

Analyse linéaire des contraintes résiduelles d'un disque en matériau P-FGM

M. Abualnour^{1,2}, Kh. Soltani²

¹Universitaire de Mascara, Algérie

² Université de Sidi Bel Abbes, Algérie

Résumé – L'étude sur l'analyse linéaire des contraintes résiduelles pour les matériaux à gradients de propriétés, dites FGM est l'une des sujets les plus importants en génie et sciences des matériaux grâce à leurs utilisations dans les plus importants secteurs d'industrie (réacteurs nucléaires, réacteurs de fusion, navettes spatiales et le génie civil), la différence des propriétés thermiques des plis successifs et la fabrication des pièces à haute température de traitement vers la température ambiante fait naître des contraintes résiduelles à leurs interfaces. L'objectif de ce thème est de déterminer les contraintes résiduelles dues aux sollicitations mécaniques et thermiques des structures en matériaux fonctionnellement gradués, en vue d'optimiser leur valeur en fonction des propriétés du matériau suivant la fonction de loi de puissance (P-FGM).

Mots clés: analyse, contraintes résiduelles, disque, multicouches, FGM

I. Introduction

La modification des propriétés d'un matériau en fonction de variation des paramètres extérieures d'un environnement changeant, est possible, pour cela on a besoin d'un matériau qui a des propriétés structurelles ou fonctionnelles présentant une adaptabilité à ce dernier. Pour des applications structurales à haute température, des matériaux avancés sont nécessaires pour avoir la force à cette température, à la résistance au fluage, à la dureté proportionnée et à la résistance de choc thermique. Tandis que la céramique possède la faible densité, la bonne force à un environnement agressif à haute température et la résistance au fluage, mais leur ténacité à la rupture et la résistance aux chocs thermiques sont pauvres, ce que limiter leur utilisation dans les applications exigeantes. Des matériaux métalliques, d'autre part possèdent de haute ténacité et une excellente résistance au choc thermique tandis que se caractérisent par faiblesse de leurs effectifs liés à des propriétés à haute température généralement de les rendre peu attrayants. Pour combiner les avantages de ces deux matériaux [1], [2], pour satisfaire les besoins en matériaux dans beaucoup d'applications, en rejoindre la céramique avec le métal. Toutes fois les contraintes thermiques résiduelles résultant de refroidissement après un traitement à haute température et les problèmes dus à la mauvaise compatibilité chimique sont les obstacles à l'usage largement répandu en association de la céramique au métal. Le problème commun a été la grande différence dans les caractéristiques de la dilatation thermique de la céramique et des métaux qui sont d'intérêt pour les applications structurales [3]. L'adhésion de nombreuses combinaisons céramique-métal provoque des contraintes qui dépassent la résistance à la rupture de la céramique surtout dans les régions proches au surface ce qui conduit à une fissuration de la céramique ou les joints ayant une faible force. Les matériaux à gradient de propriété (FGM) offrent la solution au problème de contrainte thermique car ce système compose d'un changement progressif dans les fractions de volume des constituantes d'un endroit à l'autre dans un composant. Pour des applications telle que système de protection thermique, FGM sont en cours d'élaboration afin de réduire au minimum les contraintes thermiques et de choc thermique qui mène habituellement à la rupture de la céramique.

II. Principe de choix des constituants

Dans cette étude, on a employé un modèle unidimensionnel pour trouver les contraintes résiduelles dans système de FGM, qui se constitue en deux composants tel que le métal et la céramique. Cette combinaison a été choisie pour deux raisons essentielles ; l'efficacité de la gradation en réduisant au minimum les contraintes résiduelles entre le Al_2O_3 et le Ni peut mieux être visualisées les résultats puisque leurs coefficients de dilatation thermique sont sensiblement

différents. D'autre part, Al_2O_3 ne réagit pas avec Ni pour obtenir des produits de réaction indésirable qui posent des problèmes dans la fabrication de FGM. L'objectif de cette étude est l'analyse linéaire des contraintes résiduelles pour les matériaux à gradients de propriétés. Il s'agit d'évaluer les contraintes résiduelles, et de voir leur comportement en fonction des propriétés du matériau FGM.

