

Einsatzmöglichkeiten von reaktiven Nanofolien in der Aufbau- und Verbindungstechnik im Fahrzeug

Fields of reactive nanofoils' applications in bonding technologies for automotive devices

Gregor Hemken¹, Christian Walz¹, Jakob Heyn², Franz Dietrich², Klaus Dröder²

¹ Innojoin GmbH & Co. KG, Bremen, Deutschland, ghemken@innojoin.de

² Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Braunschweig, Deutschland

Kurzfassung

Im vorliegenden Beitrag werden die Anwendungsmöglichkeiten von nanoskaligen, reaktiven Multischichtsystemen als ortsselektive Wärmequelle für Fügeprozesse dargelegt. Reaktive Nanofolien stellen eine innovative Möglichkeit dar, neuartige Löt- und Fügeprozesse zu realisieren. Beim Fügen temperatursensitiver Bauteile gerade aus dem Bereich der Elektronik kann es durch den hohen Wärmeeintrag bei den meisten Fügeverfahren zu Eigenspannungen oder gar Materialveränderungen in der Fügezone oder Randschichten kommen. Die nachfolgenden Ausführungen geben einen Überblick über den Aufbau und die Funktion von reaktiven Nanofolien und stellen wesentliche Einflussfaktoren auf den Fügeprozess dar. Zudem werden aktuelle Arbeiten zur Automatisierung des Fügeprozess in Richtung Seriennutzung vorgestellt. Anhand von Anwendungen aus dem Bereich Fahrzeugtechnik wird das hohe Potenzial dieser wärmearmen Füge-technik aufgezeigt.

Abstract

Typical bonding processes such as reflow soldering or welding usually require heating of larger regions in the area of the contact zone. This heat input may lead to thermal modification of the basic material structure or the introduction of stresses in the joint. Such issues could be avoided by using a precise heat source of reactive multilayer systems that provides heat only to the contact zone of the two material pieces to be joined. The following paper shows an overview of the setup and function of reactive multilayer systems and points out which relevant factors are required for this kind of bonding process. Furthermore, this paper shows current studies for the automation of the joining process. Several automotive application examples demonstrate the high potential of this reactive, low-temperature bonding technology.

1 Einleitung

Zum Fügen eingesetzte Löt- oder Schweißverfahren in der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) erfordern in der Regel eine Erwärmung größerer, an die Fügezone angrenzender Bereiche der zu verbindenden Bauteile. Um Veränderungen der Materialeigenschaften in den Randzonen oder das Auftreten von Eigenspannungen in der Fügezone aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnung der Bauteilkomponenten zu vermeiden, ist eine Wärmequelle erforderlich, die definiert, kurzzeitig und lokal begrenzt Wärme bereitstellt.

Elektronische Baugruppen werden im Zuge der fortschreitenden Systemintegration immer dichter gepackt. Gerade bei der Vielzahl an unterschiedlichen Werkstoffen und (temperatur-) empfindlichen Bauteilen und Substratoberflächen führt dies beim Fügen und Kontaktieren vermehrt zu Bauteilschädigungen. Ein neuer Ansatz wird durch so-

genannte reaktive Multischichten (NanoFoil® / Indium Corporation) ermöglicht. Die Kombination dieser Folien mit Lotschichten auf Bauteilen oder der Folie selbst, erlaubt das stoffschlüssige Fügen unter sehr geringer thermischer Belastung der Bauteile. Dabei ist beim Löten mit reaktiven Multischichten grundsätzlich keine spezielle Lötatmosphäre erforderlich. Mit Hilfe von Nanofolien als Wärmequelle hergestellte stoffschlüssige Fügeverbindungen weisen sehr gute elektrische (Elektrischer Widerstand einer durchreagierten Folie: 8 bis $10 \times 10^{-8} \Omega \times m$) als auch thermische Leitfähigkeiten (Thermische Leitfähigkeit: 35-50 W/mK) auf. Der Einsatz von reaktiven Multischichtsystemen bietet aufgrund der hohen Reaktions- und Prozessgeschwindigkeiten (6-10 m/s) und der minimalen Energiedeposition die Möglichkeit energie- und zeitaufwendige Fügeprozesse zu optimieren und aufwändiges Anlagenequipment (z. B. Reflowöfen) zu substituieren.

