformation en super-élasticité. Bleu : plasticité + variations paramètres matériaux. Rouge : plasticité sans prise en compte de la variation des paramètres du matériau. Vert : comportement purement élastique de la martensite 2) Courbe contrainte-fraction martensite récupérable pour un chargement super-élastique

On constate qu'après plastification, il y a une réduction de la fraction de martensite récupérable (figure 3), compatible avec les données expérimentales montrant une réduction de la déformation de transformation.

3.2 Effet mémoire de forme

L'effet mémoire de forme est particulièrement intéressant pour l'observation du décalage des températures de transformation (figure 3). La simulation se décompose en quatre étapes : refroidissement à partir de l'état austénitique jusqu'à $M_f - 20^\circ\text{C}$, traction jusqu'à plastification de la martensite puis relâchement, chauffage jusqu'à $A_f + 20^\circ\text{C}$. La figure 3 permet d'illustrer la variation de A_f lors du chargement plastique.

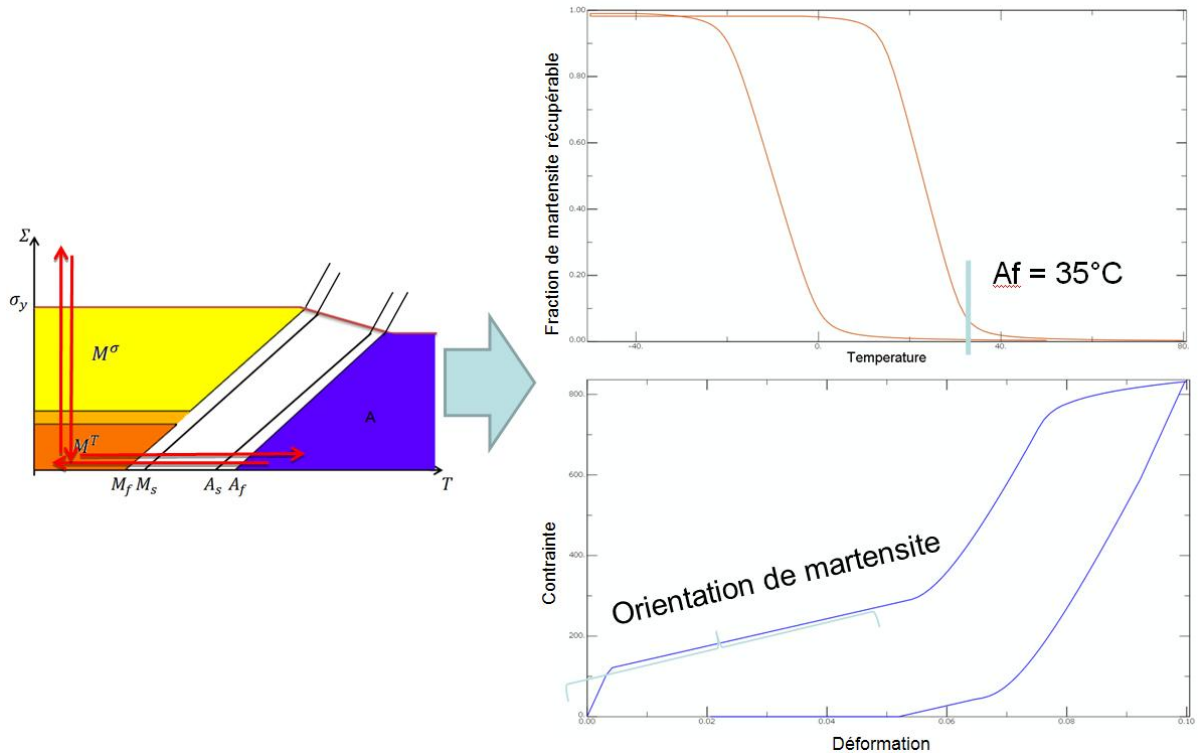


FIGURE 3 – Courbes contrainte-fraction martensite récupérable dans le cas de l'effet mémoire et déformation contrainte à l'état martensitique

La cohérence du modèle vérifiée, le passage au dimensionnement du manchon de serrage permet de valider la capacité de celui-ci à simuler, par éléments finis, l'influence de la plasticité. Cette application utilise l'effet mémoire décrit précédemment. La simulation de l'ouverture montre l'apparition d'un gradient de plasticité induisant lui-même un gradient de propriétés de transformation (figure 5). Ces dernières jouent un rôle important sur la pression de serrage du manchon qui garantit l'étanchéité et le maintien des tubes entre-eux.

