

DETERMINATION DU MODULE DE YOUNG D'UN MATERIAU RECHARGE PAR PROJECTION THERMIQUE SUR UN SUBSTRAT METALLIQUE

A. DJEFFAL¹, M. BOUNAZEF^{1,2}, S.E. BENDAOUZI¹, E.A. ADDA BEDIA²

¹Département de Génie Mécanique, Département de Génie Civil, Université de Sidi Bel Abbes Algérie

²Laboratoire LM & H, Département de Génie Civil, Université de Sidi Bel Abbes Algérie

Reçu le 05/02/2008 – Accepté le 26/05/2010

Résumé

La détermination du module de Young d'un matériau homogène et isotrope se fait généralement en subissant à une éprouvette l'essai de traction. Cependant lorsque l'éprouvette se compose de deux matériaux superposés l'un sur l'autre, c'est-à-dire que l'un d'eux est collé par adhésif industriel, rechargé par soudure, ou déposé par projection thermique, cette méthode n'est plus valable car elle détermine un module moyen des deux matériaux généralement différents.

Il s'agit là de caractériser le deuxième matériau projeté sur le premier sans les séparer; si c'est le cas cela détruit inévitablement le plus fragile. Dans cette situation, on fait subir à l'ensemble des deux couches, un essai de flexion; l'éprouvette étant fixée rigidement d'un côté afin de former un encastrement; l'autre bout étant laissé libre pour subir un déplacement sous l'action d'une force F appliquée à cette extrémité.

Mots clés : Matériaux poreux, Gain d'énergie, Taux de porosités, Projection thermique, Caractérisation en flexion.

Abstract

The determination of Young's modulus of a homogeneous and isotropic material is generally subjected to a tensile sample test. However, when the sample is composed of two materials; one of them is stuck by industrial adhesive or by welding or deposited by thermal spraying, this method is no valid because it determines the equivalent modulus of two different materials in same time.

The separation of two materials destroys inevitably the most fragile. In this case, we undergo to this sample, a bending test; the sample is rigidly fixed on first side to form embedding, and the other side being left free to undergo displacement by action of force F applied at its end side.

Keywords : Porous materials, Energy gain, Degree of porosity, Thermal spraying, Bending characterisation.

ملخص

تحديد معامل "يونغ" لمادة متجانسة الخواص تخضع عموما عينتها لاختبار الشد ولكن عند ما العينة تتألف من مادتين مكدمستين واحدة على الأخرى، وهذا يعني أن تمسك واحدة منهما على الأخرى بواسطة لاصقة صناعية، أو شحنها عن طريق لحام أو بواسطة الرش الحراري، هذه الطريقة لم تعد صالحة لأنها تحدد معامل "يونغ" وسيط للمادتين الملتصقتين المختلفتين.

في هذه الحالة يجب توصيف المادة الثانية المرشحة حراريا على الأولى دون فصلهما، فإذا انفصلت واحدة منهما تدمر حتما الأكثر هشاشة. في هذه الحالة، نخضع للطبقتين اختبار الانحناء. نثبت من جهة العينة لتشكيل دافق تاركا الجانب الآخر حرا يخضع لعملية التهجير تحت تأثير قوة F المعرضة الجانب الآخر من العينة.

الكلمات المفتاحية: المواد المسامية، توفير الطاقة، نسبة المسامية، الرش الحراري، تحديد بالانحناء.

Le module de Young et l'une des caractéristiques principales des matériaux fonctionnant dans le domaine élastique. Habituellement, il est trouvé expérimentalement par des essais de traction en mesurant les déformations d'où l'on peut le déduire facilement par les méthodes courantes connues en résistance des matériaux. Dans certains cas lorsque l'éprouvette se compose de deux matériaux différents superposés, rigidement liés et adhérents l'un sur l'autre, cette méthode ne permet pas de le déduire ; seule la méthode par l'essai de flexion peut aboutir à sa détermination.

