



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Comptes Rendus Mecanique

www.sciencedirect.com



Étude du comportement mécanique d'un matériau à structure duplex par la méthode des éléments finis

Study of the mechanical properties of a duplex structured material using the finite element method

Said Laasri^{a,*}, M. Taha^a, E.K. Hlil^b, A. Hajjaji^c

^a Laboratoire de Thermodynamique Métallurgie et Rhéologie des Matériaux, Département de Physique, Université Ibn-Zohr, Faculté des Sciences, BP 8106, Cité Dakhla, Agadir, Maroc

^b Institut Néel, CNRS – Université Joseph Fourier, BP 166, 38042 Grenoble, France

^c Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'El Jadida, BP 1166, EL Jadida, Maroc

I N F O A R T I C L E

Historique de l'article :

Reçu le 15 juin 2010

Accepté après révision le 19 novembre 2010

Disponible sur Internet le 24 décembre 2010

Mots-clés :

Génie des matériaux

Alumine

Zircone

Inclusion sphérique

Champ de contrainte

Résistance à la rupture

Éléments finis

Keywords:

Material engineering

Alumina

Zirconia

Spherical inclusion

Constraint field

Rupture resistance

Finite element

R É S U M É

Le principe d'élaboration microstructurale des céramiques à base d'alumine repose sur la dispersion des zones sphériques relativement larges (10–50 μm) dans une matrice céramique (Claussen et Petzow, 1982–1984 [1]). Lors du refroidissement, ces zones avec des quantités variables en ZrO_2 , se dilatent par rapport à la matrice. Cette dilatation peut être complète ou partielle et engendre dans tous les cas des contraintes. Ces dernières peuvent être :

- De compression en se développant à l'intérieur des zones et radialement à celle-ci.
- De traction circulaires et tangentiellement à ces zones.

L'objectif de ces microstructures complexes est double :

- Conserver la contrainte à la rupture de la matrice à une valeur élevée.
- Favoriser la déviation et la bifurcation des fissures.

Le but de ce travail est d'étudier le champ de contraintes autour de ces zones sphériques par la méthode des éléments finis. Ces résultats vont être comparés à ceux déterminés par la mécanique des milieux continus (MMC).

© 2010 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

A B S T R A C T

The microstructural design concept of bio-ceramics is based on relatively large (10–100 μm) spherical zones dispersed in a ceramic matrix. These zones contain variable fractions of ZrO_2 particles. On cooling from the fabrication temperature they expand relative to the matrix either completely during cooling or at first partially and then continue by stress induction. Compressive stresses are developing within and radially around zones. Tensile hoop stresses are created tangentially around the zones.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : laasrisaid@yahoo.fr (S. Laasri).

The objective of these spherical zones is to preserve stress of rupture of the matrix at a high value and to support the deviation and the cracks bifurcation. The reinforcement in these materials is related to the interaction between the stress field in crack face and the residual stress fields around the spherical zones.

In this article, we propose a study of the stress field around spherical inclusions using the finite elements method. These results are compared with those found analytically.

© 2010 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

1. Introduction

Depuis plusieurs années, l'optimisation de la synthèse des poudres céramiques avait pour but la production de poudre de plus en plus fine et homogène. En effet, la réactivité et la finesse de la poudre permettent à la fois un frittage à basse température et surtout une minimisation de la taille des défauts intrinsèques. Ces défauts provoquent dans la plupart des cas, la rupture des céramiques massives et affaiblissent leurs propriétés mécaniques.

Des nouvelles stratégies de renforcement des matériaux céramiques sont apparues [2] :

- Tolérance aux défauts.
- Fabrication de composites laminaires.
- Renforcement par dispersion de nano-particule.

En effet, notre travail porte essentiellement sur cette dernière, Niihira a rapporté que la dispersion d'une seconde phase de particules nano-métriques (50 à 100 nm) dans une matrice céramique ayant un coefficient de dilatation thermique élevé, permet d'améliorer ses propriétés mécaniques [3].

Dans ce travail nous présentons une étude numérique des champs de contraintes autour des inclusions sphériques ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-X}\%\text{Zr}_2\text{O}$), avec X% le pourcentage massique de zircone monoclinique dans la zone de renfort, dans une matrice céramique (Al_2O_3). Ce composé est noté AZx avec A : alumine ; Z : zircone, x : le pourcentage massique de zircone dans l'inclusion (Fig. 1).

Cette modélisation numérique tient compte des études expérimentales réalisées par Lutz et al. [4] sur ces composés.

