

Etude probabiliste d'un système embarqué

Probabilistic study of an embedded system

Nadia Saadoune¹, Bouchaïb Radi²

¹ Laboratoire ingénierie management industrielle et innovation, université Hassan premier, alya662@yahoo.fr

² Faculté des sciences et techniques de Settat, Maroc, fsts@uhp.ac.ma

RÉSUMÉ. Les systèmes embarqués peuvent être définis comme des systèmes électroniques et informatiques autonomes qui sont de plus en plus utilisés pour contrôler les systèmes complexes, ils se trouvent dans l'équipement médical, les guichets automatiques, etc. Le test de chute connu sur la dénomination « drop-test » est la méthode la plus utilisée pour l'évaluation de la fiabilité des joints de brasure, en utilisant la description de la procédure du drop test selon le standard JEDEC. Dans cet article, nous présentons une simulation du modèle d'éléments finis pour décrire la déformation des métaux à haute température en utilisant le logiciel de simulation ANSYS. On considère que les paramètres sont aléatoires et on a proposé une étude probabiliste du système mécatronique.

ABSTRACT. Embedded systems can be defined as autonomous electronic and computer systems which are increasingly used to control complex systems, they are found in medical equipment, ATMs, etc. The known drop test on the name « drop-test » is the most used method for assessing the reliability of solder joints, using the description of the procedure of the drop test according to the JEDEC standard [3]. In this article, we present a simulation of finite element model to reflect the maximum deformation due to temperature using the simulation software ANSYS Mechanical. It is considered that the parameters are random and proposed a probabilistic study of mechatronic system.

MOTS-CLÉS. Système embarqué, modélisation, simulation Monte Carlo, RSM.

KEYWORDS. Embedded System, modeling, Monte Carlo simulation, RSM.

1. Introduction

La modélisation est utilisée comme un outil pour expliquer et prédire les phénomènes naturels. La première étape dans le processus de modélisation est basée sur le choix d'une description géométrique de la carte électronique. La seconde étape est la modélisation des forces appliquées à la structure de l'étude. Le logiciel ANSYS a été utilisé comme un outil de simulation pour étudier le comportement des cartes électroniques.

En règle générale, les cycles de température provoquent une déformation plastique dans les joints de soudure des composants de la carte électronique. Le modèle d'Anand [1] a été mis au point pour décrire la déformation des métaux à haute température lorsque les phénomènes visqueux sont activés.

2. Le modèle géométrique

Le circuit imprimé ou PCB (Printed Circuit Board) d'une carte électronique assure deux rôles principaux : le support mécanique des composants et leur interconnexion électrique (figure 2.1). Les composants électroniques peuvent être classés en fonction du mode d'interconnexion entre le composant et le circuit imprimé. Les modes d'interconnexion peuvent être des broches, des pattes, des billes ou assemblage direct (figure 2.2).



Figure 2.1. Circuit imprimé

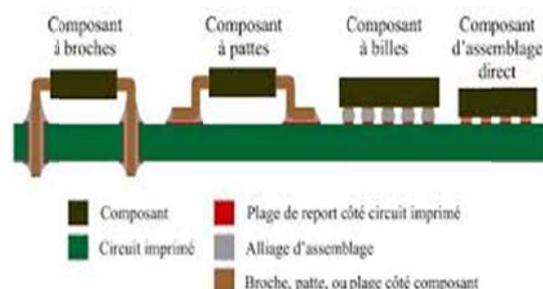


Figure 2.2. Les modes d'interconnexion

2.1. Joints de brasage

L'interconnexion des composants avec le circuit imprimé est assurée par les joints de brasage. Les joints de brasage sont les organes les plus sollicités parmi les trois éléments principaux d'un assemblage électronique (composants, carte nue, joints brasés).

Dans cette étude on a pris le composant à patte, on a fait la construction du modèle géométrique sous le logiciel de simulation numérique ANSYS.

