



Cloquage de films minces ductiles sur substrat rigide

Nadia Ben Dahmane, Guillaume Parry, Rafael Estevez

► To cite this version:

Nadia Ben Dahmane, Guillaume Parry, Rafael Estevez. Cloquage de films minces ductiles sur substrat rigide. CFM 2015 - 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. <hal-03444741>

HAL Id: hal-03444741

<https://hal.science/hal-03444741v1>

Submitted on 23 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Cloquage de films minces ductiles sur substrat rigide

Nadia BEN DAHMANE ^{a*}, Guillaume PARRY ^a, Rafael ESTEVEZ ^a

a. Univ. Grenoble Alpes, SIMAP, F-38000 Grenoble, France.

*nadia.ben-dahmane@simap.grenoble-inp.fr

Résumé :

Les revêtements de couches minces à faible énergie d'adhésion soumis à des forces de compression peuvent subir un phénomène de flambage et de délaminage simultané appelé « cloquage ». Le mécanisme de formation et de propagation des rides droites et des cloques circulaires a été largement étudié dans la littérature dans le domaine élastique. Cependant, l'effet de la plasticité dans le film sur la propagation et l'équilibre de telles cloques n'a encore pas été analysée. Dans cette étude, un modèle de plaque géométriquement non linéaire sur un plan rigide couplé à un modèle de zone cohésive pour l'interface a été utilisé pour voir en quoi le développement de plasticité au sein du film modifie l'équilibre de flambage, en particulier dans le cas de la ride droite et de la cloque circulaire.

Abstract :

Compressively stressed thin films with low adhesion frequently buckle and delaminate simultaneously into different shapes including straight and circular blisters. The mechanism of formation and propagation of such blisters in the case of elastic films have been widely investigated. However, up-to-date, no proper study of the effect of plasticity in the propagation and the stability of these blisters has been presented. In this study, we have coupled a geometrically nonlinear plate relying on a rigid plane with a cohesive zone model to simulate the kinematics of blisters propagation. The effect of plasticity have been investigated, with a particular focus on straight and circular blisters.

Mots clefs: Cloquage; films minces; plasticité ; méthode des éléments finis ; stabilité

1 Introduction

Les revêtements de couches minces sont utilisés dans de nombreuses applications de haute technologie, comme les vitrages à basse émissivité ou encore les dispositifs micro-électroniques. Dans le monde industriel, l'élaboration de ces revêtements se fait le plus souvent par voie PVD sur substrat rigide ce qui entraîne généralement l'apparition de très fortes contraintes internes (fréquemment plusieurs GPa) dont l'amplitude des composantes peut largement dépasser la limite élastique. De tels niveaux de contrainte en compression sont alors à l'origine de décollements spontanés, observés parfois même dès la sortie des chambres de dépôt (phénomène appelé « cloquage »).

La pérennité des fonctionnalités induites par ces revêtements nécessitent une maîtrise de la cohésion du dépôt et de son adhérence au substrat pour éviter son cloquage après dépôt ou lors des diverses

sollicitations mécaniques subies en service (traction ou flexion). L'intérêt d'une meilleure compréhension de ces phénomènes d'endommagement est vif dans le monde académique aussi bien que dans le monde industriel, puisque l'amélioration de la tenue mécanique des matériaux revêtus permettra des gains économiques, d'une part en amont avec la réduction attendue des taux de rebus de fabrication qui sont parfois conséquents, et d'autre part en aval du fait de l'allongement de leur durée de vie en conditions de fonctionnement.

2 Etat de l'art

Le phénomène de cloquage repose sur un mécanisme complexe alliant un processus de flambage du revêtement, associé à une décohésion corrélée de l'interface film/substrat. Le phénomène de flambage a été étudié de manière intensive ces dernières années dans le cadre des équations d'équilibre des plaques minces de Föppl-Von Kàrmàn ^[1,2]. Ainsi, il est dorénavant bien établi qu'un revêtement supportant de très fortes contraintes internes peut cloquer au-delà d'une contrainte critique de compression. Le caractère non-linéaire de ces équations rend difficile la résolution analytique permettant de déterminer la déformation hors plan de la cloque au-delà de cette contrainte critique (dans le régime dit « post-critique »), ce même en considérant la zone décollé comme immobile (flambage découplé du délaminage). Pendant de nombreuses années, les seuls résultats d'équilibres post-critiques connus étaient ceux de la ride droite et de la cloque circulaire, aux géométries simples ^[2]. Avec le développement du calcul numérique, le mystère de l'équilibre élastique d'une autre forme de cloque, le « cordon de téléphone » a pu être en partie éclairci. Cet équilibre de flambage représente un intérêt tout particulier dans le domaine du cloquage depuis plusieurs décades, dans la mesure où il est omniprésent sur les systèmes films/substrats. Différentes études ^[3-5] se sont accordées à identifier le cordon de téléphone comme issu du flambage secondaire d'une ride droite. Le véritable mécanisme de formation de ces cordons de téléphone n'a pu être vraiment expliqué que récemment, grâce à l'implémentation numérique d'un modèle couplant une plaque géométriquement non linéaire pour représenter le revêtement et un modèle de zone cohésive pour représenter le comportement mécanique de l'interface. A l'aide d'une loi de « traction-séparation », le modèle de zone cohésive représente l'interaction mécanique à l'interface entre film et substrat, depuis le moment où la couche de revêtement est parfaitement adhérente au substrat jusqu'au moment où elle est complètement séparée de celui-ci ^[7,8]. La prise en compte d'une ténacité de l'interface dépendant de la mixité modale (rapport exprimant la proportion entre cisaillement et effort normal à l'interface) s'est avérée être un point clé dans le mécanisme de formation de ces cordons. Ainsi l'expression de la ténacité popularisée par Hutchinson ^[2] inspirée des résultats expérimentaux de Liechti ^[9] a été choisie. Les résultats des calculs ont pu être comparés de manière très probante aux observations expérimentales. Cette approche a permis de comprendre de manière fine la relation entre épaisseurs du film, contraintes, caractéristiques élastiques et adhésion. Cependant dans le cadre de cette étude, le comportement du film est considéré comme élastique linéaire et le substrat est rigide.

