



HAL
open science

Analyse fiabiliste du comportement visco-plastique des brasures de modules IGBT

Alexandre Micol, Carmen Martin, Olivier Dalverny, Michel
Mermet-Guyennet, Moussa Karama

► **To cite this version:**

Alexandre Micol, Carmen Martin, Olivier Dalverny, Michel Mermet-Guyennet, Moussa Karama.
Analyse fiabiliste du comportement visco-plastique des brasures de modules IGBT. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01508942

HAL Id: hal-01508942

<https://hal.science/hal-01508942>

Submitted on 15 Apr 2017

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.

Public Domain

Analyse fiabiliste du comportement visco-plastique des brasures de modules IGBT

A. MICOL * — **C. MARTIN** * — **O. DALVERNY** * — **M. MERMET-GUYENNET** ** — **M. KARAMA** *

* *Laboratoire de Génie de Production*
47, av d'Azereix BP 1629
F-65016 Tarbes
alexandre.micol@enit.fr

** *Power Electronics Associated. Research Laboratory*
rue du docteur guinier BP 4
F-65600 Semeac
michel.mermet-guyennet@transport.alstom.com

RÉSUMÉ. Le mode de défaillance principal des modules de puissance IGBT est la fatigue thermique des joints de soudure. L'échauffement thermique provoque des contraintes mécaniques dues aux différents coefficients de dilatation thermique des matériaux mis en jeu. La durée de vie en fatigue, liée à l'énergie non élastique dissipée pendant un cycle, dépend fortement de la forme géométrique des brasures, du comportement non linéaire et de la charge appliquée. Les méthodes fiabilistes sont donc appliquées ici avec les méthode de réponse de surface et de réseaux de neurones.

ABSTRACT. The major failure mode of power IGBT is the thermal fatigue of the solder joints. The thermal heating induces mechanical constraints due to the various coefficients of thermal expansion of different materials. The life in fatigue, bound to the non-elastic energy dissipated during a cycle, depends strongly on the geometrical shape of solder, on the non-linear behaviour and on the applied load. The reliability methods are then applied here with response surface method and neural networks

MOTS-CLÉS : IGBT, module de puissance, fiabilité, FORM, bump, brasure Sn/Ag

KEYWORDS: IGBT, power module, reliability, FORM, bump, Sn/Ag solder

1. Introduction

Les méthodes de fiabilité consistent à déterminer la probabilité de défaillance d'un système à l'aide d'une formulation aléatoire des données du problème et de la modélisation du mode de défaillance par une fonctionnelle. En considérant ces entrées comme des variables aléatoires, il est alors possible de calculer la probabilité de défaillance du système par la relation :

$$P_f = \int_{G(\{X\}) \leq 0} f_{\{X\}}(\{x\}) dx_1 \dots dx_n \quad [1]$$

où le vecteur X est constitué des différentes variables aléatoires d'entrée du modèle, f la densité conjointe des variables et $G(X)$ est une fonction modélisant le mode de défaillance en étant négative dans le domaine de défaillance : $G(X) \leq 0, \forall X \in$ domaine de défaillance. La résolution de cette intégrale peut être faite par intégration analytique dans des cas simples, par méthode d'approximation FORM/SORM ou par méthode de simulation (Monte-Carlo) qui sont en général à rejeter dans la cas d'analyse par Elements Finis. Le schéma des méthodes d'approximation consiste à transformer les variables dans l'espace centré normé afin de rechercher le point de défaillance le plus probable grâce au méthode d'optimisation sous contrainte (iHLRF)(Rackwitz *et al.*, 1978) (Liu *et al.*, 1991). La surface d'état limite est estimée par un hyper plan tangent (ou surface quadratique pour la méthode SORM) pour calculer la probabilité de défaillance par la relation :

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad [2]$$

où β est noté indice de fiabilité et où Φ est la fonction de répartition normal centré réduite. Nous appliquons dans cet article ces méthodes aux modules de puissance utilisés dans la traction ferroviaire afin de redresser le courant continu pour l'alimentation des moteurs électriques. Un nouveau type de connexion inspiré de la technologie flip-chip a été mis au point afin d'alimenter les puces via des bumps, insert de cuivre soudé sur le composant à l'aide de brasure Sn96.5/Ag3.5. La figure 1 présente la modélisation E.F du sandwich réalisé afin de former le switch élémentaire : la puce IGBT est soudé au substrat AlN inférieur à l'aide de préforme de brasure tandis que le deuxième substrat est soudé par les connexions bumps.

