LIS

Laboratoire d'ingé
des systèmes de Vers

PROJET ISA - FIABILITÉ MÉCATRONIQUE

Fiabilité dans l'électronique de puissance

La fiabilité des systèmes électroniques est un sujet d'actualité majeur pour des raisons de sécurité et d'économie. Les approches de modélisation numérique se sont largement développées notamment depuis la dernière décennie, et sont devenues un outil incontournable dans le monde industriel pour prédire la durée de vie des produits. L' objectif de cette action de recherche est de modéliser par éléments finis le phénomène de fissuration causé par la fatigue thermomécanique et de prédire la durée de vie du module de puissance IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) utilisé pour les véhicules électriques et hybrides (Fig. 1).

Dans le cas étudié, un module simplifié de puissance est constitué d'un substrat permettant de dissiper la chaleur et d'assurer la tenue mécanique avec la puce en silicium. Cette dernière est brasée sur le dessus du substrat (Fig. 2). Les différentes interfaces constituées des joints brasés sont davantage concernées par la fatigue thermomécanique en raison des différences de coefficient de dilatation thermique entre les divers matériaux. On peut aussi évoquer ici les mécanismes de défaillance touchant

les connexions supérieures (décohésion des fils ou rupture du talon) comme mis en évidence dans des études antérieures (Fig. 3a). Concernant la brasure, la résistance mécanique du matériau se dégrade au cours du cyclage thermique ; ce qui conduit à l' amorçage, puis la propagation de la fissure (Fig. 3b). La modélisation de la défaillance dans ce cas implique de prendre en compte plusieurs couplages, électrique-thermique et thermique-mécanique.

Fig. 1 : *Exemple d'architecture de véhicule électrique*

Fig. 2 : *Schématisation d'un module de puissance*

(a) (b)

Fig. 3 : *a) Rupture au niveau du talon du fil de bonding , b) Fissure de fatigue au niveau de l'interface puce/brasure*

En tenant compte du mécanisme de fissuration interfaciale, nous avons adopté la méthode à zone cohésive, une des méthodes largement utilisée en mécanique numérique. Elle est basée sur la mécanique de l'endommagement et de la rupture. Le modèle à zone cohésive relie les contraintes aux sauts de déplacement à travers une interface le long de laquelle la fissure peut se propager. Cette méthode permet d' envisager des situations mécaniques complexes, par exemple celle de matériaux multiphases, la mixité des modes de sollicitation, etc., tout en permettant une description fine des mécanismes physiques à l'échelle locale au niveau de la pointe de fissure. La loi de traction-séparation du modèle à zone cohésive pour le cas d'un chargement cyclique n'est pas disponible dans les codes de calcul commerciaux. En revanche, il est possible de l'implémenter sous la forme d'une subroutine dans un code de calcul. Concernant les contributions apportées dans le cadre de ces travaux, on peut répertorier les points suivants :

- La température de fonctionnement est élevée par rapport à la température de fusion des brasures. Dans ce cas là, au cours du cyclage thermique, les propriétés mécaniques, par exemple l'énergie critique de rupture, changent en fonction du niveau de température. Ces éléments ont été incorporés dans le modèle de prédiction.

- Pour des brasures de l'électronique de puissance sous fatigue thermomécanique, les contraintes d'ouverture (Mode I) ne sont pas négligeables devant les contraintes de cisaillement (Mode II) au niveau de la pointe de fissure. Le mode mixte I-II a été pris en compte pour reproduire plus fidèlement le mécanisme de fissuration.

- La prise en compte d'autres phénomènes physiques a été également mise en œuvre. Par exemple, après la rupture de la matière, la conduction de la chaleur générée par la puce vers le substrat peut être fortement réduite si la fissure s'ouvre. La présence de la fissure perturbe donc le champ de température, ce qui influe sur l'état de contrainte et par conséquent sur la durée de vie. Un modèle à zone cohésive associant une conductance thermique dégradable a été implémenté pour décrire ce phénomène (Fig. 4).

Fig. 4 : *Champ de température au voisinage de l'interface puce/brasure au cours de la fissuration*

Une autre approche abordée dans le cadre de ces travaux est basée sur l'énergie dissipée dans le matériau au cours de cyclage. Dans ce cadre, le modèle de fatigue de Darveaux, associé à une loi de comportement viscoplastique, est utilisé. Ce modèle de fatigue est basé sur la mécanique de l'endommagement continu. L'initiation et l'évolution de l'endommagement sont régies par la densité de l'énergie dissipée pendant un cycle stabilisé. A l'issue de ces travaux de recherche, quelques outils numériques adaptés sont disponibles pour traiter des problèmes de fissuration dans le cadre d'un chargement de fatigue thermomécanique avec la méthode à zone cohésive ou l'approche de l' endommagement continu (Fig. 5).

Fig. 5 : *Simulation de la propagation de la fissure en fonction du nombre de cycles de puissance*