1. OBTENTION DU MATERIAU TESTE

Le matériau projeté par le procédé APS (Atmospheric Plasma Spraying) [1, 2] est obtenu grâce à une optimisation d'une cinquantaine de paramètres de projection très complexes à savoir le choix des gaz plasmagènes, le gaz porteur de poudre, la vitesse de rotation du mandrin, la vitesse d'avance de la torche de projection, le débit de poudre, le débit du fluide de refroidissement, la distance de projection, le type des injecteurs et bien d'autres. Cela permet d'obtenir un matériau modérément tendre afin qu'il ne provoque pas une usure de la pièce mais possédant par contre une certaine dureté superficielle afin que l'effet de l'érosion de particules solides extérieures ne fassent aucun dégât sur le dépôt projeté thermiquement. Il est obtenu en utilisant les grains de poudre de BN-NiCrAl-Polyester dont le noyau central est de Nitrure de Bore entouré de NiCrAl afin d'éviter l'effet de sublimation (figure 1) [3-5].

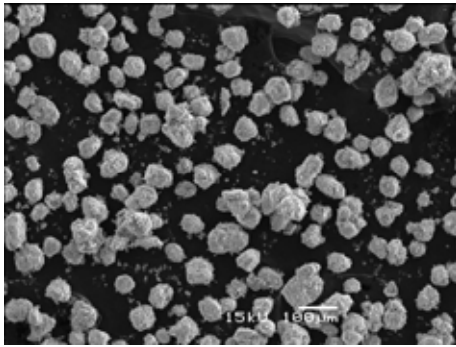


Figure 1 : Grains de BN-NiCrAl-Polyester (Micrographie MEB prise au LERMPS de Belfort Montbeliard, France)

Le dépôt obtenu par le procédé de projection thermique "Atmospheric Plasma Spraying" permet de remplacer les labyrinthes habituellement installés au niveau des turbines à gaz pour former un joint d'étanchéité au niveau des ailettes [6-9].

Cette nouvelle installation engendre un jeu fonctionnel minimal entre les bouts des ailettes et le dépôt du matériau empêchant les fuites des gaz brûlés et engendrant un gain en consommation de carburant entre 5 et 10%.

La figure 2 montre l'aspect de ce dépôt possédant un taux de porosité de 64,07% remplies entre 40 et 50% de nitrure de bore.

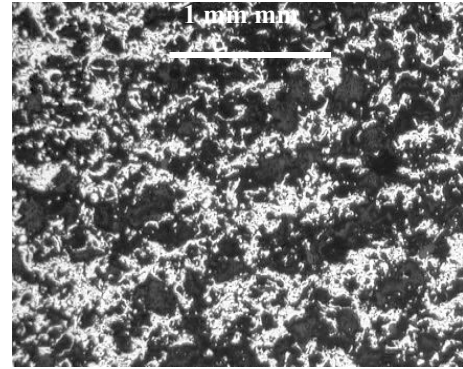


Figure 2 : Aspect du matériau poreux (Micrographie MEB prise au LERMPS de Belfort Montbeliard, France)

2. PRINCIPE DU TEST

Le test de flexion consiste à mesurer les déplacements de l'extrémité libre d'un substrat (3) revêtu par un matériau rechargé, collé ou déposé (2) à l'aide d'un capteur de déplacement (1), sous l'effet de la charge (F) comme montré sur la figure 3.

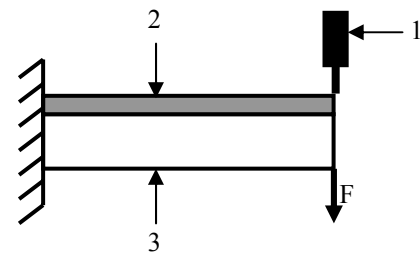


Figure 3 : Présentation schématique du test de flexion (Lieu : LERMPS de Belfort Montbeliard, France)

On utilise cette méthode de flexion simultanée du substrat et du dépôt car le module de Young longitudinal du matériau 2 ne peut être mesuré séparé du substrat. Pour cette raison et afin de déterminer le module de Young du revêtement, il est nécessaire de combiner une méthode expérimentale de mesure du déplacement de l'extrémité libre avec une méthode théorique de résistance de matériaux. Le module E est déterminé indirectement par comparaison des deux déplacements, l'un calculé théoriquement et l'autre mesuré pratiquement comme le montre le raisonnement ci-dessous.