III. Gradient des Propriétés matérielles des disques FGM

Considérons un disque annulaire, comme montré dans la figure 1 de coordonnées r et θ définissant le plan du disque, l'axe des z avec origine au milieu de la surface du disque est suivant la direction de l'épaisseur qui égale à $2t$. Le disque est entièrement en céramique (Al_2O_3) à la surface inférieure et changera à tout métal (Ni) à la surface supérieure. Le matériau dans la région intermédiaire se compose de différentes proportions d' Al_2O_3 et Ni. Les fractions de volume des deux phases varient dans la direction z , selon une forme fonctionnelle donnée. Dont les propriétés matériels, module de Young et le coefficient de Poisson, de la surface supérieure et inférieure sont prédéterminés pour satisfaire les demandes d'exécution. Cependant, le module de Young et le coefficient de Poisson du disque changent de façon continue seulement dans la direction de l'épaisseur (axe z) c'est-à-dire, $E = E(z)$, $\nu = \nu(z)$. Le but principal est l'analyse linéaire des contraintes résiduelles pour les matériaux à gradients de propriétés en (P-FGM).

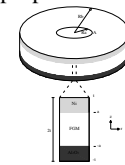


Figure 1. Schéma d'un système de matériau à gradient de propriété (FGM).

Le calcul du module d'élasticité de chacun des constituants en fonction de la température est considéré comme varier selon [4], [5]

$$G(T) = G_0 + \left[1 + \frac{(T-300)}{T_m} \theta \right] \quad \text{Avec } \theta = \frac{T_m}{G_0} \frac{dG}{dT} \quad (1)$$

$$E(T) = 2G(T)(1 + \nu) \quad (2)$$

Dans lesquels $G(T)$, G_0 , T_m , θ et ν sont le module de cisaillement à la température T , module de cisaillement à 300 K, la température de fusion, le module qui dépend de la température, et le coefficient de Poisson, respectivement.

Le coefficient d'expansion thermique qui dépend de la température peut être exprimé par [6]

$$\alpha(T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 \quad (3)$$

Dans lesquels a_0 , a_1 , et a_2 des constantes. Les paramètres indépendants de la température et les valeurs des constantes dans les équations (1) et (3) sont données dans le tableau 3.1 indiqué ci-après. Dans les calculs indépendants de la température, les valeurs de coefficients de dilatation thermique sont linéarisées de 300 à 1373 K et les valeurs du module d'élasticité à la température ambiante ont été utilisées.

Table 1. Valeurs des constants utilisés dans les calculs des contraintes thermiques résiduelles [5], [6].

| Les Constants | Al ₂ O ₃ | Ni |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| α (T indépendant) | 8×10^{-6} | 17×10^{-6} |
| G_0 (MPa) | 1.55×10^5 | 7.89×10^4 |
| T_m (K) | 2320 | 1726 |
| θ | -0.35 | -0.64 |
| ν | 0.22 | 0.3 |
| a_0 | 6.3×10^{-6} | 1.5×10^{-5} |
| a_1 | 2.3×10^{-9} | 3.4×10^{-9} |
| a_2 | 5.1×10^{-13} | 5.8×10^{-12} |

IV. Les propriétés matérielles du disque P-FGM

On assume que la fraction de volume du P-FGM suit une fonction de loi de puissance :

$$V_c(z) = 1 \quad \text{pour} \quad -t \leq z \leq -a \quad (4a)$$

$$V_c(z) = \left(\frac{a-z}{2a}\right)^n \quad \text{pour} \quad -a \leq z \leq a \quad (4b)$$

$$V_c(z) = 0 \quad \text{pour} \quad a \leq z \leq t \quad (4c)$$

Où n est un paramètre du matériau, V_c est la fraction de volume d'Al₂O₃. z est la coordonnée dans la direction de l'épaisseur.

Une fois que la fraction de volume local a été définie, les propriétés matérielles de la plaque P-FGM peuvent être déterminées par la loi de mélange [7]:

$$E(z) = V_c(z)E_c + [1 - V_c(z)]E_m \quad (5a)$$

$$\text{Et} \quad \alpha(z) = V_c(z)\alpha_c + [1 - V_c(z)]\alpha_m \quad (5b)$$

Où E_m et E_c sont respectivement les modules de Young de la surface supérieure (Ni) et de la surface inférieure (Al₂O₃) du disque FGM.

V. Modèle de contrainte thermique

Les contraintes résiduelles sont habituellement définies comme celles existants dans une pièce au repos, en absence de chargement appliqué (des contraintes internes auto-équilibrantes qui existent dans un matériau soumis à aucune force extérieure). Les contraintes résiduelles sont liées à des déformations créées par les incompatibilités entre les grains, ou bien la grande différence entre le coefficient de dilatation thermique dans le cas de l'assemblage de deux matériaux différents [3], [8]. Elles peuvent être générées lors d'un processus de fabrication, généralement à haute température pour les matériaux FGM puis un refroidissement à température ambiante, ou par une sollicitation mécanique, thermique ou chimique, etc. les contraintes résiduelles ont une grande influence sur les comportements de matériau et leur présence peut entraîner la concentration de contrainte qui se superpose sur le chargement extérieur. Elles influencent alors la résistance, la ductilité, le fluage et la ténacité du matériau.

