

Série n°11 – 8 mai 2025

Fatigue – Thermique - Diffusion

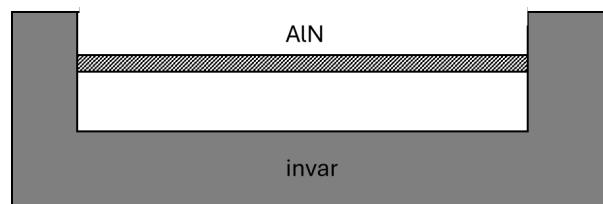
Exercice 1 :

Répondez par vrai ou faux aux questions suivantes :

- | | Vrai | Faux |
|---|--------------------------|--------------------------|
| a. Dans la fatigue oligocyclique, le faible nombre de cycles pour atteindre la rupture du matériau est dû au fait que la contrainte variable dépasse sa limite élastique. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b. Lorsque la contrainte d'un test de fatigue d'un métal est dans la phase de compression, elle a tendance à refermer la microfissure sans la faire avancer. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c. La fatigue d'origine thermique peut avoir lieu dans un seul matériau homogène, si la température est inhomogène et varie au cours du temps. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d. La distance caractéristique de la diffusion thermique dans un matériau solide est proportionnelle à la racine carrée du temps de diffusion multiplié par la diffusivité thermique. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e. Le flux thermique lié à la diffusion de la chaleur dans un matériau a le même sens que le gradient thermique. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f. De manière inverse aux métaux qui sont de bons conducteurs de l'électricité et de la chaleur, le diamant est un isolant électrique et un mauvais conducteur de la chaleur. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| g. La diffusion d'éléments chimiques dans un matériau est due à des sauts aléatoires des atomes. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| h. Les atomes situés dans des sites intersticiels d'un réseau cristallin diffusent plus lentement que des atomes substitutionnels. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| i. Puisque les atomes en substitution dans un réseau cristallin ont besoin de lacunes voisines pour diffuser, les lacunes diffusent elles aussi. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Exercice 2 : Fatigue thermique

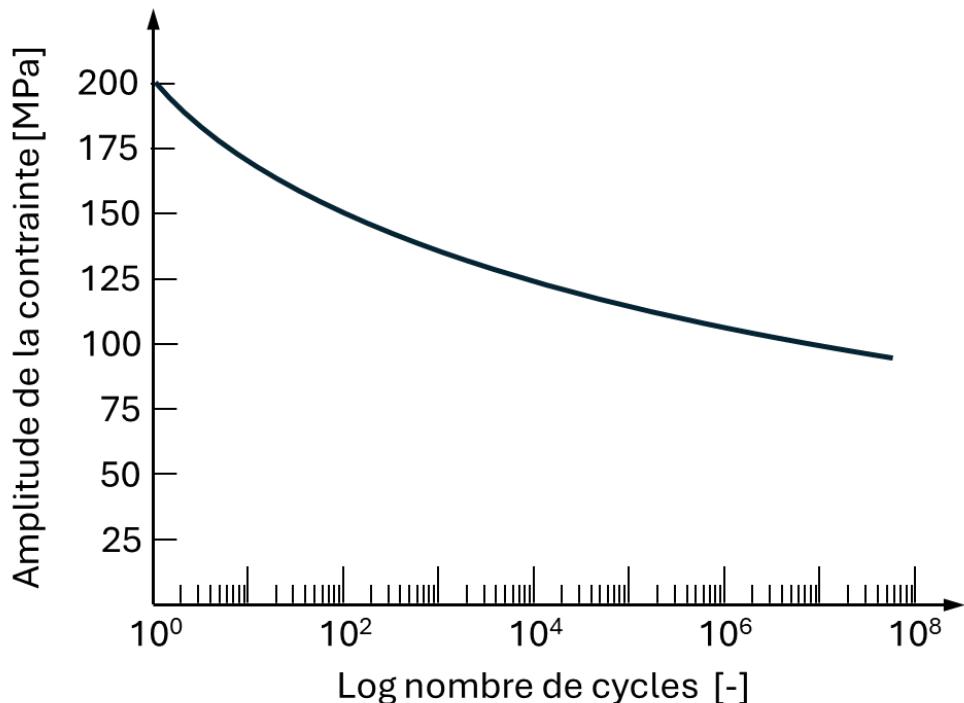
Afin de tester le comportement à la fatigue thermique d'une céramique AlN destinée à l'aérospatiale, on fixe une tige de cette céramique à l'intérieur d'une pièce en invar en forme de « U ». Le coefficient



d'expansion thermique de l'invar est nul alors que celui de la céramique vaut : $\alpha_{AIN} = 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Le module élastique de AlN vaut $E_{AIN} = 300 \text{ GPa}$.