3. METHODE DE CALCUL DU DEPLACEMENT

La méthode consiste à déterminer le déplacement de l'extrémité libre de l'échantillon, en fonction des différents paramètres, comme cela est montré par la figure 4.

La section de la poutre est supposée rester plane lors de la flexion, ce qui implique une variation linéaire des déformations lors de l'application d'une force à son extrémité, donc l'hypothèse classique en résistance des matériaux, conduit à une déformation sous forme d'une équation d'une droite (section plane, droite A-A, figure 4) :

$$\varepsilon(y) = ky + \varepsilon_0 \quad (1)$$

ε_0 : Déformation au niveau de l'axe des X ($y=0$)

$\varepsilon(y)$: Déformation au niveau d'une section de hauteur y

k : Coefficient directeur de la droite

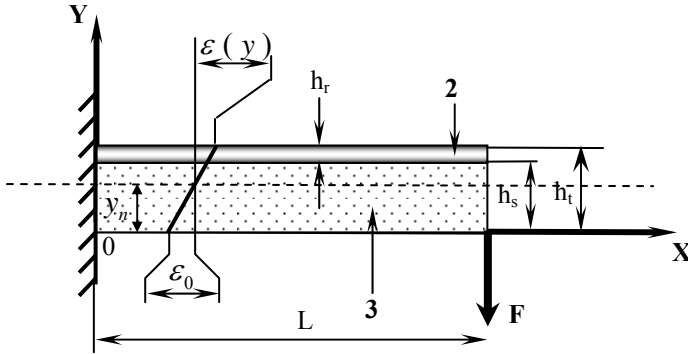


Figure 4 : Schéma de l'éprouvette en bi-matériaux (Lieu expérience: LERMPS de Belfort Montbéliard, France)

Avec :

L : Longueur de l'éprouvette en m;

b : Largeur de l'éprouvette en m;

h_t : Epaisseur totale du bi-matériau en m;

h_s : Epaisseur du matériau support en m;

h_r : Epaisseur du revêtement en m ;

y_n : Hauteur de la ligne neutre en m;

2 : Matériau collé, déposé ou rechargé (module de Young E_r , épaisseur $e_r=h_r$);

3 : Matériau support (Substrat) (module de Young E_s , épaisseur $e_s=h_s$)

Il faut comprendre par là que la déformation est nulle au niveau de l'axe neutre (n-n) qui se situe dans une position (y_n) par rapport à "O" et qui reste à déterminer, et que hors de cet axe, la déformation se calcule d'après la formule (1) en fonction de la position "y" de la section dans l'éprouvette. Le coefficient de proportionnalité k pouvant être négatif ou positif selon que la section se situe au dessous ou au dessus de la ligne neutre "n-n". Au niveau de l'axe des X, la déformation est alors égale à ε_0 puisque $y=0$. Ainsi, vu que les déformations sont très petites et linéaires, la loi de Hooke est appliquée pour l'éprouvette composée des deux matériaux, ce qui donne pour une section située à une distance x :

1) Pour le substrat "2", lorsque $0 \leq y \leq h_s$ (fig. 4), la contrainte de flexion normale à la section selon $\sigma(y) = E_s \cdot \varepsilon_s$; $\varepsilon_s = k \cdot y + \varepsilon_0$ est :

$$\sigma(y) = E_s (ky + \varepsilon_0) \quad (2)$$

E_s : Module de Young longitudinal du substrat.

2) De même, par le même raisonnement, pour le matériau "3" collé, rechargé, ou déposé, lorsque $h_s \leq y \leq h_t$ (figure 4) :

$$\sigma(y) = E_r (\varepsilon_0 + k \cdot y) \quad (3)$$

E_r : Module de Young longitudinal du revêtement.