Les contraintes résiduelles après refroidissement ou de chauffage de ce système de FGM comportent deux principales contributions, un résultant de la contrainte d'équilibre due à la contraction ou dilatation et d'autres qui vient du moment d'équilibre en raison de la distribution des contraintes asymétriques [8]. Cette dernière résulte de l'asymétrie des variations dans la proportion des constituants et par conséquent les caractéristiques d'élasticité et de la dilatation thermique, à travers l'épaisseur. Toutes ces contraintes peuvent être déterminées de la façon suivante : si par exemple, le disque de FGM est considéré comme à refroidir vers le bas après traitement à haute température, les couches riches en métal en haut contractent plus que les couches riches en céramique en bas du disque. Si le disque est limité dans la direction r à deux endroits, A et B (figure 1) et, en outre, si le plan de flexion est empêché, les contraintes opposant à ces restrictions se développent dans le disque. Les contraintes de traction $\sigma_r(z)$, résultant de restriction seulement, les contractions dans la direction r sont données par :

$$\sigma_r(z) = E(z)\alpha(z)\Delta T \quad (6)$$

Où $\Delta T = T_p - 300$ (K). T_p est la température à laquelle le disque de FGM est fabriqué, par exemple, à haute pression ou à température

de frittage. On peut éliminer la contrainte si une force de compression statiquement équivalente F est superposée aux contraintes de traction. La grandeur de cette force est donnée par :

$$F = - \int_{-t}^t E(z)\alpha(z)\Delta T dz \quad (7)$$

Les contraintes de compression $\sigma_c(z)$, produits par cette force varient dans la direction z due à la variation du module d'élasticité et sont définies comme suit :

$$\sigma_c(z) = -E(z) \frac{\int_{-t}^t E(z)\alpha(z)\Delta T dz}{\int_{-t}^t E(z) dz} \quad (8)$$

Les contraintes résiduelles, $\sigma_t(z)$ dans le disque sont données par la superposition des contraintes dans les équations (6) et (8). Ils sont définies par :

$$\sigma_t(z) = E(z)\alpha(z)l - \frac{\int_{-t}^t E(z)\alpha(z)\Delta T dz}{\int_{-t}^t E(z) dz} \quad (9)$$

Il est à noter que ces contraintes ne sont applicables que lorsque le disque reste droit à cause de la contrainte sur la flexion. En l'absence d'une telle contrainte, la flexion du disque (dans le cas présent, vers le haut) résulte de l'asymétrie dans le degré de contraction à travers l'épaisseur du disque. Les contraintes effectives dans un disque de FGM sont les contraintes à l'équilibre après la suppression de la contrainte de flexion. Lorsque la flexion est empêchée, le moment net généré par les contraintes asymétriques de contraction aurait été annulé par le moment externe introduit par la contrainte. Ce moment d'équilibre est exprimée par :

$$-M_t + \int_{-t}^t \sigma_t(z)z dz = 0 \quad (10)$$

Dans lequel M_t est le moment égal et opposé au moment s 'est produit par des contraintes dans l'équation (9). Sur la suppression de la contrainte de flexion, les contraintes supplémentaires de la flexion de la plaque sont ensuite données par [9] :

$$\text{Avec} \quad \sigma_b(z) = M_t E(z) D \quad (11)$$

$$D = \frac{z \int_{-t}^t E(z) dz - \int_{-t}^t E(z) z dz}{\int_{-t}^t E(z) dz \int_{-t}^t E(z) z^2 dz - \left[\int_{-t}^t E(z) z dz \right]^2} \quad (12)$$

La contrainte résiduelle totale dans le disque FGM en l'absence de toute contrainte est donnée par l'ajout de contraintes dans l'équation (11) à ceux qui sont dans l'équation (9) et en utilisant l'équation (10).

$$\sigma_{res}(z) = E(z) \left[\alpha(z) - \frac{A_1}{E_1} - \frac{(A_2 - \frac{A_1 E_2}{E_1})(z E_1 - E_2)}{E_1 E_2 - E_2^2} \right] \Delta T \quad (13)$$

Avec

$$\begin{aligned} (A_1, A_2) &= \int_{-t}^t (1, z)\alpha(z)E(z)dz \\ (E_1, E_2, E_3) &= \int_{-t}^t (1, z, z^2)E(z)dz \end{aligned} \quad (14)$$

VI. Résultats et discussions

Les caractéristiques du module d'élasticité et de dilatation thermique des constituants Al₂O₃ et Ni qui dépend de la température sont présentées dans les figure 2 et 3.