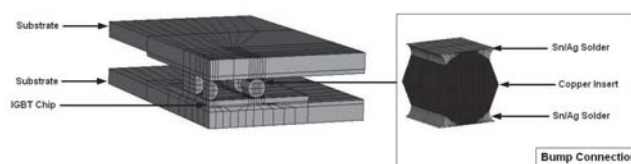


Figure 1. *Modèle éléments finis*

2. Méthode de fiabilité

Dans la plupart des problèmes, la forme explicite de G n'est pas disponible et seul des réalisations ponctuelles de celle-ci peuvent être évaluées par des moyens numériques, le plus souvent par les éléments finis. Deux solutions sont alors envisageables. La première par couplage direct où l'évaluation des gradients de la fonction G nécessaires aux méthodes d'optimisation se fait par différences finies : le code fiabiliste appelle donc le solveur numérique pour les évaluations de G nécessaires. La deuxième consiste à formuler une représentation équivalente de la fonction d'état limite. La première solution, utilisant la différenciation par différences finies, peut poser quelques problèmes dans le cas de la mécanique non linéaire (Micol *et al.*, 2006) où le calcul de gradient peut être entaché d'erreur. Il est intéressant d'étudier alors des formulations capables d'accepter une erreur de précision sur les calculs, et donc de gagner du temps sur l'intégration numérique des lois non linéaires. Nous étudierons ici deux solutions afin de modéliser $G(X)$: Les réponses de surfaces et les réseaux de neurones.

La méthode de surface de réponse consiste à approximer la fonction d'état limite par une représentation analytique $G = G(p)$ fonction de paramètres $p_i, i = 0, \dots, k$ à identifier. La forme de la fonction n'étant souvent pas connue a priori, les polynômes sont souvent utilisés. Les observations $y_i, i = 1, \dots, n$ permettant d'identifier les paramètres p forment alors la matrice d'expérience Γ :

$$y = \Gamma p + \varepsilon \quad [3]$$

où $\varepsilon_i, i = 1, \dots, n$ représente l'erreur sur les simulations des expériences. La détermination des coefficients du système [3] est faite par les méthodes de moindres carrés en minimisant la fonction :

$$L(p) = \|y - \Gamma p\|^2 \quad [4]$$

Ceci peut se faire soit au moyen de l'inverse généralisée pour un système linéaire par rapport aux coefficients à déterminer. La solution du système est alors :

$$p = (\Gamma^T \Gamma)^{-1} \Gamma^T y \quad [5]$$

Si la fonction n'est pas linéaire, l'algorithme de Levenberg-Marquardt est utilisé pour évaluer la solution 4 en normant les entrées ainsi que les sorties par rapport à leurs maximums. Les coefficients de régression multiple (R^2) et multiple ajusté (R_{adjust}^2), prenant en compte les degrés de liberté du modèle pour ne pas voir l'indicateur augmenter avec l'ajout de variables, sont des mesures permettant de traduire la variance expliquée par le modèle :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \text{ et } R_{adjust}^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - p - 1)}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2 / (n - 1)} \quad [6]$$

où y_i, \bar{y}, n sont respectivement la sortie réelle de l'expérience i , la moyenne des différentes expériences et le nombre d'observation. L'algorithme démarre la régression

