

Teilprojekt A5/Arbeitskreisgruppe

Kompensationsmethoden

Titel

Einfluss der Fest-Flüssig-Reaktionen im Lötspalt auf
Lötguteigenschaften und Präzision

Projektleitung/-bearbeitung

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Bobzin, Kirsten

Projektbearbeitung: M. Sc. Schmidt, Alexander

Institut für Oberflächentechnik (IOT)

Aufgabenstellung

Im Jahr 2017 bestanden die Ziele in der Methodenentwicklung zur in-situ-Untersuchung der Lötgutausbildung sowie Analyse des Einflusses der Lötprozessparameter auf Diffusionsvorgänge und Phasenbildung im Lötgut.

Vorgehensweise

Diese Ziele wurde durch Kooperationen mit den Teilprojekten TP A6 (Analytik) und TP B7 (Simulation) erreicht, durch die alle relevanten Schwerpunkte des SFB abgedeckt wurden. Dabei wurde ein iterativer Ansatz, bestehend aus thermodynamischen Berechnungen, in-situ-Prozessüberwachung im Großkammer-REM sowie anwendungsnahen Lötversuchen, verfolgt, um die Präzision von Lötverbindungen aus $\text{Al}_7\text{Si}_{0,3}\text{Mg}$ -Grundwerkstoff mit einem SnCu-Lot zu erhöhen. Dazu wurden in Kooperation mit TP A6 bis dato weltweit einzigartige in-situ-Benetzungsversuche von SnCu-Loten auf $\text{Al}_7\text{Si}_{0,3}\text{Mg}$ -Substraten im Großkammer-REM durchgeführt. Anschließend wurden basierend auf den Ergebnissen der Benetzungsversuche Fügeverbunde hergestellt, um die Entstehung des Lötgutes aus der Wechselwirkung zwischen dem Grundmaterial $\text{Al}_7\text{Si}_{0,3}\text{Mg}$ und dem Lot 78Sn22Cu zu untersuchen. Dafür wurden Fügeverbindungen bei unterschiedlichen Haltezeiten und Löttemperaturen, unter- und oberhalb sowie bei der zuvor ermittelten Benetzungstemperatur, gelötet und die Fügezone mithilfe von REM-Untersuchungen analysiert. Parallel dazu

wurden thermodynamische Berechnungen auf Basis einer CALPHAD-Datenbank in Kooperation mit TP B7 angestellt, um die Ergebnisse der Benetzungs- sowie Lötversuche besser zu verstehen bzw. evaluieren zu können.

Ergebnisse

Bild 1 a) zeigt das anfängliche Aufschmelzen und Zusammenziehen des Lotes bei einer Temperatur von $T = 240\text{ °C}$, bei der noch eine oberflächliche Schicht aus Aluminiumoxid die Benetzung des Grundwerkstoffs verhindert. Bild 1 b) kann entnommen werden, dass bei einer Temperatur von $T = 330\text{ °C}$ der Lottropfen komplett ausgebildet ist, ohne den Grundwerkstoff zu benetzen. Ab einer Temperatur von $T = 390\text{ °C}$ wird die Aluminiumoxidschicht des Substrats durch thermische Eigenspannungen aufgebrochen. Durch die entstehenden Risse findet in einem ersten Schritt eine selektive Benetzung entlang von Si-Phasen im Grundwerkstoff statt, wodurch die Aluminiumoxidschicht durch das flüssige Lot unterwandert und abgetragen wird. Anschließend wird der Grundwerkstoff im zweiten Schritt komplett durch das schmelzflüssige Lot benetzt und der Lottropfen breitet sich aus, Bild 1 c). Daraus kann gefolgert werden, dass sich aufgrund der unzureichenden Benetzung im Temperaturbereich $240\text{ °C} < T < 390\text{ °C}$ Fügepartner relativ zueinander auf der teilflüssigen Lotschicht bewegen können, was die geometrische Genauigkeit des Bauteils reduziert. Daher gilt es, diesen Temperaturbereich möglichst schnell zu passieren und die Position sowie Orientierung der Grundwerkstoffe in diesem Temperaturbereich relativ zueinander zu sichern. Eine weitere wichtige Erkenntnis aus diesen Versuchen ist die Benetzungstemperatur dieser Materialkombination, die bei $T = 390\text{ °C}$ liegt. Somit konnten mithilfe der in-situ-Prozessdiagnostik präzisere Lötparameter ermittelt werden.