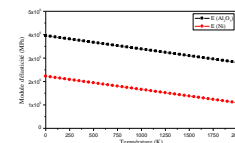


Figure 2. Caractéristique du module d'élasticité en fonction de la température.

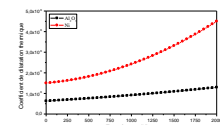


Figure 3. Caractéristique du coefficient de dilatation thermique en fonction de la température.

VI.1. Résultats obtenus d'un disque P-FGM

Dans cette étude tous les problèmes seront traités en élasticité linéaire et pour une température de traitement à savoir 1373 K. Les

calculs ont été effectués par considération de ces deux paramètres du matériau (E , α) indépendant de la température ainsi que dépendante de la température. En a basé sur un modèle unidimensionnel simple d'un disque P-FGM qui se compose de deux constituants la céramique et le métal variant avec la distance dans la direction d'épaisseur qui est égale à 10 mm, trois types de microstructures à gradient de propriétés ont été examinés, dans chacune le paramètre matériel (p) est changé en choisissant $p = 0.2$; 1 et 5, une gradation linéaire est réalisée avec $p = 1$, alors que pour $p < 1$ et $p > 1$ donne les profils désignés concave vers le haut et concave vers le bas, respectivement. Dans la première, les régions entièrement en céramique et entièrement en métal étaient supposés être absent (figure 4(a)), dans la deuxième (figure 5(a)) et la troisième (figure 6(a)), la présence des régions entièrement en céramique et en métal de différentes tailles (5 et 25% de l'épaisseur du disque) ont été considérés. Les niveaux de contraintes résiduelles pour les trois types de structure étudiées, ainsi que les niveaux de contraintes résiduelles pour la combinaison bi-matériaux avec les parties en céramique et en métal ayant une épaisseur égale, sont présentés dans les figures (4(b), 5(b) et 6(b)). On peut voir que pour tous les types de structures et de gradations, les paramètres dépendants de la température ne font pas un impact significatif sur les contraintes résiduelles. Ces paramètres ont comme conséquences seulement de petites différences dans les contraintes, dans les régions où les variations des proportions constitutives sont relativement grandes et rapides par exemple, aux interfaces. Lorsque les variations sont progressives, il n'y a presque aucune différence entre les contraintes.



Figure 4. La fraction de volume dans la céramique (a) Contraintes résiduelles correspondantes dans un disque P-FGM entièrement graduée (b).

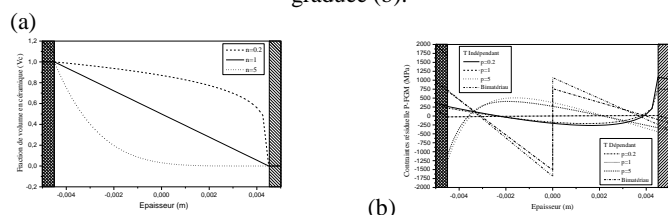


Figure 5. La fraction de volume dans la céramique (a) Contraintes résiduelles correspondantes dans un disque P-FGM avec des couches entièrement en céramique et entièrement en métal (5% d'épaisseur totale) touchant la zone graduée (b).

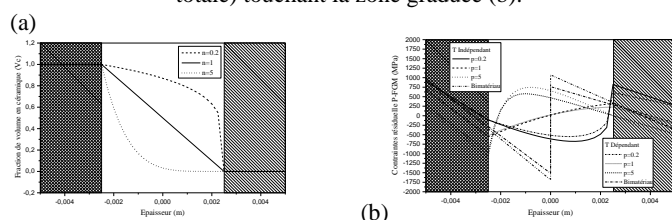


Figure 6. La fraction de volume dans la céramique (a) Contraintes résiduelles correspondantes dans un disque P-FGM avec des couches entièrement en céramique et entièrement en métal (25% d'épaisseur totale) touchant la zone graduée (b).