3 Etude réalisée

L'étude réalisée ici vise à modéliser le processus de flambage/décohésion de films minces ductiles sur substrats rigides. Pour cela, on utilise le modèle de plaque géométriquement non linéaire pour le film couplé à un modèle de zone cohésive dépendant de la mixité modale pour l'interface évoqué précédemment. La nouveauté de l'approche réside dans la prise en compte la ductilité du film. L'implémentation numérique par la méthode des éléments finis s'appuie sur le logiciel ABAQUS.

L'idée est d'expliquer les morphologies de cloquage particulières apparaissant sur les films ductiles. Un exemple est donné Fig. 1^[10] où on voit des cloques parfaitement circulaires apparaissant sur un film d'or de 630 nm d'épaisseur déposé sur un substrat de Si. En particulier on peut voir que les conditions d'encastrement habituellement supposées au bord des cloques élastiques déposées sur substrat rigide ne sont pas remplies ici. Il existe une rotation importante à la base de la cloque, vraisemblablement associée à une déformation plastique localisée. Il est intéressant de pouvoir observer une géométrie circulaire dont on sait qu'elle est instable dans le cas d'un film purement élastique sur substrat rigide^[11]. Ainsi notre étude a pour but d'expliquer comment la présence de déformations plastiques dans le film modifie les conditions de délaminage de la cloque, et en particulier comment on peut ainsi aboutir à la stabilisation de l'équilibre de flambage circulaire.

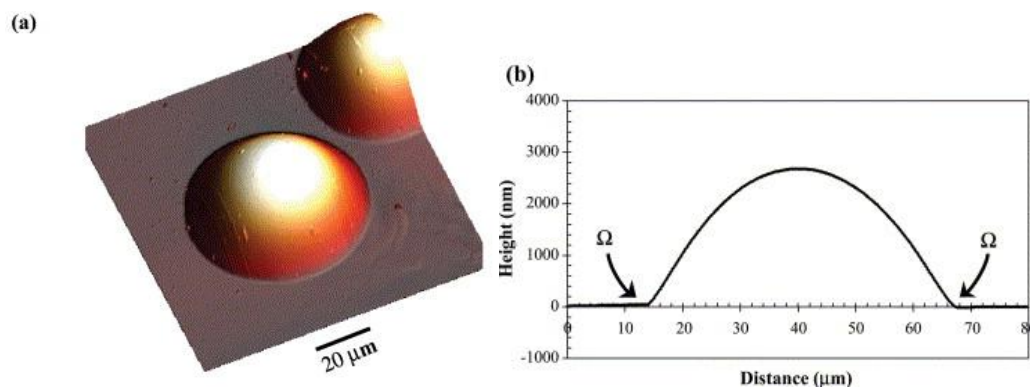


Figure 1 Structures de cloquage observées sur un film d'or de 630 nm d'épaisseur, déposé sur un substrat Si. Une flexion importante Ω de la structure de flambage est observée sur toute la circonférence de la cloque circulaire: (a) image 3D par microscopie à force atomique ; (b) coupe transversale d'une cloque^[10]

On s'intéressera dans un premier temps à l'équilibre dit de « ride droite » (Fig. 2), pour lequel les résultats de l'analyse du flambage élastique par les équations de plaques Föppl Von-Karman[1, 2] sont bien connus. Nous verrons en quoi le développement de plasticité au sein du film lors du délaminage modifie cet équilibre de flambage et comment la mixité modale influence la nucléation et la propagation de la ride droite.