2. Champ des contraintes résiduelles autour des inclusions sphériques

Le renforcement dans les matériaux à structure duplex est lié à l'interaction entre le champ de contraintes en front de la fissure et les champs de contraintes résiduelles autour des inclusions sphériques [1]. Cependant, l'énergie élastique emmagasinée autour des zones sphériques ne doit pas excéder l'énergie de propagation des fissures, car si c'est le cas, on n'aura pas de renforcement de la microstructure.

En se basant sur les deux modèles de Selsing et Lundin, Lutz [5–10] a calculé les contraintes radiales et tangentielles autour d'une inclusion sphérique. Il considère que la structure duplex est constituée d'un empilement dense de sphères A et chacune de ces dernières enveloppe une sphère B de rayon plus petit. Si les zones B sont le siège d'une transformation de phase ou d'une expansion thermique liée aux différences de coefficients de dilatation thermique entre la matrice et les zones de renfort, l'expansion volumique des zones est d'après Lutz et al. [10] :

$$\varepsilon^V = \frac{\Delta V}{V} + 3(\alpha_A - \alpha_B)\Delta T \quad (1)$$

où $\frac{\Delta V}{V}$: variation volumique liée à une transformation de phase B, α_A , α_B : coefficients de dilatation thermique des composants A et B, ΔT : écart entre la température d'élaboration et la température ambiante.

La dilatation volumique des zones sphériques engendre une pression interne au sein de ces zones. Cette pression est donnée par Lutz et al. [10] :

$$p_{\text{iso}}^B = -C_4 \left(1 - \frac{R_B^3}{R_A^3} \right) \quad (2)$$

avec :

$$C_4 = \frac{C_1}{C_2 + C_3 \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^3} \quad (3)$$

$$C_1 = \frac{2}{3} \cdot E_A \cdot E_B \cdot \varepsilon^V \quad (4)$$

$$C_2 = 2 \cdot E_A \cdot (1 - 2\mu_B) + E_B(1 + \mu_A) \quad (5)$$

$$C_3 = 2 \cdot [E_B \cdot (1 - 2\mu_A) - E_A \cdot (1 - 2\mu_B)] \quad (6)$$

où : E_B , μ_A et μ_B sont respectivement les modules de Young et les coefficients de Poisson des matériaux A et B.

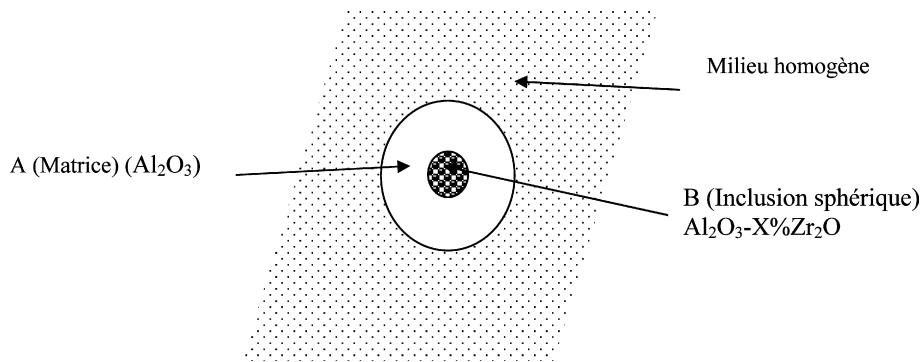


Fig. 1. Structure duplex.

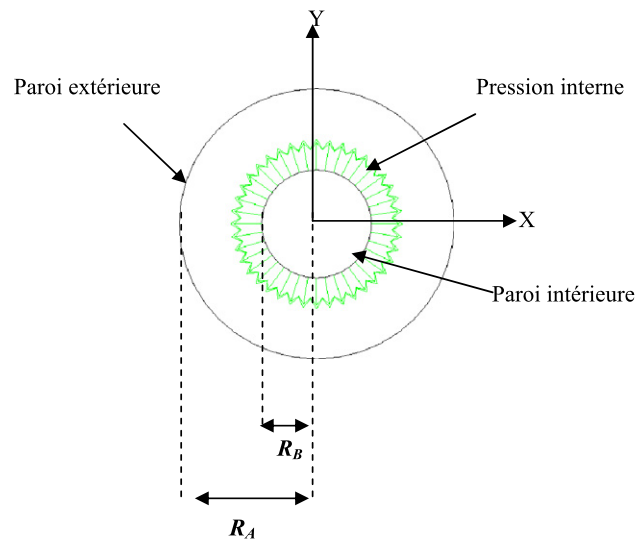


Fig. 2. Description de la géométrie étudiée.