2 Grundlagen reaktive Nanofolien

Reaktive Nanometer-Multschichten sind aus alternierenden Lagen von Metallen (z. B. Ni / Al) aufgebaut. Diese werden in einem PVD-Prozess im Nanometermaßstab aufgebracht [1]. Die verwendeten Folien zeichnen sich dadurch aus, dass sie aus hunderten, manchmal bis zu einigen tausend Schichten zusammengesetzt sind. Diese reaktiven Multschichtsysteme setzen sich aus aufgebrauchten 25 bis 90 nm dicken Al- bzw. Ni-Schichten (oder Al/Ti, Ni/Si, Nb/Si) zusammen. Um die Reaktion zu starten, genügt ein Zündimpuls. Durch das punktuelle Anlegen einer Spannung entsteht durch die atomare Interdiffusion der Metalle A und B eine intermetallische Phase. Durch das Einleiten der Reaktion wird eine selbstfortschreitende, exotherme Reaktionsfront ausgelöst, siehe Bild 1.

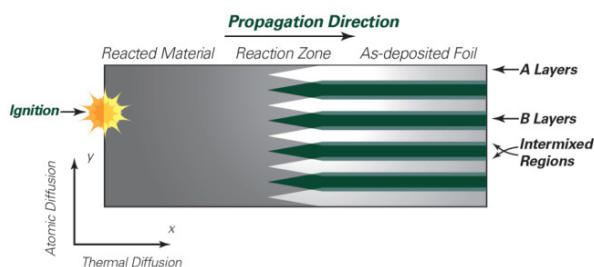


Bild 1 Aufbau der Folie und Reaktionsablauf

Das Al-Ni-Multschichtsystem ist derzeit am meisten verbreitet. Der Grund dafür liegt in der einfachen Handhabbarkeit sowie der hohen Stabilität während des Herstellungsprozesses. Nach der Reaktion liegt diese sogenannte NanoFoil® als intermetallische, feste Phase (Ni₅₀Al₅₀) in der Reaktionszone vor. Bei der Al-Ni-Kombination beträgt die freiwerdende Bindungsenthalpie des Multschichtsystems 59,2 kJ/mol, wobei eine adiabatische Reaktionstemperatur von 1639 °C entsteht [2]. Momentan kommerziell erhältlich sind Nanofolien in Foliendicken von 40, 60, 80 µm Stärke sowie auf Sonderanfertigung 100 µm. Diese können zusätzlich mit einer beidseitig galvanisch aufgetragenen Zinn-Schicht von jeweils 10-20 µm Stärke versehen werden. Zur Erzeugung einer Lötverbindung muss bei der Energiefreisetzung durch die reaktiven Nanofolien zwischen den Fügepartnern ein direkter Kontakt zum Wirken der Adhäsionskräfte des aufschmelzenden Lotes vorhanden sein. Der Kontakt wird über den von außen aufgetragenen Fügedruck realisiert. Bild 2 gibt einen Überblick über den Fügeaufbau beim Lötten mit reaktiven Nanofolien.