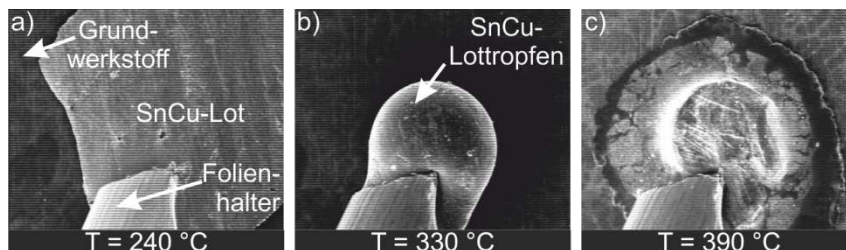


Bild 1: In-situ-Benetzungsversuch im GK-REM, SnCu auf $\text{Al}_7\text{SiO}_3\text{Mg}$ [Quelle: GFE]; a) Schmelzen des Lotes bei $T = 240\text{ °C}$, b) Tropfenbildung bei $T = 330\text{ °C}$ und c) Benetzung des Grundwerkstoffs durch das Lot bei $T = 390\text{ °C}$

Bild 2 a) zeigt eine REM-Querschliffaufnahme einer Fügeverbindung mit einseitiger Benetzung des Grundwerkstoffs bei einer Löttemperatur von $T_{\text{Löt}} = 400 \text{ °C}$ und einer Haltezeit von $t_{\text{Löt}} = 30$ Minuten. Grund für die einseitige Benetzung ist die zu diesem Zeitpunkt noch existierende Al_2O_3 -Schicht am oberen Fügepartner. Diese verhindert die Interaktionen zwischen dem Lot und dem Grundwerkstoff. Dadurch konnten im oberen Teil der Fügeverbindung keine Al-Cu-Phasen gebildet werden und das Kupfer verblieb im Lot in Form von kupferreichen Sn-Phasen. In Bild 2 b) ist eine andere Querschnittsebene derselben Probe dargestellt. Hier wurde die Al_2O_3 -Schicht von beiden Fügepartnern aufgebrochen und unterwandert und es erfolgte eine beidseitige Benetzung sowie Bildung einer Reaktionszone, bestehend aus drei Al-Cu-Phasen mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung. Aufgrund der Bildung dieser Phasen verbleibt in der Mitte der Lötnaht nur reines Zinn. Das Massenverhältnis von Aluminium zu Kupfer steigt bei diesen Phasen in Richtung des Substrats. Diese Phasen sind während des Lötprozesses isotherm erstarrt und wirken somit als Diffusionsbarrieren für das schmelzflüssige Zinn. Somit wird die Auflösung des Grundwerkstoffs durch das Lot verhindert und es bildet sich eine sehr homogene Lötnaht aus.

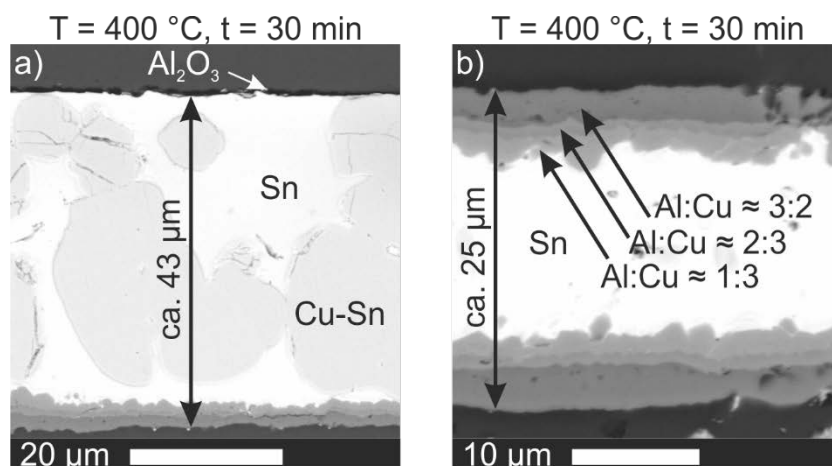


Bild 2: REM-Querschliffaufnahmen von $\text{Al}_7\text{Si}_0,3\text{Mg}$ / SnCu-Lötverbunden gelötet bei $T_{\text{Löt}} = 400 \text{ °C}$ und $t_{\text{Löt}} = 30 \text{ min}$

