

# Transformation de la Matière

Unités d'enseignement disciplinaire  
Centre d'Aix en Provence

Recueil d'exercices  
Fluage – Creep

L. Barrallier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ENSAM Aix en Provence

October 22, 2014

1 Creep - basic

2 Creep - problem

The following creep data (table 1) were taken on an aluminum alloy at and a constant stress of 2.75 MPa (400 psi). Plot the data as strain versus time, then determine the steady-state or minimum creep rate. Note: The initial and instantaneous strain is not included.

Time (min)	Strain	Time (min)	Strain
0	0	18	0.82
2	0.22	20	0.88
4	0.34	22	0.95
6	0.41	24	1.03
8	0.48	26	1.12
10	0.55	28	1.22
12	0.62	30	1.36
14	0.68	32	1.53
16	0.75	34	1.77

Table: Creep data for an aluminium alloy.

- 1 A specimen 1015 mm (40 in.) long of a low carbon–nickel alloy (figure) is to be exposed to a tensile stress of 70 MPa (10,000 psi) at 437°C. Determine its elongation after 10000 h. Assume that the total of both instantaneous and primary creep elongations is 1.3 mm (0.05 in.).
- 2 From equation 1, if the logarithm of  $\dot{\epsilon}$  is plotted versus the logarithm of  $\sigma$  then a straight line should result, the slope of which is the stress exponent  $n$ . Using figure, determine the value of  $n$  for the low carbon–nickel alloy at each of the three temperatures.
- 3 Estimate the activation energy for creep (i.e.,  $\Delta H$  in equation 2) for the low carbon–nickel alloy having the steady-state creep behavior shown in figure. Use data taken at a stress level of 55 MPa (8000 psi) and temperatures of 427°C and 538°C. Assume that the stress exponent  $n$  is independent of temperature.
- 4 Estimate  $\dot{\epsilon}$  at 649°C (922 K).

$$\dot{\epsilon} = K_1 \sigma^n \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = K_2 \sigma^n \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (2)$$