VI.2. Influence du paramètre de matériau (variation linéaire)

On voit la variation $p = 1$ dans la composition, à travers la zone graduée de la microstructure, et perçue comme résultat pour le moins des contraintes résiduelles dans tous les types de structures. Toutes les contraintes résiduelles pour les autres formes fonctionnelles ($p < 1$) et ($p > 1$) sont généralement d'une grandeur plus élevée comparées à la gradation linéaire. Toutefois, le caractère (tension ou compression) pour les contraintes semble dépendre de la valeur de (p). Par exemple, dans les figures (4(b), 5(b) et 6(b)), avec $p = 0.2$ (concave vers le haut), les régions riches en céramique et en métal sont en traction tandis que les contraintes dans le mélange ou la région biphasée sont généralement compressives. D'autre part, l'inverse est vu pour $p = 5$

(concave vers le bas), avec les deux côtés riches en céramique et en métal en compression et la couche intermédiaire graduée est en traction.

VI.3. Influence des régions monolithiques

Lorsque les tailles des régions entièrement en céramique et en métal touchant la structure P-FGM sont significatives (figure 6(b)), les niveaux de contraintes résiduelles sont beaucoup plus élevés et commencent à approcher du modèle de contraintes vu dans un bi-matériau. Pour protéger la phase de métal contre l'oxydation, la corrosion et l'érosion dus aux applications à haute température, il est souhaitable d'avoir un excédent entièrement minimal en céramique région au-dessus de la région graduée. Dans la figure 6(b), on va que lorsque la taille de la région graduée est de 50% de l'épaisseur, la réduction des contraintes résiduelles est significative, mais pas grande, par rapport à un bi-matériau. La comparaison entre les figures (4(b), 5(b) et 6(b)) montre que la gradation de plus de 50% de l'épaisseur du disque est nécessaire afin de réduire considérablement les contraintes résiduelles, avec la pleine gradation à travers l'épaisseur entière du disque donnant le moins de contraintes.

VII. Conclusion

Dans cet étude, on a utilisé un modèle unidimensionnel pour modéliser les contraintes résiduelles dans un système en matériaux à gradients de propriétés qui se constitue en deux composantes tels que le métal et le céramique à partir de leur température de fabrication ou de traitement thermique à la température ambiante, les calculs ont été effectués en loi de puissance (P-FGM) sur un disque FGM.

La distribution et l'importance des contraintes résiduelles dans un disque FGM peuvent être adaptées en maîtrisant le gradient de la composition appelé le paramètre du matériau (p) et en choisissant une combinaison appropriée à la géométrie dans le cas de la présence des régions monolithiques.

Une gradation linéaire des constituants donne un affaiblissement accentué des contraintes résiduelles après un traitement à haute température. L'inclusion des régions entièrement en céramique et entièrement en métal touchant la région graduée augmente la grandeur des contraintes. Le caractère des contraintes résiduelles (traction contre la compression) dans la région en céramique s'inverse quand la forme fonctionnelle de gradation change de concave vers le haut jusqu'au concave vers le bas. Avec le profil concave vers le bas, la région pleinement en céramique est sous compression.

Les changements dépendants de température dont les modules d'élasticité et les coefficients de dilatation thermique du céramique et du métal n'affectent pas de manière significative les contraintes résiduelles.

Généralement, on ne peut pas éliminer les contraintes résiduelles dans le disque en FGM par un simple traitement à haute température, parce qu'elles apparaissent de nouveau au cours de la période de refroidissement.

References

- [1] Suganuma K., Okamoto T., Shimada M. and Koizumi M., New method for solid-state bonding between ceramics and metals, *commun. J. Am. Ceram. Soc.* (1983) C-1 17-C-118
- [2] Kumar P. and Greenhut V.A. (eds.), *Metal-Ceramic Joining*, TMS-AIME, Warrendale, PA, 1991.
- [3] Ravichandran K. Thermal residual stresses in a Functionally Graded Material system. *Mater. Sci. Eng.* A201, 1995, 269 – 276.
- [4] Sallai B.O., Tounsi A., Mechab I., Bachir Bouiadjra M., Meradjah M., Adda Bedia E.A., A theoretical analysis of flexional bending of Al/Al₂O₃ S-FGM thick beams, *Computational Materials Science* 44, 2009, 1344-1350.
- [5] Frost H. J., M. F. Ashby M. F., *Deformation-Mechanism Maps: The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics*, Pergamon Press; 1st edition, New York, 1982, 184 pages.
- [6] Fei Y., *Thermal Expansion*, Carnegie Institution of Washington, Geophysical Laboratory, 5251 Broad Branch Road, NW. Washington, DC 20015-1305, 1995, 29-44.
- [7] Bao G., Wang L., Multiple cracking in functionally graded ceramic/metal coatings. *International Journal of Solids and Structure* 32, 1995, 2853–2871.
- [8] Timoshenko S.P. and Goodier J.N., *Theory of Elasticity*, 3rd edn., McGraw-Hill, 1970, 433-439.