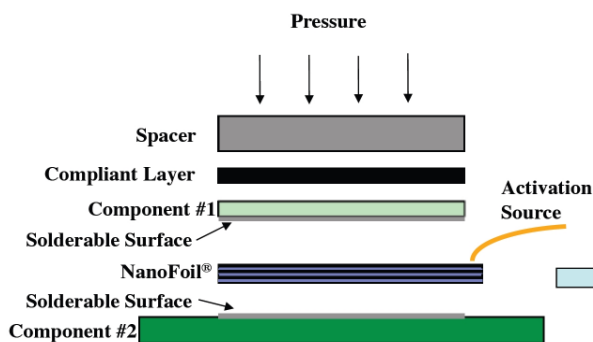


Bild 2 Fügeaufbau

Eine Nanofolie wird zwischen zwei Bauteilkomponenten gelegt, die eine Metallisierung oder vorbelotete Oberflächen haben. Die Bauteile werden gleichmäßig und konstant über angepasste Fügestempel und federnden Zwischenschichten mit Druck beaufschlagt. Die Zündung der Folie erfolgt durch das Einbringen einer Aktivierungsenergie (elektrisch, optisch per Laser oder thermisch). Aufgrund der insgesamt geringen freigesetzten Energie und der hohen Reaktionsgeschwindigkeit zeigen Messungen an Fügeflächen, dass an diesen ca. 20 ms nach Reaktionsstart bei Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit wieder Raumtemperatur herrscht, wodurch das Fügen mit Nanofolie als „kaltes“ Fügeverfahren bezeichnet werden kann [3].

3 Experimentelles

Damit der reaktive Fügeprozess feste, stoffschlüssige und zudem leitfähige Fügeverbindungen zwischen unterschiedlichsten Materialpaarungen mit hoher Qualität und Zuverlässigkeit ergibt, müssen nachfolgende Einflussfaktoren näher beachtet werden:

- Materialien
- Bauteilvorbereitung
- Automatisierung des Nanofolien-Fügeprozess

Da die Nanofolien nach dem jetzigen Stand der Technik zum größten Teil als Wärmequelle für Weichlötprozesse eingesetzt werden, müssen die zu fügenden **Materialien** grundsätzlich eine Löteignung haben bzw. es müssen für diese geeignete Weichlot-Typen evaluiert werden. Gerade bei Materialien, die schwer benetzbar sind (Aluminium oder Titan), sind Speziallote notwendig, die beispielsweise durch Ultraschallvorbelotung flussmittelfrei auf Bauteile vorappliziert werden können.

3.1 Bauteilvorbereitung

Gerade der Bauteilvorbereitung zum reaktiven Fügen mit Nanofolien kommt eine entscheidende Bedeutung zu. Im Rahmen der Vorbereitung müssen die zu fügenden Werkstoffe entweder, wie in der Elektronik weit verbreitet, mit einer gut lötbaren (gut benetzbaren) Oberflächenmetallisierung versehen werden oder mit Loten vorbelotet werden [4], siehe auch Fügevarianten in Bild 3.

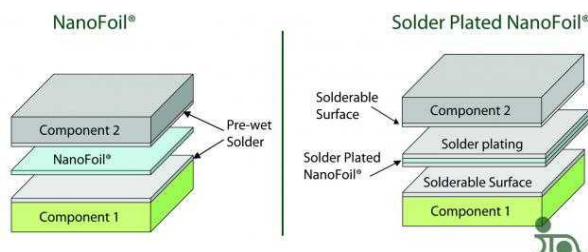


Bild 3 Verfahrensvarianten Fügeprozess

Durch geeignete Oberflächenvorbehandlungsverfahren lässt sich die Benetzbarkeit der Oberflächen steigern. Dies hat den Effekt, dass das Lot eine höhere adhäsive Festigkeit zu den Bauteiloberflächen ausbilden kann. Im Rahmen einer Versuchsserie wurde anhand des schwer benetzbaren Titans nachgewiesen, inwieweit eine Laser-Oberflächenvorbehandlung Einfluss auf die Zugscherfestigkeit mittels Nanofolien-Fügetechnik aufgebauter Probekörper hat, siehe Bild 4.