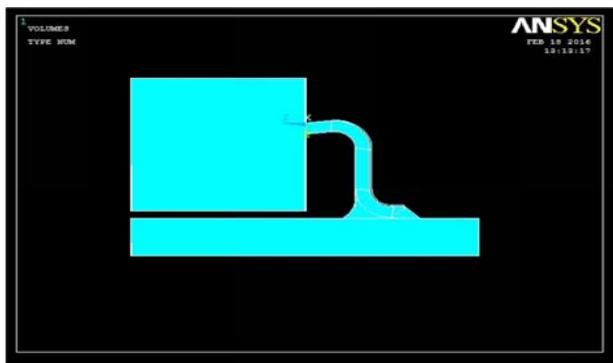


Figure 2.3. *Modèle géométrique*

3. Propriétés des matériaux

Pour l'analyse thermomécanique, le matériau des joints de brasure (SnAgCu) est supposé avoir un comportement viscoplastique. L'un des modèles développés est le modèle d'Anand [1] qui intègre la viscoplasticité et la plasticité dépendant du temps. Ces paramètres sont présentés dans le tableau. 3.1.

Propriétés des matériaux	SAC305	FR4	Cu
Module de Young (GPa)	51.3	17	115
Coefficient de Poisson	0.3	0.3	0.31
Densité (Kg/m^3)	740	180	8890
CTE (K^{-1})	20	18	17

Tableau 3.1. *Propriétés des matériaux*

4. Modèle élément fini

La figure 4 montre le maillage, avec l'élément SOLID70 qui a une capacité de conduction thermique 3-D [13]. L'élément comporte huit nœuds ayant un seul degré de liberté, au niveau de chaque nœud. L'élément est applicable à une analyse thermique 3-D, à l'état stable ou transitoire [13].

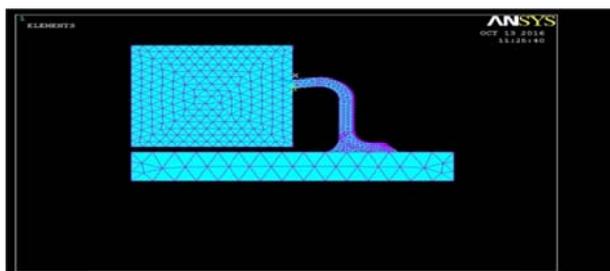


Figure 4.1. *Modèle élément fini*

5. Modélisation des efforts thermique

5.1. La puissance virtuelle des efforts intérieurs

La densité de puissance virtuelle des efforts intérieurs est la forme la plus générale portant sur l'ensemble des variables de v :

$$p^{(i)} = \underline{\underline{\sigma}} : (\underline{\dot{u}} \otimes \underline{\nabla}^c) + \underline{\underline{S}} : (\underline{\dot{u}} \otimes \underline{\nabla}^c \otimes \underline{\nabla}^c) + a^{(i)} \dot{T} + \underline{\underline{b}}^{(i)} \cdot (\underline{\nabla}^c \dot{T}) \quad [1]$$

Les grandeurs duales associées au second gradient de vitesse sont le tenseur des forces contraintes $\underline{\underline{\sigma}}$ et le tenseur dit des hyper contraintes $\underline{\underline{S}}$ ($S_{ijk} = S_{ikj}$) deux grandeurs duales supplémentaires $a^{(i)}$ et $\underline{\underline{b}}^{(i)}$ ont été introduite.

La partie purement mécanique de la puissance des efforts intérieurs est donc complétée par une contribution thermique convective [12].

5.2. La puissance virtuelle des efforts extérieurs

L'expression générale de la puissance des efforts extérieurs est :

$$p^{(e)} = \int_D (\underline{\underline{f}} \cdot \underline{\dot{u}} + \underline{\underline{C}} : \underline{\underline{\Omega}} + \underline{\underline{P}} : \underline{\underline{D}} + \underline{\underline{P}} : (\underline{\dot{u}} \otimes \underline{\nabla}^c \otimes \underline{\nabla}^c) + a^{(e)} \dot{T} + \underline{\underline{b}}^{(e)} \cdot \underline{\nabla}^c \dot{T}) dV \quad [2]$$

où $\underline{\underline{D}}$ et $\underline{\underline{\Omega}}$ sont respectivement les parties symétrique et antisymétrique du gradient de vitesse. Les grandeurs duales introduites sont les forces de volume $\underline{\underline{f}}$, les couples de volumes $\underline{\underline{C}}$ et les doubles forces de volume $\underline{\underline{P}}$, $a^{(e)}$ et $\underline{\underline{b}}^{(e)}$ les forces généralisées.