Bild 3 a) zeigt eine Fügeverbindung, bei der sich trotz einer kürzeren Haltezeit von $t_{\text{Löt}} = 10 \text{ min}$ erste Al₂Cu-Phasen gebildet haben. Grund dafür ist eine höhere Löttemperatur von $T_{\text{Löt}} = 450 \text{ °C}$. Daher wird die Temperatur als die wichtigste relevante Einflussgröße auf die Phasenbildung im Lötgut

angenommen, wobei mit einer höheren Temperatur die Reaktionskinematik erhöht und somit die Phasentstehung bzw. -umwandlung beschleunigt wird. Weiterhin haben sich während des Lötprozesses Al-Cu-Lagen vom Substrat gelöst. Dadurch wurden diese durch die Schmelzbaddynamik des verbliebenen flüssigen Sn-Lotes in die hier vorliegende Form gestaucht. Außerdem ist dadurch der Effekt der Diffusionsbarriere verlorengegangen, was die Interaktionen zwischen Zinn und Grundwerkstoff ermöglichte und zu der Auflösung des Grundwerkstoffs durch das schmelzflüssige Zinn geführt hat. Es wird vermutet, dass die Al_2Cu -Phasen an den Korngrenzen der Ausgangspunkt für das Ablösen der Al-Cu-Phasen sind. In Bild 3 b) kommen diese Effekte deutlicher zum Vorschein. Hier ist sowohl die Auflösung des Grundwerkstoffs entlang der Korngrenzen als auch die Bildung von Al_2Cu -Phasen weit fortgeschritten und es können nur diese Phasen in der Fügezone detektiert werden. Daher kann angenommen werden, dass die Al_2Cu -Phasen thermodynamisch stabiler sind als die in Abbildung 2 auftretenden Phasen und die Phasenbildung mit der Entstehung von Al_2Cu abgeschlossen ist. Aus diesen Versuchen kann gefolgert werden, dass die optimale Arbeitstemperatur, die einerseits eine ausreichende Benetzung des Grundwerkstoffs sicherstellt und andererseits die Auflösung des Grundwerkstoffs reduziert und damit die metallurgische Präzision der Fügeverbindung erhöht, im Temperaturbereich $390\text{ °C} < T_{\text{Löt}} < 450\text{ °C}$ liegt.

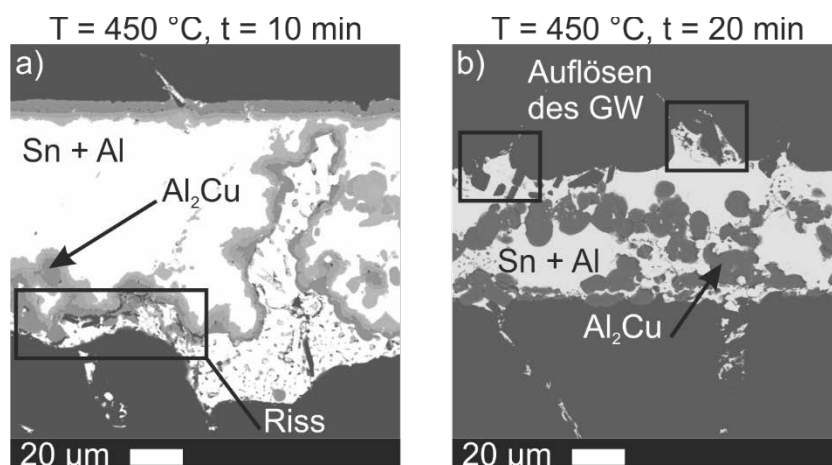


Bild 3: REM-Querschliffaufnahmen von $\text{Al}_7\text{Si}_{0,3}\text{Mg} / \text{SnCu}$ -Lötverbunden gelötet bei a) $T_{\text{Löt}} = 450\text{ °C}$, $t_{\text{Löt}} = 10\text{ min}$ und b) $T_{\text{Löt}} = 450\text{ °C}$, $t_{\text{Löt}} = 20\text{ min}$