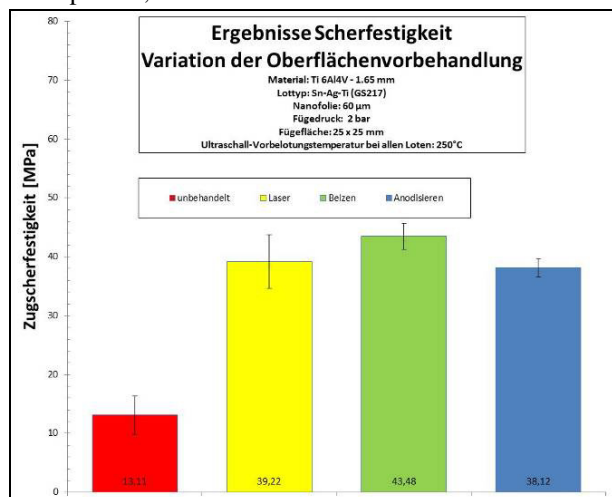


Bild 4 Einfluss von Oberflächenvorbehandlungsverfahren

Alle Oberflächenvorbehandlungsverfahren: Laser, Beizen und Anodisieren als Standardverfahren für Ti6Al4V zeigen einen Anstieg der Zugscherfestigkeit. Die Zugscherfestigkeit konnte mit der neu entwickelten Laser-Oberflächenvorbehandlung um den Faktor 3 gegenüber unbehandeltem Titan gesteigert werden und erreicht fast annähernd die Festigkeiten der etablierten Verfahren. Mit geeigneten Lotsystemen können Zugscherfestigkeitswerte

von 40-42 MPa beim Weichlöten mit reaktiver Nanofolien-Fügetechnik erreicht werden.

3.2 Automatisierung der Fügetechnik

Viele potentielle Anwendungen von Nanofolien sind nur in automatisierten Verfahren ökonomisch umsetzbar. Dabei ergeben sich aus den Eigenschaften der Nanofolien und des Fügeprozesses neue Herausforderungen. Einzelne, prototypische Umsetzungen von automatisierten Prozessen bestehen bereits [7]. Allgemein muss jedoch die Automatisierungstechnik auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden.

3.2.1 Herausforderungen

Aus den Eigenschaften der Nanofolien ergeben sich besondere Herausforderungen für die Automatisierung des Fügeprozesses. Diese rühren in erster Linie aus der Empfindlichkeit des Fügeverfahrens gegenüber Beschädigung der spröden und dünnen Nanofolie bzw. deren Lotbeschichtung sowie aufgrund der geringen Abmaßen und Masse der Nanofolien her.

Der automatisierte Fügeprozess verläuft stets gleich: die Phasen

- Platzieren des Fügepartners A
- Platzieren der Nanofolie
- Platzieren des Fügepartners B
- Aufbringen des Fügedrucks
- Zünden der Nanofolie

müssen in jedem Fall durchgeführt werden. Je nach Produktstruktur sind dabei einzelne Schritte mehrfach auszuführen, der Ablauf bleibt jedoch bestehen. Aus diesem Prozessablauf ergeben sich mehrere automatisierungsrelevante Bereiche: Die Handhabung von Bauteilen und Nanofolien, die Druckapplikation und die Zündung der Nanofolien. Insbesondere bei kleinen Stückzahlen spielen ggf. auch die Kosten der Automatisierung eine Rolle.

3.2.2 Handhabung

Aus dem grundsätzlichen Prozessablauf lässt sich ableiten, dass mehrere Pick-and-Place Vorgänge ausgeführt werden müssen. Die Handhabung der Fügepartner ist dabei stark bauteilabhängig und für viele elektronische Komponenten weitestgehend gelöst.

Die Handhabung der Nanofolie verlangt besondere Aufmerksamkeit. Die dünnen, leichten Folien können nur von oben, auf einer ihrer Fügeflächen gegriffen werden. Aus der flächigen Gestalt und dem geringen Gewicht der Folien ergibt sich für die Handhabung eine weitere Herausforderung. Im Absetzmoment tendieren die Folien dazu zu Verrutschen. Durch Luftbewegungen können die Folien zudem verschoben werden. Unter diesen Randbedin-

gungen muss die automatische Handhabung der Nanofolien dennoch prozesssicher realisiert werden.

Als Lösungsansatz haben sich konventionelle Vakuumsauggreifer als geeignet herausgestellt, solange auf die besonderen Anforderungen aus dem Fügeprozess Rücksicht genommen wird. So muss dabei auf abriebarmes Material für den Sauggreifer geachtet werden.