5.3. Les efforts de Contact

La forme la plus générale de la puissance des efforts de contact apparaît en considérant la forme de la contribution surfacique.

$$P^{(c)} = \underline{\underline{t}} \cdot \underline{\dot{u}} + \underline{\underline{M}} \cdot D_n \underline{\dot{u}} + a^{(c)} \dot{T} \quad [3]$$

où $\underline{\underline{t}}$ est le vecteur contraint, $\underline{\underline{M}}$ une double force normale et $a^{(c)}$ grandeur dual associée à \dot{T} .

6. Conditions aux limites et chargement

Les composants des systèmes embarqués sont soumis à des variations de température dues aux conditions opérationnelles et d'environnement pouvant varier de -40°C à 150°C [9]. Le cycle de température appliqué à la structure est d'une durée de 60 min.

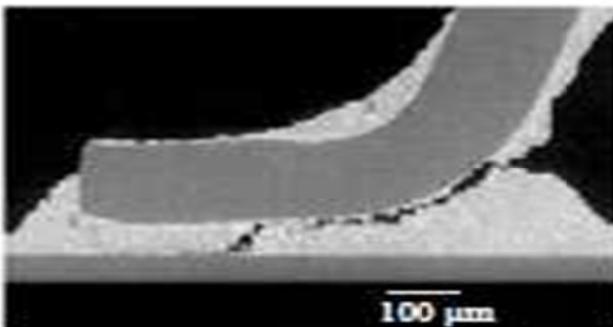


Figure 6.1. Fracture des fils de connexion.

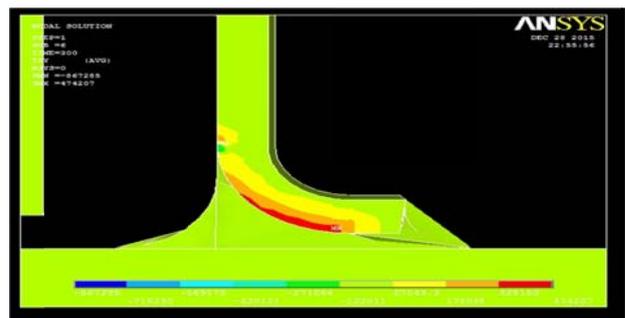


Figure 6.2. Distribution de la déformation inélastique des joints de brasure

La figure 6.2 montre que les cycles de température entraînent une déformation plastique dans les joints de brasure des composants de la carte électronique. Ces déformations plastiques peuvent causer l'initiation de fissures des joints de brasure. Cette rupture entraîne une défaillance mécanique du composant et la défaillance électrique du système électronique complet.

7. Lois de comportement des alliages de type SnAgCu

Deux comportements sont couramment identifiés pour les alliages de brasage :

- Le comportement en fluage ;
- Le comportement viscoplastique.

Ces comportements sont utilisés pour modéliser les brasures sous sollicitations thermomécaniques.

7.1. Comportement en fluage

Deux expressions analytiques modélisant le comportement en fluage :

- Modèle en sinus hyperbolique ;
- Modèle en double loi puissance.

7.1.1. Modèle en sinus Hyperbolique [7]

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = A \left[\sinh(\alpha\sigma) \right]^n \exp\left(\frac{-H_1}{KT}\right) \quad [4]$$

où $\dot{\varepsilon}_{cr}$ Vitesse de déformation en fluage (s^{-1}), α Inverse du niveau de contrainte au changement de pente (MPa^{-1}), σ contrainte (MPa), K constant de Boltzmann ($J.K^{-1}$), T Température (K).