avec un nombre d'expériences égal au nombre de paramètres à évaluer : le degré de liberté du résidu est alors égal à 0. L'identification des paramètres est possible mais de pauvre qualité. L'algorithme continue ces tirages jusqu'à obtenir un coefficient de régression supérieur à 0.9 garantissant un modèle apte à simuler correctement la sortie réelle. Sur la même régression, l'algorithme de Levenberg-Marquardt est plus efficace que l'inverse généralisée et arrive à dépasser cette valeur avec moins d'observations. Une stratégie de clustering est ici adoptée où chaque nouvelle expérience est envoyée sur un noeud inoccupé. Une optimisation est faite à chaque retour de calcul et le point de conception estimé est envoyé pour évaluation. Le taux de parallélisation sur ce problème basique (calcul indépendant entre eux) est alors maximal par rapport à une analyse par couplage direct : Le calcul des gradients peut être parallélisé mais l'algorithme est obligé d'attendre l'évaluation de tous les gradients pour déterminer la direction d'avance.

2.1. Application des méthodes fiabilistes aux modules de puissance

Les brasures Sn/Ag ont un comportement elasto-visco-plastique. Le module de Young est pris dépendant de la température par la relation $E = E_0 - E_1 T(^{\circ}C)$ (avec $E_0 = 50.15$ GPa et $E_1 = 1.5$ GPa). Le comportement visqueux est modélisé par la fonction puissance (Wiese *et al.*, 2002) dont la loi et les paramètres sont énoncés dans le tableau 1.

loi de puissance : $\dot{\epsilon}_{cr} = A.(B\sigma)^n \cdot \exp\left(\frac{-Q}{k.T}\right)$				
Coefficients	$A(s^{-1})$	B	$n(MPa^{-1})$	$Q(kJ/mol)$
Sn/Ag	$3.5 \cdot 10^{-06}$	1.	11.	79.8

Tableau 1. Loi de comportement pour la brasure Sn/Ag

Le comportement plastique se fait au moyen d'une loi bi-plastique. La fonction d'état limite modélise la fatigue des brasures au cours du temps. Le modèle évaluant la durée de vie en fatigue des joints de brasure est basée sur la loi de Coffin-Manson et considère la taux de déformation inélastique sur un cycle de chargement (Kanchanmai *et al.*, 2002). La fonction d'état limite se définit alors de sorte à devenir négative si un nombre voulu de cycle n'est pas atteint :

$$G(X) = C \Delta \varepsilon_{in}^n - N_{f_{target}} \quad [7]$$

Les différentes variables aléatoires considérées en entrée du modèle sont représentées dans le tableau 2. Les deux premiers moments du module de Young à température ambiante ont été identifiés par nano-indentation et de l'épaisseur e par analyse de micro-section. Les écarts-type des autres variables est fixé a priori avec un coefficient de variation de 20%. L'analyse de sensibilité devra en outre mettre en évidence les variables prépondérantes pour le mode de défaillance afin d'effectuer les identifications nécessaires.

Variabiles aléatoires	distribution	moyenne	écart-type
$x_1 = \text{Sn/Ag CTE}$	log-normal	2.10^{-5}	1.10^{-6}
$x_2 = E_0$	log-normal	50150.	5940.
$x_4 = \text{flux}$	normal	0.01	0.001
$x_5 = e$	log-normal	12	6
Paramètres de la loi de comportement			
$x_3 = n$	log-normal	11.	0.2
$x_6 = A$	log-normal	11.	0.2

Tableau 2. Variables aléatoire pour l'analyse thermo-mecanique

L'analyse de fiabilité est réalisée pour différentes formes de fonction de réponse de surface et régressée par l'algorithme de Levenberg-Marquardt : linéaire, quadratique et augmenté d'un exposant, ainsi que pour un réseaux de neurones comportant une couche cachée de 5 neurones.