Klassische NBR-Sauggreifer kontaminieren die Nanoflienoberfläche und sind daher nicht geeignet. Werden jedoch Sauggreifer aus abriebresistenten Materialien verwendet ist diese Greiftechnik zum Handhaben von Nanofolien geeignet [8]. Der Gefahr von Fehlzündungen kann durch den Einsatz ableitender Greifer begegnet werden. Im Bild 5 ist ein entwickelter Roboterendeffektor zum Greifen von Nanofolien zu sehen.

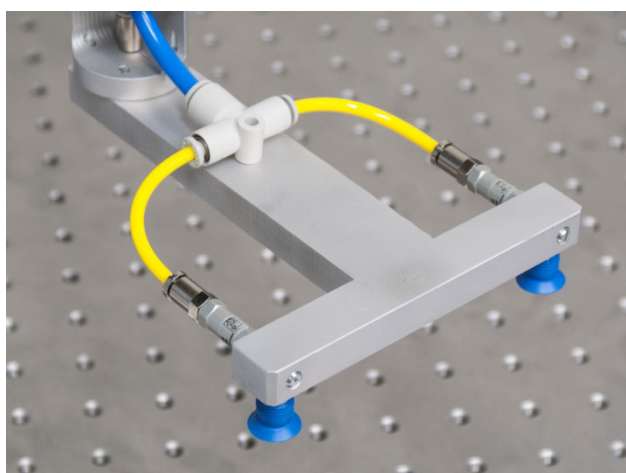


Bild 5 Vakuumsauggreifer für die Handhabung von Nanofolien

Zur Führung der Greifer wird ein Handhabungssystem benötigt dessen Auswahl sich nach dem jeweiligen Anwendungsfall richtet. Da die Nanofolien-Fügestellen eine ebene Geometrie aufweisen genügt im Allgemeinen ein Pick-and-Place geeigneter Roboter mit 4 Freiheiten, z. B. eine SCARA-Kinematik.

3.2.3 Druckapplikation

Für ein qualitativ hochwertiges Fügeergebnis wird ein konstanter, definierter Fügedruck benötigt. Diesen automatisiert aufzubringen stellt eine weitere Herausforderung dar. Abhängig von der Fläche der zu fügenden Komponenten und der Verfahrensvariante können die aufzubringenden Kräfte mehrere kN erreichen, bei kleinen Komponenten sind dagegen Kräfte im einstelligen Newton-Bereich zuverlässig aufzubringen.

Bei kleinen Kräften und kleineren Stückzahlen bietet sich dazu der zur Handhabung benutzte Roboter an. Viele kommerziell erhältliche 4D-Roboter enthalten eine einfache Montagekraftbegrenzung welche hier zum Einsatz kommen kann. Versuche an der TU-Braunschweig haben

eine Eignung dieses Ansatzes ab einem mittleren zweistelligen N-Bereich ergeben. Für kleinere Fügekräfte muss gegebenenfalls auf eine direkte Kraftregelung zurückgegriffen werden.

Bei großen Fügekräften wird eine gesonderte Pressvorrichtung benötigt. Hier können Montagepressen mit unterschiedlichen Funktionsprinzipien eingesetzt werden.

Die Fügekraft muss gleichmäßig auf die Fügefläche verteilt werden. Dazu werden nachgiebige Materialien zum Aufbringen der Kraft eingesetzt [9], wodurch Höhentoleranzen in den Bauteilen ausgeglichen werden können und die Fügekraft gleichmäßig über die Fügezone verteilt wird. Diese Materialien helfen auch das „Nachsacken“ im Moment des Fügens zu kompensieren. Der Fügestapel schrumpft während des Fügevorgangs um ca. 0,05 mm, wodurch die Fügekraft gegebenenfalls abfällt. Dieser Abfall muss durch eine entsprechende Nachgiebigkeit in der Pressvorrichtung begrenzt werden. Sofern die benötigten Fügekräfte es zulassen, bietet sich daher ein pneumatischer Antrieb an, der inhärent nachgiebig ist.