3. Résultats et discussions

Pour simplifier l'étude d'une inclusion sphérique, nous avons envisagé de déterminer la répartition de champ des contraintes dans un composé sous forme d'un cylindre creux de hauteur très faible. En effet nous avons adopté une modélisation en deux dimensions. Ce qui justifie notre approche du cylindre creux de faible hauteur. Le composé est soumis à l'action de pressions intérieures uniformément réparties sur la paroi intérieure. Soit R_B le rayon intérieur du cylindre, R_A son rayon extérieur et p étant la pression intérieure normale à la paroi intérieure (Fig. 2).

3.1. Pression interne

L'effet de l'inclusion sphérique est assimilé à une pression interne dont la valeur dépend de pourcentage de zircon dans l'inclusion. En effet, en tenant compte des conditions d'élaboration du composé (Lutz et al.), nous avons calculé cette pression interne (Tableau 1).

D'après ces résultats, on remarque d'une part, que la pression interne augmente en fonction de la teneur en zircon dans l'inclusion avec $\frac{R_B}{R_A}$ constant.

D'autre part, cette pression interne diminue au fur et à mesure que le rapport $\frac{R_B}{R_A}$ augmente et ceci pour une quantité constante de zircon dans l'inclusion.

Aussi, à partir de ces résultats on peut éviter facilement la rupture catastrophique qui est induite par des pressions internes supérieures à 1000 MPa (résistance à la rupture de l'alumine [10]).

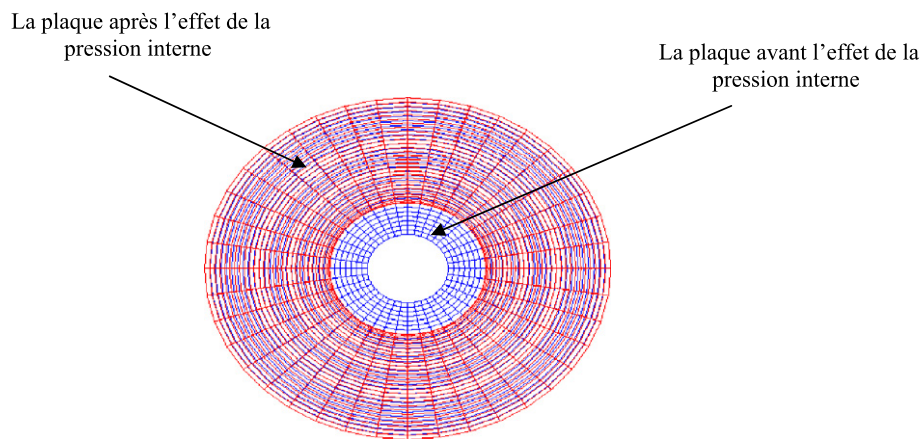
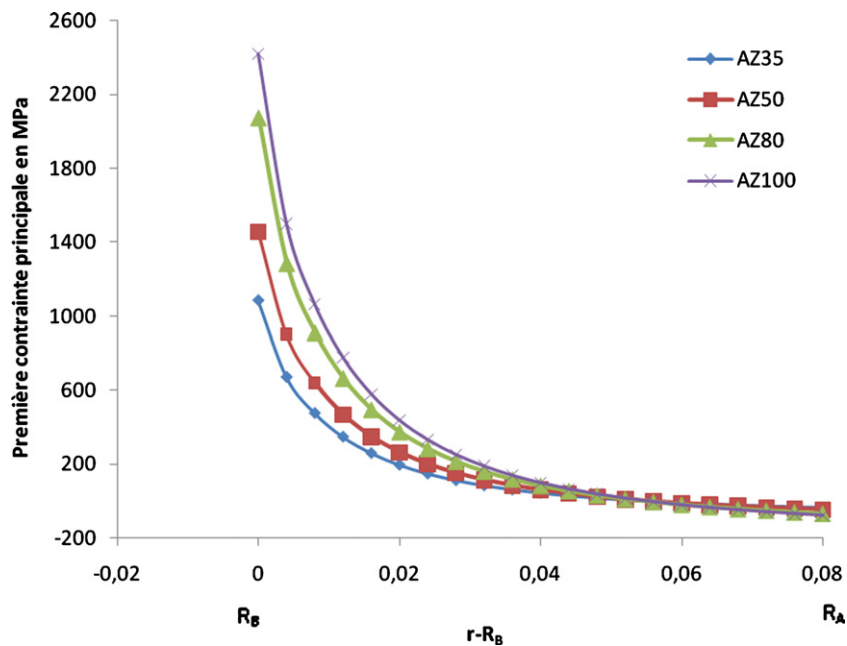
3.2. Étude par éléments finis

La répartition des champs de contraintes est étudiée par la méthode des éléments finis.