Type de fonction	R^2	R_{ajust}^2	RSS
<u>linéaire :</u> $P_0 + \sum_{i=1}^m P_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m P_{ij} x_i x_j$	0.89	0.78	192.10^6
<u>quadratique :</u> $P_0 + \sum_{i=1}^m P_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m P_{ij} x_i x_j$	0.97	0.92	48.10^6
<u>quadratique puissance :</u> $(P_0 + \sum_{i=1}^m P_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m P_{ij} x_i x_j)^k$	0.99	0.99	$1.6.10^6$
<u>réseaux de neurones :</u> 5 neurones cachés, 1 couche cachée	0.99	0.99	0.00301

Tableau 3. Analyse de variance pour différente forme de surface de réponse et pour le réseau de neurones

Le tableau 3 récapitule les différents coefficients de régression trouvés pour chaque réponse de surface sur le même plan d'expériences ainsi que le résidu (RSS) de la régression. La sortie inélastique du modèle étant transformé par la la relation de Coffin-Manson, les réponse de surface auxquelles un exposant k est ajouté approxime plus correctement la sortie. Les réseaux de neurones sont un excellent moyen pour passer sur tous les points du plan d'expérience mais ils sont inaptes à intégrer les erreurs ε du modèle par manque de points. Le calcul des gradients est alors plus mauvais entre les points qu'une forme analytique de la solution. Une différence est alors constaté sur l'analyse de sensibilités en figure 2 et 3, le point de défaillance le plus probable n'étant pas le même entre les deux méthodes.

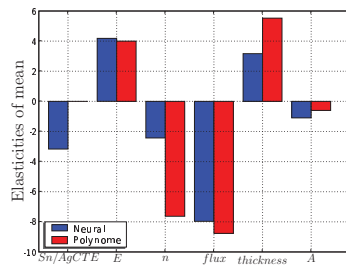


Figure 2. *Elasticités des variables aléatoires par rapport à la moyenne pour les différentes méthodes.*

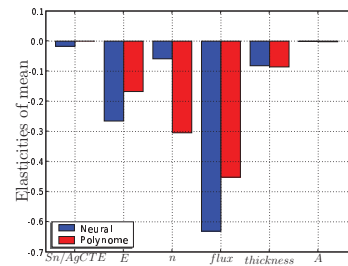


Figure 3. *Elasticités des variables aléatoires par rapport à l'écart-type pour les différentes méthodes.*

3. Conclusion

Cette analyse met en évidence l'importance du chargement thermique sur la probabilité de défaillance alors que sa dispersion est prise faible : celle ci correspond à des valeurs sur des essais accélérés, une variation sur le chargement induit alors une accélération rapide de la fatigue. La variabilité sur les matériaux met en évidence l'importance qui doit être portée sur l'indentification du facteur de puissance dans les lois de comportement. L'analyse fiabiliste pour cas de mécanique non linéaire est optimisée pour la méthode de réponse de surface. Il peut certes y avoir des indicateurs meilleurs que le coefficient de régression pour évaluer la pertinence du modèle. La qualité de l'assemblage est aussi mise en avant par l'influence de l'épaisseur de brasure entre l'IBGT et le plot en cuivre : cette zone fortement contrainte est soumise à une fatigue importante. L'analyse peut être poussée dans cette voie en modélisant la forme de la brasure par résolution de l'équation d'énergie interne en phase liquide.

4. Bibliographie

- Kanchanomai C., Yamamoto S., Miyashita Y., Muthoh Y., Mcevely A. J., « Low cycle Fatigue Test for Solders Using Non-contact Digital Image Measurement System », *International Journal of Fatigue*, vol. 24, n° 1, p. 57-67, January, 2002.
- Liu P., Der Kiureghian A., « Optimization algorithms for structural reliability », *Struct. Safety*, vol. 9, n° 3, p. 489-94, 1991.
- Micol A., Karama M., Dalverny O., Martin C., Mermet-Guyennet M., « Reliability Design of Power Modules Using Probabilistic Approaches », in , B. H. V. Topping, , G. Montero, , R. Montenegro (eds), *Proceedings of the Eighth International Conference on Computational Structures Technology*, Civil-Comp Press, 2006.
- Rackwitz R., Fiessler B., « Structural reliability under combined load sequences. », *Comput. Struct.*, vol. 9, p. 489-94, 1978.
- Wiese S., Feustel F., Meuse E., « Characterisation of constitutive behaviour of SnAg, SnAgCu and SnPb solder in flip chip joints », *Sensors and Actuators*, vol. 99,, n° 1-2, p. 188-193, April, 2002.