7.1.2. Modèle en Double loi puissance (Norton) [7]

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = A_1 \exp\left(\frac{-H_1}{KT}\right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_n}\right)^{n_1} + A_2 \exp\left(\frac{-H_2}{KT}\right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_n}\right)^{n_2} \quad [5]$$

où A_1, A_2 Constantes du matériau, n_1, n_2 Exposants de viscosité (Sans unité), H_1, H_2 Énergies d'activation (J).

7.2. Comportement viscoplastique

Pour tenir compte du phénomène d'écrouissage d'une part, de la température et de la vitesse de déformation d'autre part plusieurs modèles sont proposés [4] pour les alliages de brasage. Nous citons :

- modèle d'Anand ;
- modèle de Busso.

7.2.1. Modèle d'Anand

Le modèle d'Anand a été développé pour décrire la déformation des métaux à haute température [6]. Ce modèle est disponible sous le logiciel de modélisation par éléments finis ANSYS. La loi d'évolution est décrite par l'équation :

$$\dot{\varepsilon}_p = A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \left[\sinh\left(\xi \frac{\sigma}{s}\right) \right]^{1/m} \quad [6]$$

où $\dot{\varepsilon}_p$ la déformation plastique équivalente, A constant de déformation, Q énergie d'activation, R constante de gaz parfait t, ξ multiplicateur de contrainte, m sensibilité de la contrainte au taux de déformation, s la valeur initiale de la résistance à la déformation.

7.2.2. Modèle de Busso

La loi constitutive est formulée par :

$$\dot{\varepsilon}_p = \dot{\varepsilon}_0 \left(\frac{-F_0}{RT} \left(1 - \left(\frac{|\sigma - B|}{\sigma G / G_0} \right)^p \right)^q \right) \sin(\sigma - B) \quad [7]$$

$\dot{\varepsilon}_p$ la vitesse de déformation plastique, (s^{-1}), $\dot{\varepsilon}_0$ taux de déformation initiale (s^{-1})

L'écrouissage cinématique est introduit par la variable B dont l'évolution dépend de la vitesse de déformation et de la température ($r = f(T)$).

8. Méthodologie de l'approche probabiliste

L'approche probabiliste vise à considérer les incertitudes résultant de la nature aléatoire des fluctuations de la température, des dimensions géométriques d'un assemblage électronique, des propriétés de matériaux. L'assemblage du produit mécatronique peut échouer si ces incertitudes sont ignorées. Nous avons utilisé les méthodes probabilistes pour améliorer la robustesse de la conception et d'estimer l'impact des incertitudes des paramètres sur la réponse du système [2].

8.1. Simulation Monte Carlo (MCS)

Est la méthode la plus commune et traditionnelle pour une analyse probabiliste. Cette méthode nous permet de simuler la façon dont les composants virtuels se comportent et de la façon dont ils sont construits. Une boucle de simulation représente un composant qui est soumis à un ensemble particulier de charges et de conditions aux limites.

8.2. Méthode d'analyse de réponse de surface (RSM)

Méthodes de réponse de surface sont basées sur l'hypothèse fondamentale que l'influence des variables d'entrée aléatoires sur les paramètres de sortie aléatoires peut être approchée par la fonction mathématique. La fonction d'approximation est décrite par :

$$\hat{Y} = C_0 + \sum_{i=1}^{NRV} C_i X_i + \sum_{i=1}^{NRV} \sum_{j=1}^{NRV} C_{ij} X_i X_j \quad [8]$$

où C_0 est le coefficient du terme constant, C_i , $i = 1, \dots, NRV$ sont les coefficients des termes linéaires et C_{ij} , $i = 1, \dots, NRV$ et $j = 1, \dots, NRV$ sont la les coefficients des termes quadratiques[13].