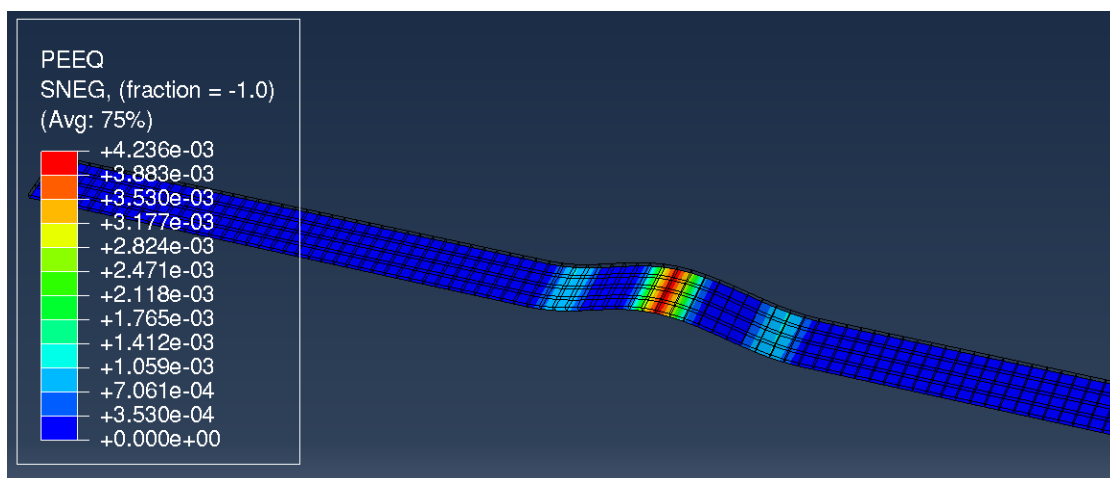


Figure 2 Cloquage en ride droite résultant du délaminage d'un film élasto-plastique sur substrat rigide ($\sigma_{appliquée}=1.5\text{GPa}$, $\sigma_y=2\text{GPa}$). La déformation plastique équivalente est représentée.

Ensuite nous examinerons le cas du flambage du film en cloque circulaire (Fig.3). La propagation et la stabilité de telles cloques ont principalement été étudiées dans le domaine élastique^[11]. Nous nous intéresserons ici principalement à l'étude de l'effet de la plasticité sur le développement et l'équilibre des cloques circulaires.

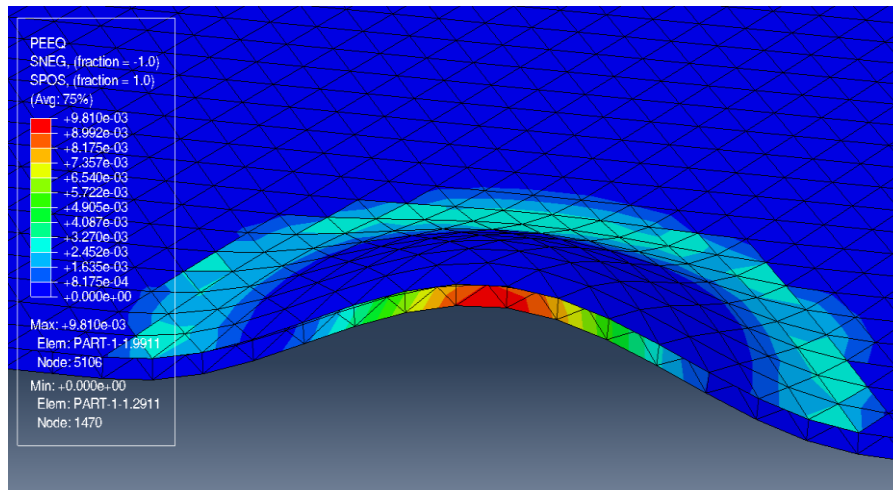


Figure 3 Coupe transversale d'une cloque circulaire se formant par délaminage d'un film élasto-plastique sur substrat rigide ($\sigma_{appliquée}=2.5\text{GPa}$ $\sigma_y=2.6\text{GPa}$, $G_{1c}=1.35\text{J/m}^2$). La déformation plastique équivalente est représentée.

Références

- [1] L.D. Landau, and E.M. Lifchitz, Theory of Elasticity (3rd ed., Pergamon, New York, 1986).
- [2] J.W. Hutchinson, Z.Suo, Adv. in Appl. Mech. 29 (1992) 63.
- [3] G. Parry, A. Cimetiere, C. Coupeau, J. Colin, J.Grilhé, Phys. Rev. E 74 (2006) 066601.
- [4] B. Audoly, Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 4124.
- [5] M. W. Moon, H. M. Jensen, J. W. Hutchinson, K. H. Oh et al., J. Mech. Phys. Sol. 50 (2002) 2355.
- [6] J.-Y Faou, G. Parry, S. Grachev, E. Barthel, PRL, 108, 116102 (2012)
- [7] X. P. Xu and A. Needleman, Model. Simul. Mater. Sci. Eng. 1, (1993) 111.
- [8] V. Tvergaard and J.W. Hutchinson, J. Mech. Phys. Solids 40, (1992) 1377.
- [9] K. M. Liechti and Y. S. Chai, J. Appl. Mech. 59, (1992) 295.
- [10] Coupeau, C., et al. Thin Solid Films 469 (2004): 221-226.
- [11] Hutchinson, J.W., Thouless, M.D., Liniger, E.G, Acta metall. mater., 40, 295-308 (1992).