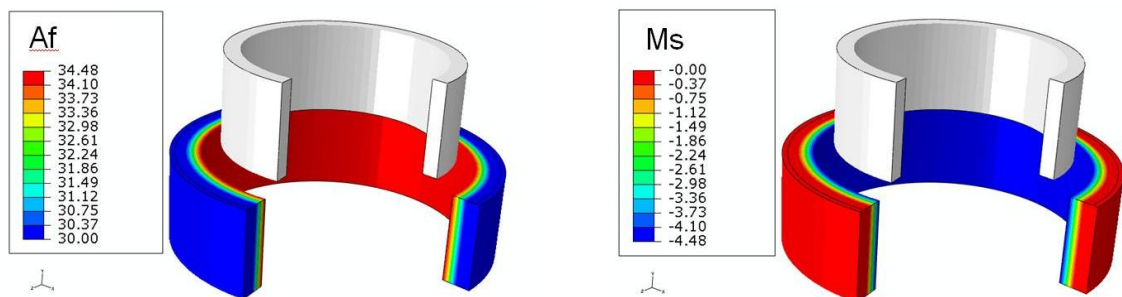


FIGURE 4 – Gradient de température de transformation directe et inverse dans l'épaisseur du manchon

4 Conclusion

Le modèle présenté permet de rendre compte de l'effet de la plasticité pour les AMF de type NiTi. Les résultats présentés prédisent des phénomènes observés expérimentalement par différents auteurs. Néanmoins, plusieurs améliorations sont nécessaires pour obtenir un meilleur rendu quantitatif. Il faut pour cela, trouver des lois d'évolutions de paramètres plus représentatives que les lois linéaires appliquées dans ce cas. D'autre part, pour prendre en compte les différences d'évolution des paramètres de transformation observées lors de la plastification de chacune des phases, il sera nécessaire d'introduire une dépendance de ceux-ci aux phases en présence.

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet de collaboration avec l'entreprise Schlumberger. Les auteurs tiennent à remercier cette dernière pour son soutien financier et tiennent également à remercier Monsieur F. Pauchet, ingénieur de recherche Schlumberger pour les fructueux échanges. L'implantation a été écrite à l'aide du code de calcul Simula+, développé au sein du LEM3, Metz et du LAMAV, Valenciennes

Références

- [1] Auricchio F., Reali A., Stefanelli U. 2007 A three-dimensional model describing stress-induced solid phase transformation with permanent inelasticity *International Journal of Plasticity* **23-2** 207-226.
- [2] Duval A., Chemisky Y., Haboussi M., Ben Zineb T. 2008 Modeling of the martensite transformation and re-orientation in sma under thermomechanical loading. design of finite element adaptative micro-components. *Proceedings of ICOMAT, Santa Fe, USA*
- [3] Hartl D.J, Chatzigeorgiou G., Lagoudas D.C. 2010 Three-dimentional modeling and numerical analysis of rate-dependent irrecoverable deformation in shape memory alloys *International Journal of Plasticity* **26** 1485-1507.
- [4] Jemal F., Bouraoui T., Ben Zineb T., Patoor E., Bradai C. 2009 Modelling of martensitic transformation and plastic slip effects on the thermo-mechanical behaviour of Fe-based shape memory alloys *Mechanics of Materials* **41(7)** 849-856.
- [5] Liu Y, Favier D. 2000 Stabilization of martensite due to shear deformation via variant orientation in polycrystalline NiTi *Acta Materialia* **48** 3489-3499.
- [6] Liu Y., Mahmud A., Kursawe F., Nam T.Y 2008 Effect of pseudoelastic cycling on the Clausius-Clapeyron relation for stress-induced martensitic transformation in NiTi *Journal of alloys and compounds* **449** 82-87.
- [7] Peultier B., Ben Zineb T., Patoor E. 2006 Macroscopic constitutive law of shape memory alloy thermomechanical behavior. Application to structure computation by FEM. *Mechanics of Materials* **38(5-6)** 510-524.
- [8] Piao M., Otsuka K., Miyazaki S., Horikawa H. 1993 Mechanism of the As temperature increase by pre-deformation in thermoelastic alloys *Materials Transactions, JIM*
- [9] Popov P., Lagoudas D.C. 2007 A 3-D constitutive model for shape memory alloys incorporating pseudoelasticity and detwinning of self-accommodated martensite *International Journal of Plasticity* **23(10-11)** 1679-1720.
- [10] Raniecki B., Lexcellent C. 1998 Thermodynamics of isotropic pseudoelasticity in shape memory alloys *European Journal of Mechanics - A* **2** 185-205.
- [11] Wang X., Xu B., Yue Z. 2008 Phase transformation behavior of pseudoelastic NiTi shape memory alloys under large strain *Journal of alloys and compounds* **463** 417-422.
- [12] Zaki W., Zamfir S., Moumni Z. 2009 An extension of the ZM model for shape memory alloys accounting for plastic deformation *Mechanics of Materials* **42** 266-274.