Tableau 1

Pressions internes pour différents teneurs en zircon dans l'inclusion en fonction de la taille de cette dernière.

$\frac{R_B}{R_A}$	Pression interne (MPa) de ces composés			
	Al ₂ O ₃ -35 %Zr ₂ O (AZ35)	Al ₂ O ₃ -50 %Zr ₂ O (AZ50)	Al ₂ O ₃ -80 %Zr ₂ O (AZ80)	100 %Zr ₂ O (AZ100)
0,0001	1197	1904	3317	4259
0,10	1195	1902	3314	4256
0,20	1189	1891	3294	4230
0,40	1131	1799	3135	4026
0,50	1068	1698	2959	3799
0,60	970	1543	2688	3453
0,80	633	1003	1755	2254
0,81	610	970	1608	2171
0,90	365	580	1010	1298
0,91	333	530	923	1185
0,92	300	478	833	1069
0,93	266	424	739	949

**Fig. 3.** La plaque avant et après l'effet de la pression interne.**Fig. 4.** Distribution du champ de la 1^{ère} contrainte principale pour différents pourcentages de zircon dans l'inclusion par la méthode des éléments finis.

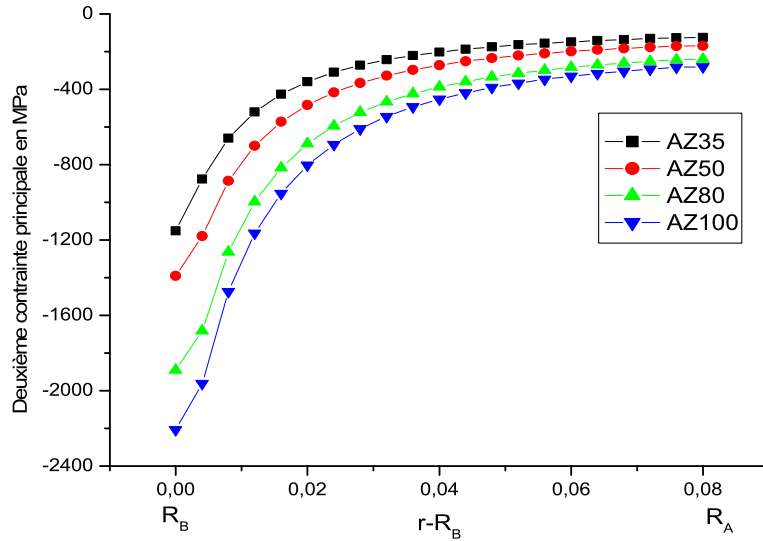


Fig. 5. Distribution de champs de la 2^{ème} contrainte principale pour différentes valeurs zircon dans l'inclusion sphérique (méthodes analytique).

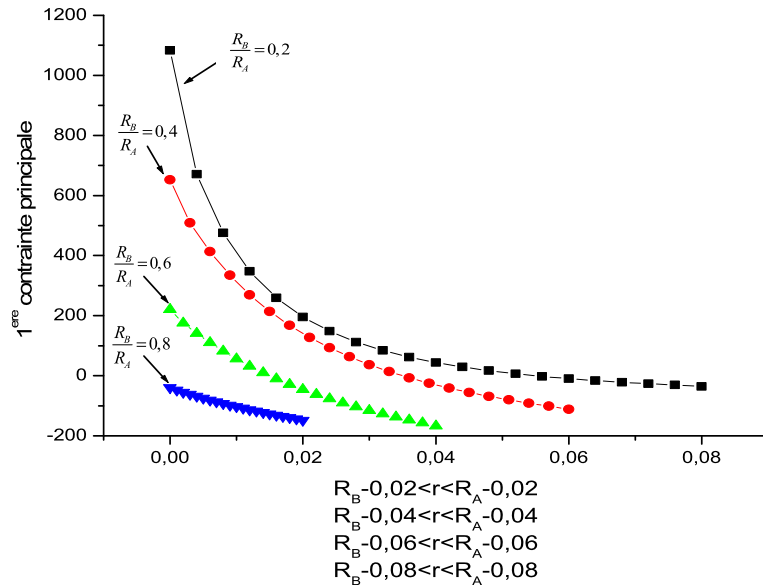


Fig. 6. Distribution des 1^{ères} contraintes principales en fonction de $\frac{R_B}{R_A}$ pour le cas où l'inclusion est composée de 75% de Al_2O_3 et 35% de ZrO_2 (AZ35).