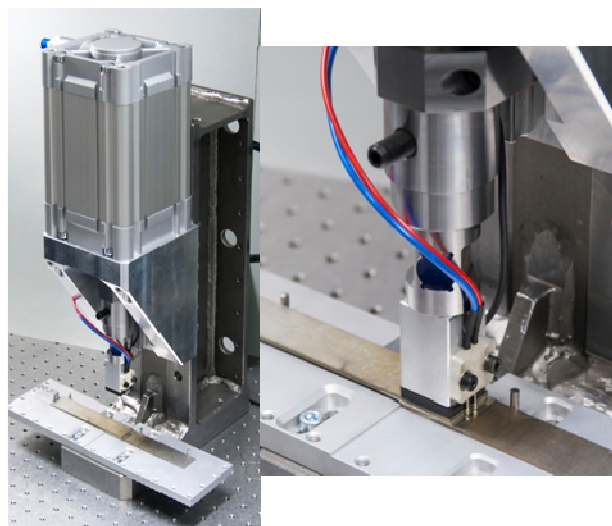


Bild 6 Pneumatische Pressvorrichtung für das Fügen mit Nanofolien

3.2.4 Zündung

Bei der Zündung der Nanofolien im automatisierten Einsatz spielen die Zuverlässigkeit und die Prozesssicherheit eine Rolle. Zudem muss darauf geachtet werden das die zu fügenden Komponenten durch den Zündvorgang nicht beeinträchtigt werden. Daher bieten sich vor allem die elektrische und die laseroptische Zündvariante für den automatisierten Einsatz an.

Im Bild 6 ist eine pneumatische Pressvorrichtung mit einem elektrischen Zündvorsatz dargestellt. Dabei wird über gefederte Kontakte die Nanofolie kontaktiert und über einen Stromstoß gezündet. Diese Zündvariante ist einfach in automatisierte Anlagen zu integrieren und eignet sich für elektrisch unempfindliche Fügebauteile. Bei

elektrisch empfindlichen Komponenten kann eine laser-optische Zündung sinnvoll sein, soweit sie sich in die jeweilige Anlage integrieren lässt. Die zu wählende Zündtechnik hängt in erster Linie von den Eigenschaften der zu fügenden Bauteile ab.

4 Einsatzfelder und Anwendungen

Typische Einsatzfelder und Beispiele zur Verwendung von Nanofolien sind in der folgenden Aufzählung dargestellt [5], [6]:

- Energietechnik: Fügen von Keramik-Metall-Kombinationen
- Photovoltaik: Fügen von Stromleitern an Anschlusselemente
- Biomedizin: Fügen von komplexen, temperaturempfindlichen Legierungen
- Elektronik: Anschlusskontaktierungen von Sensorabgriffen, Fügen von SMD-Bauelementen auf Kühlkörper, Die attach auf DCB-Substraten
- Automobilindustrie: Kontaktierung von Steckelementen sowie Montage von Gehäuseteilen
- Optik: Fügen von Saphir auf Speziallegierungen

Aktuelle Anwendungen aus dem Bereich der Fahrzeugtechnik sind in den nächsten zwei Kapiteln dargestellt.

4.1 Kontaktierung von Batterieanschlüssen

Die Kontaktierung von Lithium-Ionen-Batteriezellen (LIB) über Polverbinder zu Kompletmodulen ist Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten. Stand der Technik ist das Verschrauben der Terminalanschlüsse mit Polverbindern. Stoffschlüssige Fügeverfahren stellen eine Alternative dar. Aufgrund der Temperaturempfindlichkeit von Dichtungselementen und der elektrochemischen Bestandteile in der Lithium-Ionen-Batterie sind wärmearme Fügeverfahren im Fokus der Forschung. Bild 7 zeigt die Kontaktierung einer Lithium-Ionen-Rundzelle (Typ 18650) mit einem Polverbinder mit Hilfe der Nanofolien-Fügetechnik.