Les paramètres influents comme des variables aléatoires sont classés en trois catégories : paramètres matériaux, géométriques et chargement :

Paramètres aléatoires		Moyenne	Ecart-type	Loi de distribution
Paramètre de Chargement	TF (°C)	125	11.547	Uniforme
Paramètres géométriques	BRAS_EP (mm)	0.125	0.0144	Uniforme
	BRCH_L1 (mm)	0.6	0.0577	Uniforme
	PCB_THICKNESS (mm)	1.555	0.0288	Uniforme
	COMP_THICKNESS (mm)	3.2	0.0577	Uniforme
Parameters des matériaux	Le module d'Young (EX) (GPA)	51.3	7.9	Log-normal
	coefficient de dilatation thermique (CTE)	20	8.3	Log-normal

Tableau 8.1. Variables aléatoires pour l'analyse probabiliste

Dans cette étude on a pris les deux variables aléatoires le module d'Young EX et le coefficient de dilatation CTE. On a étudiée la variation de ces deux coefficients par les deux méthodes probabilistes Monte Carlo et la Méthode d'analyse de réponse de surface (RSM). Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

	simulation Monte Carlo (MCS)			Méthode d'analyse de réponse de surface (RSM)		
	initiale	Finale		initiale	finale	
		Max	Min		Max	Min
module d'Young (EX) (GPA)	51.3	51	43.1	51.3	50	31.6
coefficient de dilatation thermique (CTE) (K^{-1})	20	19	11.7	20	19.4	18.5

Tableau 8.2. Variation des variables aléatoires pour l'analyse probabiliste

On constate que le module d'Young varie entre 43.1 et 57.6 pour la simulation Monte Carlo et varie entre 31.6 et 53.1 pour la méthode probabiliste RSM, ainsi pour le coefficient de dilation varie entre 11.7 et 23.8 pour la simulation Monte Carlo et varie entre 19.4 et 23.5 pour la méthode probabiliste RSM.

Bibliographie

- ANAND L., "Constitutive Equations for the Rate-Dependent Deformation of Metals at Elevated Temperatures", Transaction of the ASME, vol. 104, p. 12-17, 1982.
- ASSIF S., AOUES Y., AGOUZOL M., EL HAMI A., Modèle numérique pour la simulation probabiliste de la fatigue des joints de brasure des composants électroniques embarqués, journées d'études techniques (JET'2012), Marrakech, Maroc, Mai 2012.
- SAMED BARNAT., predictive reliability study of new concepts assembly for "system -in -package" heterogeneous. UNIVERSITY BORDEAUX I, thesis in March 2011.
- BUSSO E.P., KITANO M., Modeling Complex Inelastic Deformation Processes in IC Packages' Solder Joints, Transaction of the ASME, vol. 116, p. 6-15, 1994
- MAURO CIAPPA., Selected failure Mechanisms of modern power modules. Microelectronics Reliability, vol. 42, p. 653-667, 2002.

- BENEDICT DOMPIERRE., mechanical reliability of electronic assemblies using alloys of SnAgCu kind. CENTRAL SCHOOL OF LILLE, thesis in March 2011.
- Mr. GRIEU., Study of fatigue of solder joints of components Electronic subjected to vibration and combined thermomechanical stresses. National School of Mines of Paris, PhD. La France. December 2010.
- « Board level drop test Method of components for handheld Electronic products ». JESD22-B111, JEDEC solid state technology association, July 2003, p. 7-22.
- JEDEC STANDARD, Temperature cycling, JESD22-A104-B. JEDEC.
- LEMAITRE J., CHABOCHE J.L., Mechanics of materials solid, 2nd edition, Wiley, ISBN 2-10-001397-1, p. 539, 1996
- ALEXANDRE MICOL, Probabilistic approach in the design of power modules. UNIVERSITY Toulouse III - Paul Sabatier, PhD Ph.D., December 2007.
- Milieux continus généralisés et matériaux hétérogènes Broché – Presses de l'Ecole des Mines Collection : Sciences de la matière ISBN-10 : 2911762673 ISBN-13 : 978-2911762673, 13 avril 2006.
- Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, Class material for short course for ANSYS (7.0) in Mechanical Engineering Department, October 2003.