L'effort normal au niveau de l'axe neutre étant nul, en considérant que la largeur de l'éprouvette étant égale à b, nous pouvons écrire:

$$N_{N-N} = 0 \Rightarrow \int_0^{h_t} (\sigma(y) \cdot b \cdot dy) = 0 \quad (4)$$

Connaissant que la section étant celle formée par le bi-matériau, on peut écrire en combinant (2), (3) et (4) :

$$\Rightarrow b \left[\int_0^{h_s} (E_s \cdot (k \cdot y + \varepsilon_0)) \cdot dy + \int_{h_s}^{h_t} (E_r \cdot (k \cdot y + \varepsilon_0)) \cdot dy \right] = 0 \quad (5)$$

Après intégration de l'équation (5) par rapport à y, remplacement de la variable "y" par 0, h_s , ou h_t selon la borne d'intégration, on peut exprimer la valeur de k comme suit:

$$k = -2\varepsilon_0 \frac{E_s \cdot h_s + E_r (h_t - h_s)}{E_s \cdot h_s^2 + E_r (h_t^2 + h_s^2)} \quad (6)$$

La détermination du coefficient k étant faite, et sachant que la contrainte normale de flexion au niveau de l'axe neutre est nulle, cela nous permet de déterminer la position de l'axe neutre c'est-à-dire la valeur de " y_n ".

$$\sigma_{N-N} = 0 \quad (7)$$

$$\sigma_{N-N} = 0 \Rightarrow \varepsilon_0 + k \cdot y_n = 0 \rightarrow y_n = -\frac{\varepsilon_0}{k} \quad (8)$$

En remplaçant k par la valeur donnée par l'équation (6), cela nous donne :

$$y_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_s \cdot h_s^2 + E_r \cdot (h_t^2 - h_s^2)}{E_s \cdot h_s + E_r \cdot (h_t - h_s)} \quad (9)$$

Afin de calculer le déplacement à l'extrémité libre de la poutre, il faut calculer le moment fléchissant d'où :

$$M = \int_0^L \int_0^{ht} (\sigma(y) \cdot (y - y_n)) \cdot dy \cdot dz \quad (10)$$

Autrement :

$$M = A \cdot \varepsilon_0 \quad (11)$$

Avec :

$$A = -y_n \cdot b \cdot \left[E_s \cdot \left(h_s - \frac{h_s^2}{y_n} + \frac{1}{3} \frac{h_s^3}{y_n^2} \right) + E_r \cdot \left(h_t - h_s - \frac{h_t^2 - h_s^2}{y_n} + \frac{1}{3} \frac{h_t^3 - h_s^3}{y_n^2} \right) \right] \quad (12)$$

La détermination de la valeur du moment fléchissant nous permet de calculer le déplacement $U_y(x)$ à l'extrémité libre de la poutre comme montré sur la figure 5 :

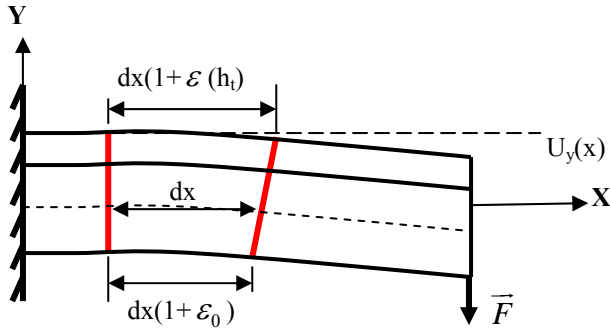


Figure 5 : Présentation du déplacement de l'échantillon

Sachant que la première dérivée du déplacement vertical $U_y(x)$ par rapport à une position x est égale à la déformation ε :

$$\frac{dU_y(x)}{dx} = \varepsilon \quad (13)$$

Calculons la deuxième dérivée du déplacement $U_y(x)$:

$$d\varepsilon = \frac{dx(\varepsilon(h_t) - \varepsilon_0)}{h_t} \Rightarrow \frac{d^2U_y(x)}{dx^2} = \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (14)$$