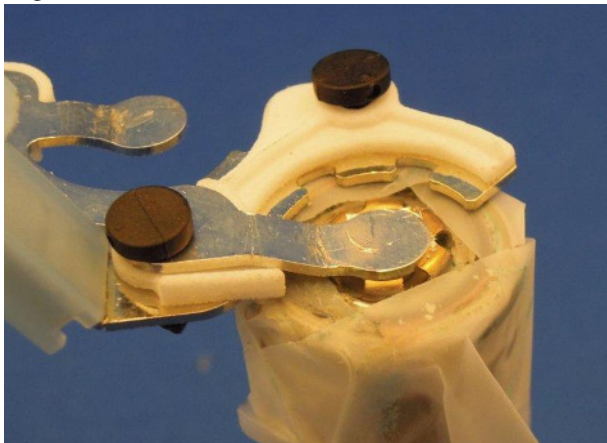


Bild 7 Fügen von Polverbinder an LIB

Der Polverbinder besteht aus Aluminium, welches mit einer Unternickelung und einer 4-5 µm dicken Sn-Schicht als Decklage versehen wurde. Der Batteriepol wurde selektiv-galvanisch mit einer Goldschicht versehen. Mit Hilfe einer verzinnnten Nanofolie wurde nach der Verfahrensvariante Bild 3 (rechts) eine Fügeverbindung realisiert. Aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit kann die Nanofolie im Bereich der Elektromobilität hervorragend eingesetzt werden.

4.2 SMD-Montage mit reaktiven Nanofolien

Dem reaktiven Fügen mit Nanofolie stehen viele Anwendungsmöglichkeiten zur Verfügung. Eines der häufigsten Einsatzfelder, in dem Nanofolie verwendet wird, ist die (Mikro)-Elektronik. In Bild 8 ist die SMD-Montage eines Ceramic Duplexers mit Hilfe von reaktiven Multischichten realisiert worden. Die PCB ist mit Gold metallisiert, die Fügefläche des Duplexers ist verzinkt, sodass mit Hilfe einer verzinnnten Nanofolie und angepassten Fügestempeln der Aufbau erfolgreich gefügt werden konnte. Dabei wurde über ein Zündpad mit Hilfe eines Lasers die Aktivierungsenergie zum Zünden der Folie eingebracht. Dieses Zündpad wird durch einen aus der Fügezone herausragenden Überstand der Nanofolie realisiert.

Auf PCB-Ebene kann man aber auch durch speziell designte Zündbahnen oder auch Löcher in der Leiterplatte von unten Zündungen der reaktiven Nanofolien durchführen, sodass kein störender Überstand der durchreagierten Nanofolien entsteht.

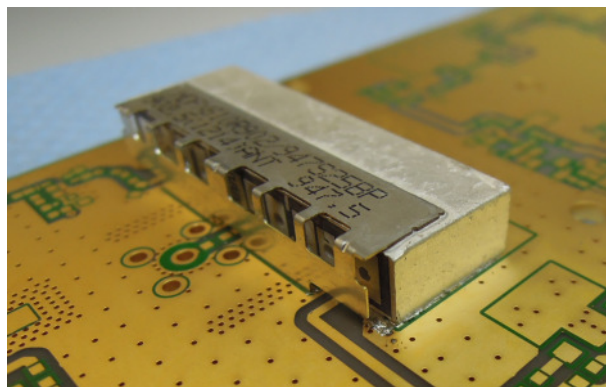


Bild 8 Fügen von SMD-Duplexer auf PCB

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der dargelegten Ausführungen war es, die Anwendungsmöglichkeiten von reaktiven Multischichtsystemen im Bereich des Weichlötens aufzuzeigen. Die Untersuchungen zeigen, dass mittels reaktiver Nanofolien aufgrund der Prozess- und Verbindungseigenschaften Fügeaufgaben realisiert werden können, bei denen eine gute mechanische Festigkeit mittels geeigneter Vorbehandlungs- und Vorbelotungsverfahren erreicht werden kann.

Es wurden zudem Ansätze und Aufbauten zur Automatisierung in Form von angepassten Handhabungs- und Fügedruckeinrichtungen getestet und gefertigt.