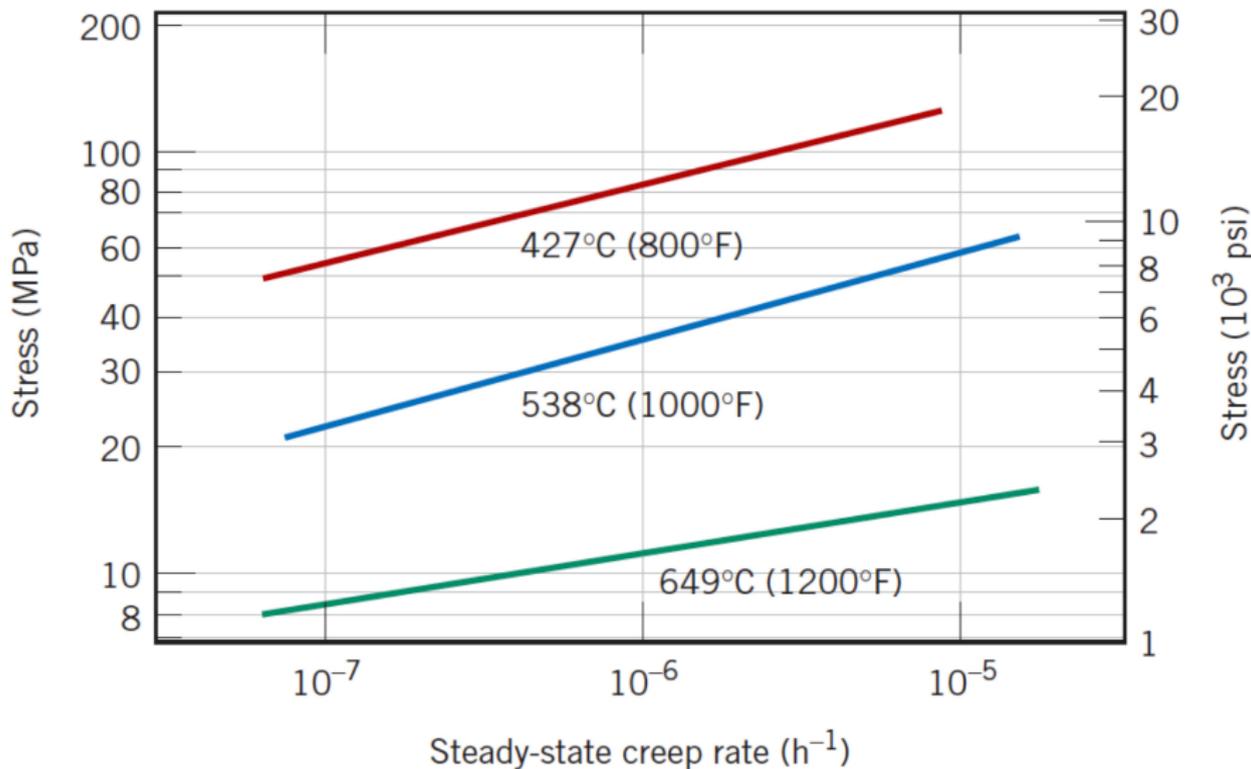


Figure: Creep curve of low carbon-nickel alloy.

Dans une unité de production d'une usine chimique, un tube cylindrique en acier inoxydable à 15% de chrome est soumis à une pression relative interne  $\Delta p = 60$  bars. Ce tube doit pouvoir supporter cette pression à une température de  $510^{\circ}\text{C}$  pendant 10 ans. Le concepteur a prévu un tube de diamètre intérieur  $\Phi = 40$  mm et d'épaisseur  $e = 2$  mm. La fiche technique de l'alliage, fournie par le fabricant, comporte les données du tableau 2.

Température ( $^{\circ}\text{C}$ )	618	640	660	683	707
Vitesse de fluage stationnaire ( $\text{s}^{-1}$ ) sous une contrainte de 200 MPa	$10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$7,7 \cdot 10^{-7}$	$20 \cdot 10^{-7}$

Table: Données sur le fluage de l'acier inoxydable.

On donne la déformation à rupture  $\epsilon_R = 0,01$ . Pour cette gamme de contraintes et de températures, on admet que la loi de fluage

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = A\sigma^5 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

représente correctement le comportement de l'alliage ( $R=8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ ).

- 1 Déterminer les valeurs et les unités des constantes  $A$  et à partir des données de la fiche technique. En déduire la température de fusion  $T_f$  (en  $^{\circ}\text{C}$ ) sachant que pour ce type d'alliage  $\frac{Q}{R}=15,5$ .

- 2 Déterminer, en fonction de  $\Phi$ ,  $e$  et  $p$ , la valeur de la contrainte majeure ?  
régnant dans la paroi du tube sous pression. Calculer sa valeur.
- 3 En déduire la déformation ? du tube au bout de 10 années de fonctionnement.  
Commenter le niveau de sécurité de cette conception.
- 4 Estimer, en années, la durée de vie de ce tube. Justifier pourquoi cette estimation  
est une estimation par excès.
- 5 Dans le cas où il y aurait une fissuration du tube, décrivez la forme et  
l'orientation de la fissure.
- 6 Décrire le faciès de rupture.  
Ce type de tuyau peut être également soumis à des pressions variables dans le  
temps ( $\Delta p_{\min} = \frac{1}{10} \Delta p_{\max}$  et  $\Delta p_{\max} = 60$  bars) et ceci à la température de  
100°C.
- 7 Le dimensionnement du tube devra-t-il se faire au fluage ? Pourquoi ?
- 8 Que proposez-vous comme méthodologie pour effectuer ce dimensionnement  
sachant que, pour des raisons de maintenance et de coût, aucun contrôle non  
destructif sera mis en place lors de son exploitation.
- 9 Qu'elles sont les données nécessaires à acquérir pour effectuer ce  
dimensionnement ?