Donc :

$$(14) \Rightarrow \frac{d^2U_y(x)}{dx^2} = \frac{(\varepsilon(h_t) - \varepsilon_0)}{h_t} \quad (15)$$

Comme $\varepsilon(h_t) = \varepsilon_0 + k.h_t$ (équation 1), on aura :

$$\Rightarrow \frac{d^2U_y(x)}{dx^2} = \frac{(\varepsilon_0 + k.h_t - \varepsilon_0)}{h_t} \quad (16)$$

Par conséquent la dérivée seconde du déplacement $U_y(x)$ est :

$$\Rightarrow \frac{d^2U_y(x)}{dx^2} = k \quad (17)$$

D'après la formule (8) on a :

$$k = \frac{-\varepsilon_0}{y_n} \quad (18)$$

Et d'après la formule (11) on a :

$$\varepsilon_0 = \frac{M}{A} \quad (19)$$

En combinant les équations (17), (18) et (19), on trouve :

$$\frac{d^2U_y(x)}{dx^2} = \frac{-M}{A.y_n} \quad (20)$$

Or le moment fléchissant M au niveau d'une section se situant à une distance " x " peut s'exprimer par :

$$M = F.(L - x) \quad (21)$$

En remplaçant la valeur de M (équation 21) dans la formule (20), cela nous donne :

$$\frac{d^2U_y(x)}{dx^2} = \frac{F.(x - L)}{A.y_n} \quad (22)$$

Une fois cette dernière équation intégrée par 2 fois, et tout en prenant comme conditions aux limites pour $y=0$:

$$U_y(0) = 0 \quad (23)$$

(Déplacement nul au niveau de l'encastrement)

Et :

$$\frac{dU_y(0)}{dx} = 0 \quad (24)$$

(Déformation nulle au niveau de l'encastrement)

Il en ressort la formule suivante (Les 2 constantes d'intégration sont nulles après application des conditions aux limites) :

$$U_y(x) = -\frac{F}{2.A.y_n} \left(L.x^2 - \frac{x^3}{3} \right) \quad (25)$$

Pour l'extrémité libre ($x=L$), le déplacement du bout libre de l'éprouvette est donc :

$$U_y(L) = \frac{F.L^3}{3.A.y_n} \quad (26)$$

4. METHODE DE CALCUL

Il s'agit là de calculer théoriquement le déplacement en passant par les étapes décrites auparavant et de le mesurer réellement avec un comparateur électronique de précision.

Connaissant le déplacement ($U_y(x)$), la force (F), le module de Young du substrat (E_s), l'épaisseur du substrat (h_s), l'épaisseur totale (h), l'épaisseur du revêtement (h_r), la largeur de l'éprouvette (b), et la longueur libre de l'éprouvette rechargée (L), on donne arbitrairement des valeurs au module de Young du revêtement (E_r) pour calculer pour chacune d'elles les valeurs de y_n (formule 9), de A (formule 12), et du déplacement $U_y(x)$ (formule 26).

Lorsque la valeur du déplacement calculé (U_{cal}) coïncide avec la valeur du déplacement mesurée expérimentalement (U_{mes}) par l'essai de flexion, on déduit alors que la valeur du module de Young du revêtement (E_r) choisie était bonne.

Afin de vérifier l'exactitude de cette méthode, on l'applique sur du plexiglas dont le module de Young est connu, et qui sera collé sur un échantillon en acier de construction mécanique de module de Young connu aussi comme montré sur le tableau 1

Tableau 1 : Paramètre de l'échantillon au plexiglas

Longueur (mm)	100,1
Largueur (mm)	23,4
Epaisseur total (mm)	2,67
Epaisseur substrat (mm)	1,46
Charge appliquée (N)	4,905
Module de Young du substrat (MPa)	210000
Module de Young du plexiglas (MPa)	2380

On effectue l'essai de flexion sur l'échantillon (acier-plexiglas); les mesures des déplacements sont montrées sur le tableau 2. Une comparaison est alors faite entre la valeur du module de Young trouvée et celle donnée par la documentation technique. L'erreur doit être insignifiante; elle validera la méthode utilisée.