Zusammenfassend sind die wichtigsten Vorteile des Fügens mittels Nanofolien:

- Keine Durcherwärmung der Bauteile durch die lokale Wärmequelle im Gegensatz zu Standard-Lötverfahren, wie z. B. beim Reflow-Löten
- Keine Gefügeveränderungen im Grundmaterial durch den geringen Energieeintrag
- Minimale thermische Beeinflussung von temperaturempfindlichen Bauteilen, da die Wärme nur kurzzeitig einwirkt
- Eigenspannungsarme Verbindung von Materialien mit deutlich verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten möglich (z. B. Aluminium/Stahl, Keramik/Stahl, Glas/Kupfer)
- Flussmittelfreier Prozess, d. h. keine organischen Rückstände auf den Substraten
- Prozessflexibilität: Freiheitsgrade in der Lotauswahl und der Prozessabfolge
- Extrem schnelles und präzises Fügen
- Flächige Verbindung mit guter Wärme- und elektrischer Leitfähigkeit
- Kein Ausgasen und keine Alterung in der Fügezone
- Reproduzierbarer Fügeprozess
- Fügeprozess im Vakuum möglich, da kein Sauerstoff nötig ist
- Einsatz von Qualitätssicherungsverfahren wie Ultraschall und Computertomographie möglich
- Hohe Fügestellenqualität durch sehr geringe Fehlerraten (< 2 %)

Durch die zahlreichen Anwendungen konnte eine Praxistauglichkeit der Nanofolie auch im Hinblick auf eine Automatisierung dieser Füge-technik nachgewiesen werden. Aktueller Forschungsbedarf liegt im Bereich der strukturellen Festigkeit, dort insbesondere bezüglich des Themas Hartlöten mit Nanofolie. Ein weiteres interessantes Einsatzfeld für Nanofolien stellt das Fügen von Hybrid-Werkstoffen dar. Mittels reaktiver Füge-technik konnten Mischbauweisen von kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) und Metallen erfolgreich aufgebaut und für erste Anwendungen im Bereich Automobilbau und der Luftfahrt Demonstratoren gefertigt werden.

6 Danksagung

Die Autoren danken der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) (AiF-FKZ KF 2441305WO2 sowie KF 3064101WO2) für die finanzielle Förderung eines Teils der Arbeiten, die aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) erfolgte.

Zudem wurden Teile der Versuchsergebnisse im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojekt mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ (Förderkennzeichen 02PJ2090-2095) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

7 Literatur

- [1] Dietrich, G.; Reaktive Nanometer- Multischichten als maßgeschneiderte Wärmequellen beim Fügen, In: Vakuum in Forschung und Praxis 21, Nr. 1; S. 15-21, Wiley Verlag, 2009
- [2] De Boer, F. R.; Pettifor, D. G.: Cohesion in Metals. 1st Edition, Elsevier Science Publishers B.V., 1988.
- [3] Stark, R.; Abschlussbericht AiF-Vorhaben 15.912 N: Wärme- und eigenspannungsarmes Fügen für die Mikrotechnik, Bewilligungszeitraum: 01.04.2009-30.09.2011
- [4] Matteau, J.; Nanobond® Assembly- a rapid room temperature soldering process, In: Indium Corporation Tech Paper, October 2011, IMAPS Konferenz
- [5] Herr, M.; Fügen von Hochvolt-Komponenten mittels reaktiver Nanometer-Multischichten. Dissertation, Technische Universität Berlin, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2012.
- [6] A.Duckham, A., Levin, J., Weihs, T.; Soldering and brazing metals to ceramics at room temperature using a novel nanotechnology. Advances in Science and Technology, 45:S. 1578 - 1587, 2006.
- [7] N. Heilmann: Vorrichtung, Bestückautomat und Verfahren zum thermischen Verbinden von Bauelementen an ein Substrat. Patentschrift, Siemens Electronics Assembly Systems, DE 10 2010 004 193 A1, 2010.
- [8] J. Heyn, P. Blumenthal, G. Hemken, S. Fiedler, C. Walz, A. Raatz, K. Dröder: Automation Concepts and Gripping Solutions for Bonding with Reactive Multilayer Systems. Procedia CIRP, 23: S. 13 – 18, 2014.
- [9] Indium Corporation: NanoBond ® : The Process for Using NanoFoil ®. Indium Corporation Application Note, 2008