

· COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

FR 9.10 1513

· CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE SACLAY  
Service de Documentation  
F91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

CEA-CONF-10451

M2

MISE EN FORME: ASPECTS DE LA RECHERCHE-DEVELOPPEMENT

MARINI B.- DECOURS J.  
CEA Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay, 91 - Gif-sur-Yvette (FR).  
Dept. de Technologie des Materiaux

Communication présentée à : Symposium on Zirconium New Material for the Chemical Industry

Lyon (FR)  
10-11 Oct 1990

---

## MISE EN FORME: ASPECTS DE LA RECHERCHE-DEVELOPPEMENT

B. MARINI, J. DECOURS  
CEA-CEREM-CEN Saclay

---

### RESUME

La mise en forme du zirconium nécessite l'utilisation de méthodes variées: forgeage, filage, laminage, emboutissage, roulage, pliage, etc. Cette dernière méthode présente la particularité d'être celle retenue comme test de réception des tôles. Il est donc techniquement intéressant d'aborder les problèmes de mise en forme du zirconium par le biais du pliage.

Les principaux paramètres pouvant avoir une influence sur le pliage sont étudiés au moyen d'essais et de simulations numériques. Le retour élastique en fin de pliage et la température optimale de détensionnement sont également étudiés.

#### 1. Etude des principaux paramètres influençant le pliage:

Les principaux paramètres qui ont été étudiés et qui peuvent avoir une influence sur la limite de pliage sont les suivants:

- o la vitesse de déformation
- o l'état de finition de la tôle
- o l'état métallurgique
- o la texture
- o la température de pliage

Après pliage, des relevés dimensionnels, des observations métallographiques ainsi que des mesures de contraintes résiduelles par rayons X sont réalisés sur les éprouvettes, soit après retour élastique, soit après bridage. Ces résultats permettent de déterminer des critères de formage par pliage.

Au cours de ces essais, trois limites d'endommagement du matériau ont pu être mises en évidence :

- o Endommagement par fissuration: une fissure importante apparaît avant la fin de l'essai qui est alors interrompu.
- o Endommagement par microfissuration: l'essai de pliage terminé, on peut relever la présence de microfissures visibles à l'oeil ou par ressuage.
- o Endommagement par apparition de porosité: après pliage, des porosités sont visibles sur les coupes métallographiques des éprouvettes au voisinage de la surface tendue.

Ces limites s'expriment sous forme d'un rapport de pliage critique  $(R/e)_c$  où R est le rayon de l'outil de pliage et e l'épaisseur de la tôle.

Les limites d'endommagement par fissuration et par microfissuration ne sont pas affectées par le sens de prélèvement et la vitesse de déformation (vitesse de descente de l'outil

comprise entre 10 et 100 mm/min) mais dépendent fortement de l'état de finition et de l'état métallurgique du matériau, ainsi que de la température d'essai. A température ambiante, ces deux limites sont inférieures à 5 pour tous les cas étudiés. Si la couche due au grenailage de la tôle est éliminée, la limite (R/e)<sub>c</sub> par microfissuration est réduite à 2.

La limite d'endommagement par porosité dépend du sens de prélèvement. Les éprouvettes prélevées en sens travers présentent des porosités dans la partie en tension pour des rapports de pliage plus grands que celles prélevées en sens long.

Les essais de pliage en température montrent que ces limites sont nettement diminuées à partir de 200°C. A 500°C, le rapport de pliage ne conduisant à aucun endommagement du matériau est de l'ordre de 0,5.

## 2. Modélisation des essais de pliage:

La modélisation des essais de pliage est réalisée en plasticité incrémentale et en déformation plane. De plus, on pose que la contrainte normale à la fibre neutre est nulle partout. Ne disposant pas des données permettant l'identification d'un critère de plasticité anisotrope, on utilise le critère de plasticité de Von Mises.

En fin de calcul, on dispose des distributions dans l'épaisseur des contraintes et des déformations en fin de pliage et après retour élastique, ainsi que de l'angle de retour.

L'état d'érouissage de la surface de la tôle est pris en compte en introduisant localement les contraintes résiduelles et un décalage de la courbe de traction rationnelle, qui ont été déterminés à partir de mesures par rayons X.