Tableau 2 : Valeurs des déplacements

Nombre de mesure	Déplacement (mm)	Moyenne des déplacements (mm)
1	1,173	1,171
2	1,287	
3	1,188	
4	1,154	
5	1,146	
6	1,149	
7	1,149	
8	1,147	
9	1,150	
10	1,171	

Après avoir mesuré les déplacements, on donne des valeurs arbitraires au module de Young du plexiglas, et pour chacune de ces valeurs, on calcule y_n , A, et le déplacement $U_y(L)$ à l'aide des équations (9), (12) et (26) respectivement comme montré sur le tableau 3.

Tableau 3 : Calcul du module de Young du Plexiglas

G (MPa)	y_n	A	Déplacement calculé (mm)
2350	0,742267	-1886158,08	-1,17133
2351	0,742272	-1886216,33	-1,1712
2352	0,742277	-1886274,58	-1,17124
2353	0,742282	-1886332,83	-1,17120
2354	0,742288	-1886391,08	-1,17115
2355	0,742293	-1886449,32	-1,1711
2356	0,742298	-1886507,56	-1,17107
2357	0,742303	-1886565,81	-1,17102
2358	0,742308	-1886624,05	-1,17098
2359	0,742313	-1886682,29	-1,17093
2360	0,742319	-1886740,53	-1,17089
2361	0,742324	-1886798,77	-1,17084
2362	0,742329	-1886857	-1,17080
2363	0,742334	-1886915,24	-1,17075
2364	0,742339	-1886973,47	-1,17071

Donc à travers l'expérience on trouve que la moyenne des déplacements mesurés (1,171 mm) coïncide avec celle du déplacement calculé (1,17102 mm) ce qui correspond à un module de Young de 2357 MPa, avec une erreur commise de 0,034 % par rapport à la valeur connue; cela

implique que la méthode appliquée est juste. Après cette vérification sur un matériau dont le module longitudinal est connu, on peut maintenant calculer le module de Young du revêtement NiCrAl-BN projeté par "APS" sur une éprouvette en acier. Avec la même procédure effectuée auparavant, on effectue le même essai de flexion sur un échantillon Acier matériau abrasable dont les caractéristiques sont montrées sur le tableau 4.

Tableau 4 : Caractéristiques de l'échantillon acier-matériau abrasable

Longueur (mm)	41,32
Largueur (mm)	6,675
Epaisseur total (mm)	2,473
Epaisseur substrat (mm)	2
Charge appliquée (N)	4
Module de Young du substrat (MPa)	210000

Avec la même procédure, on effectue l'essai de flexion sur l'échantillon avec matériau poreux abrasable, puis on mesure les déplacements comme montrés sur le tableau 5.

Tableau 5: Déplacements de l'éprouvette avec matériau abrasable par l'essai de flexion

Nombre de mesures	Déplacement mesuré (mm)	Moyenne des déplacements mesurés (mm)
1	0,063	0,06296
2	0,067	
3	0,081	
4	0,084	
5	0,067	
6	0,064	
7	0,062	
8	0,062	
9	0,063	
10	0,061	
11	0,061	
12	0,062	
13	0,061	
14	0,061	
15	0,060	
16	0,060	
17	0,060	
18	0,060	
19	0,060	
20	0,060	
21	0,060	
22	0,060	
23	0,060	
24	0,058	
25	0,060	
26	0,060	

Après avoir mesuré les déplacements de l'échantillon "acier-matériau abrasable", on donne maintenant des valeurs arbitraires du module de Young du revêtement NiCrAl-BN, comme montré sur le tableau 6, jusqu'au

moment où le déplacement théorique calculé $U_{thé}$ correspond à celui mesuré U_{mes} .