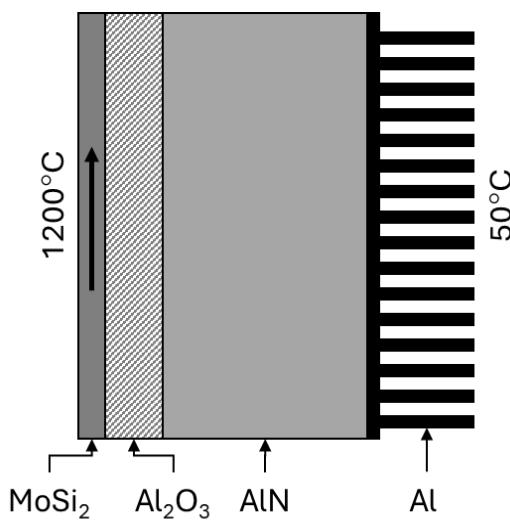
Le tout subit alors 10'000 cycles thermiques $\pm 80^\circ\text{C}$. Puis, pour tester encore plus sévèrement la céramique, on décide de faire des cycles $\pm 100^\circ\text{C}$. La courbe de fatigue de cette céramique est donnée ci-dessous. Les dimensions du « U » en invar sont telles que l'on négligera sa déformation devant celle de AlN.

- Quelles sont les variations de contraintes dans la céramique lors des deux cycles de températures ?
- Comment déduisez-vous de cette courbe la contrainte maximum à la rupture de cette céramique fragile ? Et la résistance à la fatigue (endurance) ?
- Représentez dans ce diagramme le premier cycle de température.
- Après avoir subi le premier cycle, combien de cycles le matériau pourra-t-il tenir avant de rompre lors du deuxième cycle ?
- Que se serait-il passé si le « U » en invar était remplacé par : (i) un alliage de tungstène dont le coefficient de dilatation thermique est le même que AlN ; (ii) un acier dont le coefficient de dilatation thermique vaut $\alpha_{acier} = 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.



Exercice 3 : Diffusion thermique

Un courant électrique circule dans un corps de chauffe en MoSi_2 , éllevant sa température à $1'200^\circ\text{C}$. Le corps de chauffe est disposé directement sur une céramique isolante d'alumine Al_2O_3 , elle-même en contact direct avec un couche de nitrate d'aluminium AlN. Ce dernier



matériau, isolant électrique mais bon conducteur de la chaleur, est refroidi par un radiateur en aluminium, permettant d'évacuer la chaleur par convection de l'air.

L'épaisseur du nitrure d'aluminium est de 1 cm et on suppose que sa température en contact avec le radiateur est de 50°C. Les caractéristiques de ces céramiques isolantes sont :

$$\text{Al}_2\text{O}_3 : k_1 = 25 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}, \rho_1 = 4 \text{ g/cm}^3, c_{p,1} = 900 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}, T_{max,1} = 1'500^\circ\text{C}$$

$$\text{AlN} : k_2 = 160 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}, \rho_2 = 3.3 \text{ g/cm}^3, c_{p,2} = 750 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}, T_{max,2} = 800^\circ\text{C}$$

- Sur la base d'une continuité des flux, en régime stationnaire, représentez graphiquement la répartition de température dans l'alumine et le nitrure d'aluminium.
- Déterminez la température de l'interface T^* entre l'alumine et le nitrure d'aluminium en fonction de l'épaisseur de la couche d'alumine.
- Quelle épaisseur d'alumine minimum faut-il mettre pour que la température à l'interface ne dépasse pas la température maximum d'utilisation de AlN ?
- En partant du dispositif sans courant (donc à température ambiante) et une épaisseur d'alumine de 1 mm, quel est le temps caractéristique pour que la température d'interface soit notablement influencée ?
- En partant de l'état stationnaire lors du fonctionnement, le radiateur en aluminium est soudainement enlevé. Quel est le temps caractéristique pour que la température d'interface soit notablement influencée ?

Exercice 4 : Dopage du silicium avec du phosphore

On souhaite doper un wafer de silicium avec du phosphore. Après une recherche bibliographique*, vous avez trouvé ce diagramme donnant la diffusivité de cet élément en fonction de la température.

- Pourquoi adopter une telle représentation ?
- A partir de ce diagramme, quels sont le coefficient pré-exponentiel et l'énergie d'activation apparaissant dans la loi exprimant le coefficient de diffusion en fonction de la température ?
- Votre wafer étant placé dans un four à 1000°C, quel est le coefficient de diffusion du phosphore à cette température ?
- Vous aimeriez diffuser le phosphore sur une distance caractéristique de 0.1 µm. Combien de temps devez-vous laisser le wafer dans le four à 1000°C ?

- e. Quels seront les différences de profil de phosphore après diffusion si l'on utilise :
- (i) Un pré-dépôt avant diffusion sur le silicium d'une très fine couche de phosphore ;
 - (ii) Une diffusion à partir d'un environnement gazeux de phospine (PH_3) ?