Pour expliciter le rôle des paramètres influant sur les limites de pliage, un critère d'endommagement est introduit. La ductilité du zirconium, comme celle des matériaux métalliques en général, est sensible à la triaxialité des contraintes. Par analogie, nous proposons donc de définir un paramètre d'endommagement D sous une forme simple :

$$D = \varepsilon_{eq} \cdot \exp\left(\frac{3}{2} \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right)$$

où  $\varepsilon_{eq}$  est la déformation équivalente locale,  
 $\sigma_m$  est la contrainte hydrostatique locale,  
 $\sigma_{eq}$  est la contrainte équivalente de Von Mises locale  
 $\sigma_m/\sigma_{eq}$  est le taux de triaxialité local des contraintes.

Dans l'attente d'une détermination plus précise, la valeur critique D<sub>c</sub> de ce paramètre, peut être estimée par les mesures des déformations à rupture des essais de tractions.

Les simulations à partir de ce modèle ont été faites pour les essais de pliage à température ambiante pour trois états de finition (brut de grenailage, usiné, et usiné puis décapé) et pour les différents sens de prélèvement.

Les principaux résultats sont les suivants:

o L'endommagement est nul sur la fibre neutre et maximal au voisinage de la fibre la plus tendue.

o Le taux de triaxialité des contraintes est constant dans la plus grande partie de la section de l'éprouvette. La variable D est donc distribuée approximativement comme la déformation équivalente.

o Les valeurs critiques du rapport de pliage sont correctement prédites par ce modèle.

o Le fait que le sens de prélèvement a peu d'effet sur  $(R/e)_c$  est expliqué car la valeur maximale du paramètre d'endommagement  $D$  augmente rapidement en fonction du rapport de pliage quand celui-ci est inférieur à 3 environ. En effet, dans ces conditions, une variation notable de  $D_c$  (c'est-à-dire de la ductilité) conduit à une faible variation du rapport critique de pliage.

o L'effet de l'état de finition peut être analysé: la valeur maximale du paramètre d'endommagement augmente fortement lorsque l'épaisseur de cette couche s'accroît. L'intensité des déformations et des contraintes résiduelles dues au grenailage sont donc à l'origine de la réduction du rapport  $(R/e)_c$  et non pas la microgéométrie de la surface de la tôle. Ce résultat est en accord avec les observations expérimentales.

**3. Retour élastique, contraintes résiduelles et température de détensionnement:**

Le retour élastique après pliage, les contraintes résiduelles et la température de détensionnement sont des facteurs industriellement importants: le premier à cause de ses conséquences sur la précision des pièces formées, le second à cause de ses conséquences sur la tenue en fatigue par exemple et le troisième à cause de ses conséquences sur le comportement du matériau et la stabilité dimensionnelle de la structure. Ces trois facteurs sont maintenant passés en revue :

En fin de pliage, lorsque l'effort est relâché, l'éprouvette s'ouvre d'un angle croissant avec le rapport de pliage et de façon proportionnelle d'après le modèle. Cet angle de retour élastique, peu différent suivant les états de finition, diminue avec la température comme le rapport de pliage critique. On voit donc ici un double intérêt à réaliser le formage du zirconium en température.

Le pliage induit des contraintes résiduelles dont l'intensité au voisinage de la surface en tension dépend de l'état de finition de la tôle. L'état de compression maximale de la surface est obtenu pour les éprouvettes usinées puis décapées. Le grenailage des tôles, qui induit des contraintes résiduelles de compression importantes, conduit après pliage à des contraintes en surface très faibles. Ce comportement déterminé par mesures par rayons X est également vérifié par le modèle.

Le maintien à différentes températures d'éprouvettes bridées après pliage montre que l'angle de retour élastique décroît avec la température du maintien. En se donnant comme critère de détensionnement cet angle, les résultats doivent permettre d'optimiser le choix de la température de détensionnement: par exemple un détensionnement complet (c'est-à-dire un angle de retour élastique nul) est obtenu pour une température de 500°C et une durée de 40 minutes.