Le maillage est effectué à deux dimensions et constitué des éléments de type quadratique à quatre nœuds.

La Fig. 3 montre un exemple de l'effet d'une pression interne sur la plaque cylindrique qui confirme que le champ de pression est radial.

3.3. Champ de contraintes principales au voisinage d'une inclusion

3.3.1. En fonction de la quantité de zircon dans la zone de renfort

La Fig. 4 montre que la distribution du champ de la 1^{ère} contrainte principale par la méthode des éléments finis autour d'une inclusion sphérique pour différentes teneurs en zircon.

A l'interface renfort-matrice, nous remarquons tout d'abord que la contrainte principale augmente en fonction de la teneur en zircon.

Par ailleurs, pour une teneur fixe en zircon nous remarquons que le champ de la 1^{ère} contrainte est intense au front de l'inclusion et décroît rapidement au voisinage de l'interface pour tendre ensuite vers une valeur nulle à la limite de la plaque cylindrique $r = R_A$. En outre les mêmes remarques sont à formuler à partir des courbes de la distribution de champ des contraintes obtenues par la mécanique des milieux continus.

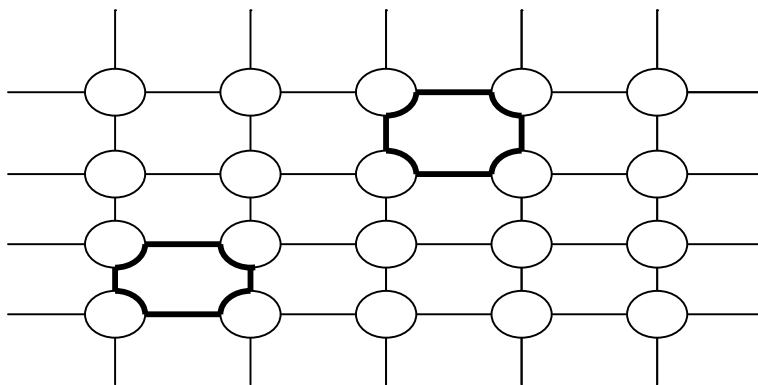
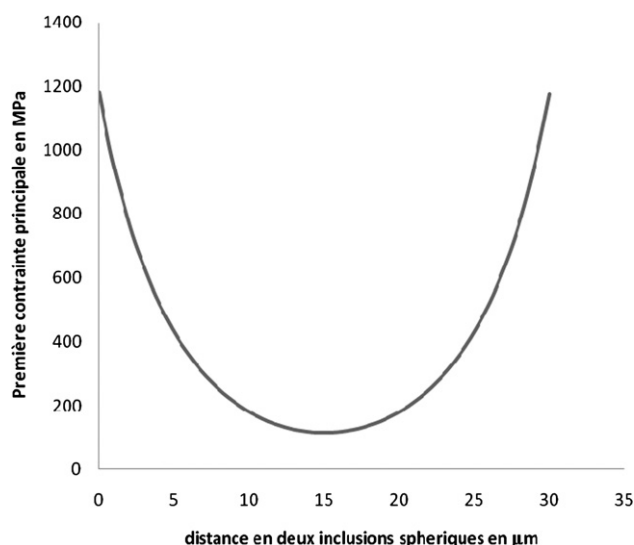


Fig. 7. Description du problème.

Fig. 8. Distribution du champ de la 1^{ère} contrainte principale entre deux inclusions sphériques.

A partir de la Fig. 5, nous remarquons que la distribution du champ de la 2^{ème} contrainte principale augmente lorsque les zones de renforcement contiennent de plus en plus de zircon monoclinique et décroît rapidement et tend vers une valeur nulle à la limite de la plaque cylindrique $r = R_A$ d'autre part les mêmes remarques ont été constatées pour les résultats obtenus par la mécanique des milieux continus.