Tableau 6 : Correspondance module de Young - déplacement

Module de Young calculé	y_n	A	Déplacement $U_{théo}$
92526	1,11668668	-1337854,32	-0,062962
92527	1,11668782	-1337856,55	-0,062961
92528	1,11668896	-1337858,78	-0,062961
92529	1,1166901	-1337861,01	-0,062961
92530	1,11669124	-1337863,24	-0,062961
92531	1,11669239	-1337865,47	-0,062961
92532	1,11669353	-1337867,7	-0,062961
92533	1,11669467	-1337869,93	-0,062960

A travers le tableau 6, on constate que la valeur du déplacement mesuré (0,062961 mm) coïncide avec un module de Young égale à 92533 MPa ($U_{théo}=0,062961$), c'est ce qui correspond au module de Young du NiCrAl – BN- Polyester.

CONCLUSION

Ce travail est effectué pour faire une approche théorique de l'étude des caractéristiques mécaniques des matériaux abrasables, dont le matériau utilisé ici est le NiCrAl-BN-polyester.

On a alors présenté l'analyse théorique des essais de flexion, qui est ensuite confirmée par l'expérimental, ce qui nous a permis de déterminer une des propriétés mécaniques à savoir le module de Young.

Cette confirmation a été obtenue par le test du substrat revêtu par le plexiglas par une erreur de 0,034 %; cette erreur très infime est due probablement à la fiabilité des mesures et de l'instrument utilisé.

Cette confirmation nous a encouragés à déterminer la valeur très approchée du module de Young du matériau NiCrAl-BN-polyester projeté sur une éprouvette en acier.

Les résultats très satisfaisants confirment que cette méthode de mesure par flexion du module de Young peut être généralisée aux cas où un matériau est fixé sur un support sans avoir recours à la séparation du support et du matériau déposé.

REFERENCES

- [1] M. BOUNAZEF, S. GUESSASMA, EL ABBAS ADDA BEDIA, "Blades protection and efficiency preservation of turbine by a sacrificial material coating", *Advanced Powder Technology*, vol 18, N° 2, April 2007, pp 123-133 (11), Brill Publisher
- [2] M. BOUNAZEF, S. GUESSASMA, B. AIT SAADI, "The Wear, Deterioration and Transformation Phenomena of abrasable Coating BN-SiAl-Bounding Organic element, Caused by the Friction Between the Blades and the Turbine Casing", Reference Number Wi 0813, volume 58, Issues 27-28, pages 3375-3380, November 2004, *Materials letters*.
- [3] H. LIAO H, Z. FENG Z, G.JANDIN G, C. CODDET, "Identification of the Young's modulus of thermally sprayed coatings using a modified cantilever test combined with finite element modelling", Colloque GFAC-SF2M West, March, 22-23, 2001, modified cantilever test combined with finite element modelling,
- [4] H.I. FARAOUN A, J.L. SEICHEPINE, C. CODDET, H. AOURAG, J. ZWICK, N. HOPKINS, D. SPORER, M. HERTTER, "Modelling route for abrasable coatings", Colloque GFAC-SF2M Ouest 22 et 23 mars 2001 modified cantilever test combined with finite element modelling
- [5] J. ALCALA, F. GAUDETTE, S. SURESH, S. SAMPATH, "Instrumented spherical micro-indentation of plasma sprayed coating", *Materials science and engineering, Materials Science and Engineering A, Volume 316, Issues 1-2, 15 November 2001, Pages 1-10.*
- [6] H WANG, "An analysis of turbine blade/abrasable seal rubbing", *Proceedings of the first International Conference on Processing materials for Properties*, Honolulu County, Hawaii, Minerals, Metals and Materials Society, (1993), pages 1085-1088.
- [7] E.R. NOVINSKI, "The design of thermal sprayed abrasable seal coatings for gas turbine engines", *Proceeding of the 4th national thermal spray, conference*, Pittsburgh(PA), (4-10 May, 1991).
- [8] HOUGONG WANG, "Criteria for analysis of abrasable coatings", *Surface and Coatings Technology*, 79, (1996), pages 71-75.
- [9] R.K. SCHMID, F. GHASNIPOOR, M. DORFMAN, X. WIE, "An overview of compressor abrasable thermal sprays", *Surface Engineering International Thermal Spray Conference ITSC*, May 2000, Montreal Canada, Via Applied Research (2000), page 406.