Die thermodynamischen Berechnungen in Zusammenarbeit mit TP B7 haben ergeben, dass die Solidustemperatur des SnCu-Lotes bei einer Temperatur von $T = 225 \text{ °C}$ liegt und dass bei der Temperatur von $T = 350 \text{ °C}$ der Anteil der flüssigen Phase des Lotes bei 46 % liegt. Damit korrelieren diese Ergebnisse mit denen aus den in-situ-Benetzungsversuchen. Weiterhin wurde ermittelt, dass bei dieser Werkstoffkombination die Phasenentstehung mit steigendem zur Verfügung stehenden Kupfergehalt in mehreren Schritten abläuft und in der Bildung der stabilen Al_2Cu -Phase endet. Somit konnten die Beobachtungen aus den Lötversuchen von $\text{Al}_7\text{Si}_{0,3}\text{Mg} / \text{SnCu}$ bestätigt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit diesen Versuchen gelang es, alle kritischen Stadien des Aluminium-Lötprozesses, wie Benetzung, Phasenentstehung und Auflösung des Grundwerkstoffs durch das Lot, zu erfassen und die relevanten Einflussfaktoren zu ermitteln.

Im nächsten Jahr werden Prozessparameter hinsichtlich Löttemperatur und Haltezeit weiter präzisiert. Dazu werden weitere Lötversuche durchgeführt und die Fügeverbunde anschließend charakterisiert. Dabei werden die in Abhängigkeit der Prozessparameter entstandenen Phasen rasterelektronenmikroskopisch und mechanisch mithilfe von Härtemessungen sowie Zug- bzw. Dauerschwingversuchen analysiert. Somit wird der Einfluss der präzisionsmindernden Phasen im Lötgut auf die Betriebsfestigkeit ermittelt.

Veröffentlichungen

Bobzin, K., Öte, M., Wiesner, S., Rochala, P., Mayer, J., Aretz, A., Iskandar, R. und Schwedt, A.: Investigation of the effect of rapidly solidified braze ribbons on the microstructure of brazed joints. In: IOP conference series: Materials Science and Engineering [online]. 181, 2017. Verfügbar unter: DOI: 10.1088/1757 899X/181/1/012006. Nachdruck von: B. Wielage, Hrsg. Tagungsband zum 19. Werkstofftechnischen Kolloquium. Chemnitz, 16. und 17.03.2017. Chemnitz: Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik, S. 75 84. ISBN: 978 3 00 055705-7.

Kooperation mit TP A6

Iskandar, R., Rochala, P., Wiesner, S., Öte, M., Schwedt, A., Bobzin, K., Mayer, J. und Weirich, T. E., 2017. Microstructural analysis of Germanium modified Tin-Copper brazing filler metals for Transient Liquid Phase (TLP) Bonding of Aluminum. In: Materialwissenschaften und Werkstofftechnik. 48, 2017, 12. ISSN: 0933-5137.

Kooperation mit TP A6

Bobzin, K., Öte, M., Wiesner, S., Schmidt, A., Apel, M., Berger, R., Aretz, A. und Mayer, J., 2017. Formation of the reaction zone between Sn-Cu brazing fillers and Al-Si-Mg alloys: experiments and thermodynamic analysis. In: Materialwissenschaften und Werkstofftechnik. 48, 2017, 12. ISSN: 0933-5137.

Kooperation mit TP A6 und TP B7

Reisgen, U., Sharma, R., Gach, S., Olschok, Francis, J. S., Bobzin, K., Öte, M., Wiesner, S., Knoch, M. und Schmidt, A., 2017. Residual stress measurement in AlSi alloys. In: Materialwissenschaften und Werkstofftechnik. 48, 2017, 12. ISSN: 0933-5137.

Kooperation mit TP A2, TP A7 und TP A10