

Lifetime Modelling of Large Area Solder Joints in Power Electronic Inverter Units

Dissertation to
obtain the academic degree of
Doctor of Engineering (Dr.-Ing.)
from the Faculty of Computer Science
and Electrical Engineering at the
University of Rostock



Submitted by

Allen Jose George, born on 10.11.1987 in Wynad, India
from Munich, Germany

Rostock, July 26, 2021

Abstract

Power electronics (PE) modules in inverter units are a critical part of the Hybrid/Electric vehicles (H/EV) drivetrain as they carry out the important function of power conversion and form the interface between the batteries and the electric motors while driving. The amount of power converted in modern H/EVs is already in the range of hundreds of kilowatts. Consequently, heat generation due to energy loss during the power conversion process is a significant risk as it could lead to device failure due to overheating. The generated heat is usually dissipated via a liquid cooled heat sink called the baseplate. The joining of the baseplate and the PE module is conventionally carried out through processes such as lamination or through thermal interface greases or glues. But as cooling requirements are increasing as a result of devices performing at increasingly higher power ratings, these methods are proving to be no longer sufficient and are being replaced by metallic solders (baseplate soldering) as they offer significantly better thermal conductivity. However, like other interconnect technologies, during reliability tests such as in passive temperature cycling (pTC), the joint between the power module and the baseplate develops cracks at/near the solder-intermetallic compound (IMC) interface. Such cracks increase thermal resistance between the baseplate and the power module and consequently increases the risk of overheating and device failure.

Given that the cracks observed in this research work were found to develop at/near the solder-IMC interface, a study on the IMC layer thickness was carried out. Variations in the growth characteristics of the IMC thickness with different solder profiles and different isothermal ageing conditions was investigated. Additionally, a method for transferring IMC growth results from isothermal ageing to non-isothermal ageing conditions was provided which enables the prediction of IMC thickness under pTC. Subsequently, the influence of IMC thickness on solder joint reliability was assessed through Finite Element Method (FEM) simulations. A detailed reliability investigation was carried out on multiple physical variants of the PE module-baseplate assembly. These variants were aged under three different temperature cycling profiles. Using this, key influence parameters with respect to reliability were uncovered. The experiments were replicated in FEM simulations with identical geometry and loading conditions. The FEM simulations provide an innovative method to account for the thermomechanical stresses induced during the manufacturing process of the PE module substrates, baseplate soldering and temperature cycling in a single simulation. A stress triaxiality and inelastic strain based FEM damage parameter was also formulated which showed excellent correlation with experimental results.

Zusammenfassung

Leistungselektronik (PE) Module in Wechselrichtereinheiten sind ein kritischer Teil des Antriebsstrangs von Hybrid-/Elektrofahrzeugen (H/EV), da sie die wichtige Funktion der Leistungsumwandlung übernehmen und bilden die Schnittstelle zwischen den Batterien und den Elektromotoren während der Fahrt. Die umgewandelte Leistung in modernen H/EVs liegt bereits im Bereich von Hunderten von Kilowatt. Die Wärmeentwicklung durch Energieverluste bei der Leistungsumwandlung, stellt hierbei ein erhebliches Risiko dar, da es zu Geräteausfällen durch Überhitzung führen kann. Die erzeugte Wärme wird in der Regel über einen flüssigkeitsgekühlten Kühlkörper, die sogenannte Grundplatte, abgeführt. Die Verbindung der Grundplatte mit dem PE Modul erfolgt typischerweise durch Wärmeleitfolie, Wärmeleitpasten oder Klebstoffe. Da die Anforderungen an die Kühlung durch immer leistungsstärkere Geräte steigen, reichen diese Methoden nicht mehr aus und werden durch metallische Lote (Grundplattenlötungen) ersetzt, da diese eine deutlich bessere Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Wie bei anderen Verbindungstechnologien kommt es jedoch bei Zuverlässigkeitstests, z. B. bei passiven Temperaturwechseln (pTC), zu Rissen in der Verbindung zwischen dem Leistungsmodul und der Grundplatte im Bereich der Grenzfläche zwischen Lot und intermetallischer Phase (IMC). Solche Risse erhöhen den Wärmewiderstand zwischen der Grundplatte und dem Leistungsmodul und erhöhen somit das Risiko einer Überhitzung und eines Geräteausfalls.

Aufgrund der in dieser Forschungsarbeit beobachteten Rissbildung im Bereich der Lot-IMC-Grenzfläche wurde eine Studie zur IMC-Schichtdicke durchgeführt. Variationen in den Wachstumscharakteristika der IMC Dicke bei verschiedenen Lotprofilen und unterschiedlichen isothermen Alterungsbedingungen wurden untersucht. Zusätzlich wurde eine Methode zur Übertragung der IMC Wachstumsergebnisse aus der isothermen Alterung auf nicht-isotherme Alterungsbedingungen bereitgestellt, die die Vorhersage der IMC Dicke unter pTC ermöglicht. Anschließend wurde der Einfluss der IMC Dicke auf die Zuverlässigkeit der Lötstelle durch Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) bewertet. Eine detaillierte Zuverlässigkeitsuntersuchung wurde an mehreren Konstruktionsvarianten des PE Moduls und der Grundplatte durchgeführt. Diese Varianten wurden unter drei verschiedenen Temperaturwechselprofilen gealtert. Auf diese Weise wurden wichtige Einflussparameter in Bezug auf die Zuverlässigkeit aufgedeckt. Die Experimente wurden in FEM-Simulationen mit identischen Geometrien und Belastungsbedingungen nachgebildet. Die FEM-Simulationen stellen eine innovative Methode dar, um die thermomechanischen Spannungen, die während des Herstellungsprozesses der Leistungselektronik Substrate, des Lötens der Grundplatte und der Temperaturzyklen entstehen, in einer einzigen Simulation zu berücksichtigen. Außerdem wurde ein auf Spannungstriaxialität und inelastischer Dehnung basierender FEM-Schadensparameter formuliert, der eine ausgezeichnete Korrelation mit experimentellen Ergebnissen zeigte.