Les aubes de turbine à gaz des centrales thermiques de production d'électricité ou de turbopropulseurs d'avion sont soumises à un environnement agressif et à des températures élevées. Elles sont protégées par un revêtement de céramique inerte chimiquement et qui joue le rôle de barrière thermique. La durée de vie de ces aubes est déterminée par le nombre d'arrêts et de démarrages de la centrale plus que par le nombre d'heures de fonctionnement. Les rampes de puissance lors de pics de consommation sont aussi très dommageables. L'endommagement prépondérant est dû à la fatigue thermo-mécanique de l'aube, qu'on se propose d'étudier ici. On assimile la forme de l'aube à un parallépipède rectangle de largeur 20 mm et de hauteur 150 mm recouvert d'une couche de revêtement d'épaisseur régulière 7 mm. On se propose de travailler en 1D.

Le matériau de l'aube est un superalliage à base nickel IN738, dont la loi de comportement présente un écrouissage isotrope linéaire  $R = C.\epsilon_p$  et dont les propriétés sont les suivantes :

- Module de Young  $E1 = 180 \text{ GPa}$
- Limite d'élasticité  $\sigma_y = 350 \text{ MPa}$
- Constante d'écrouissage  $C=15 \text{ GPa}$
- Coefficient de dilatation  $\alpha_1=13.10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Le revêtement est une céramique frittée élastique dont les propriétés sont les suivantes :

- Module de Young  $E2 = 250 \text{ GPa}$
- Coefficient de dilatation  $\alpha_2=5.10^{-6} \text{ K}^{-1}$

On suppose que le revêtement adhère parfaitement à l'aube. La température de fonctionnement de l'aube revêtue est de  $600^\circ\text{C}$  et la température ambiante  $20^\circ\text{C}$ . On suppose, pour simplifier, que ces propriétés ne dépendent pas de la température. Cependant, on tiendra quand même compte du fait que la limite d'élasticité diminue avec la température en considérant que le matériau reste élastique lors de son refroidissement.

- Proposez un modèle rhéologique pour l'aube revêtue. Ecrire les équations d'équilibre et de compatibilité des déformations.
- Calculez la température à partir de laquelle l'IN738 entre en plasticité.
- Calculez la déformation de l'aube revêtue lorsque  $\Delta\theta=580^\circ\text{C}$ . Discutez des jeux à prévoir entre les aubes et le carter.

- Après refroidissement de l'aube revêtue, calculez les valeurs des contraintes et des déformations résiduelles dans l'aube et dans le revêtement.
- Calculez la déformation permanente de l'aube revêtue.
- Comment évolue le jeu entre le carter et les aubes au cours des cycles marche-arrêt ? quel paramètre matériau contrôle son évolution ?

A 600°C, le métal est viscoplastique et suit une loi de Norton sans seuil :

$$\frac{d\epsilon_v}{dt} = \left( \frac{\sigma}{K} \right)^n$$

avec,  $K=30$  GPa et  $n=4$ .

- Calculez l'évolution des contraintes en fonction du temps lors d'un essai de relaxation conduit à 600°C, à partir d'une contrainte de 359 MPa. Sachant que la mise en température de la turbine dure environ 30 minutes, justifier les hypothèses choisies pour la montée en température.
- Calculez l'évolution des contraintes lors d'un maintien de la turbine à 600°C. Comparez les deux résultats.
- Calculez les contraintes et les déformations dans l'aube et le revêtement après 10 jours de fonctionnement sans interruption.
- Calculez la déformation de l'aube revêtue et l'évolution du jeu entre l'aube et le carter après 10 jours de fonctionnement.
- Discutez le nouvel état de contraintes et de déformations résiduelles après refroidissement. Pouvez vous dire si le jeu tend vers un état stabilisé ou s'il continue d'augmenter au cours des cycles suivants ?

- Après refroidissement de l'aube revêtue, calculez les valeurs des contraintes et des déformations résiduelles dans l'aube et dans le revêtement.
- Calculez la déformation permanente de l'aube revêtue.
- Comment évolue le jeu entre le carter et les aubes au cours des cycles marche-arrêt ? quel paramètre matériau contrôle son évolution ?