3.3.2. En fonction du rapport $\frac{R_B}{R_A}$ (cas où l'inclusion = $\text{Al}_2\text{O}_3 + 35\%\text{ZrO}_2$)

A partir des résultats fournis par la méthode des éléments finis donnés par la Fig. 6 dans le cas où la zone de renfort est constituée par 75% de Al_2O_3 et 35% de ZrO_2 , nous constatons tout d'abord que le champ de la 1^{ère} contrainte est très intense à l'interface inclusion matrice et décroît rapidement vers une valeur nulle à la limite de la plaque cylindrique pour une valeur fixe du rayon de l'inclusion. Par ailleurs le champ de la 1^{ère} contrainte diminue en augmentant le rayon de l'inclusion et ceci est en bonne corrélation avec les résultats donnés par la mécanique des milieux continus.

3.3.3. Contraintes principales au voisinage de plusieurs inclusions sphériques

Vu la complexité du problème nous l'avons traité par la méthode des éléments finis (Fig. 7).

3.3.4. Distribution du champ de contraintes au voisinage de deux inclusions

A partir des résultats donnés par la Fig. 8, nous remarquons que le champ de la 1^{ère} contrainte principale est très intense au voisinage de l'inclusion et décroît rapidement tendant vers une valeur nulle, et croit en s'approchant du front de la deuxième inclusion.

4. Conclusion

Dans ce travail, après avoir calculé la pression interne, en se basant sur le module de Lutz et al., nous avons montré que cette pression augmente en fonction de la teneur en zircone dans l'inclusion avec $\frac{R_B}{R_A}$ constant, et diminue au fur et à mesure que le rapport $\frac{R_B}{R_A}$ augmente pour une quantité constante de zircone dans la zone de renfort. D'autre part, à partir de la valeur de la pression interne, on peut éviter facilement la rupture catastrophique qui est induite par des pressions internes supérieures à 1000 MPa (résistance à la rupture de l'alumine).

Nous avons utilisé la méthode des éléments finis pour étudier la distribution des champs de contraintes principales dans une plaque cylindrique qui contient une inclusion et une autre qui contient plusieurs inclusions.

Ceci nous a permis de montrer que le renforcement dans les bio-céramiques à base d'alumine et alumine/zircone est assuré par transformation de phase de la zircone dans les zones de renfort. Ces derniers sont très influencés par le champ de contraintes résiduelles autour des inclusions qui est très élevé à l'interface inclusion matrice. Par ailleurs nous avons montré que lorsque nous augmentons la teneur en zircone dans la zone de renfort ceci entraîne une augmentation du champ des contraintes principales, d'autre part une augmentation du rayon de l'inclusion conduit à une diminution du champ de contraintes principales.

Références

- [1] N. Claussen, G. Petzow, German Patent DE3233019, 1982; U.S. Patent 4, 506024, 1983; Japanese Patent 64567, 1984.
- [2] M.P. Harmer, M.P. Chan, G.A. Miller, Unique opportunities for microstructural engineering with duplex and laminar ceramic composite, *J. Amer. Ceram. Soc.* 75 (7) (1992) 1715–1728.
- [3] K. Niihira, New design concept of structural ceramics—ceramics nano-composite, *J. Ceram. Soc. Jpn.* 99 (10) (1991) 974.
- [4] H.E. Lutz, N. Claussen, Duplex ceramics I: Stress calculation, fabrication and microstructure, *J. Euro. Ceram. Soc.* 7 (1991) 209–218.
- [5] H.E. Lutz, N. Claussen, Duplex ceramics strength and toughness, *J. Euro. Ceram. Soc.* 7 (1991) 219–226.
- [6] H.E. Lutz, M.V. Swain, Mechanical and thermal shock properties of duplex ceramics—A review, *Mater Forum* 15 (1991) 307–323.
- [7] H.E. Lutz, N. Claussen, K_R -curve behavior of duplex ceramics, *J. Amer. Ceram. Soc.* 74 (1) (1991) 11–18.
- [8] H.E. Lutz, M.V. Swain, Interrelation between flaw resistance R -curve behavior and thermal shock strength degradation in ceramics, *J. Amer. Ceram. Soc.* 74 (11) (1991) 2859–2868.
- [9] H.E. Lutz, M.V. Swain, N. Claussen, Thermal shock behavior of duplex ceramics, *J. Amer. Ceram. Soc.* 74 (1) (1991) 19–24.
- [10] H.E. Lutz, M.V. Swain, Stress-strain behavior of duplex ceramics I: Observation, *J. Amer. Ceram. Soc.* 75 (7) (1992) 1729–1736.