

## Teilprojekt A5

### Titel

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

### Projektleitung/-bearbeitung

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. K. Bobzin

Projektbearbeitung: J. Hebing, M.Sc.

Institut für Oberflächentechnik (IOT)

### Aufgabenstellung

Zentrale Herausforderung des Teilprojektes ist die Erhöhung der Präzision im Lötspalt durch eine gesteigerte Prozessbeherrschung bzw. neue Prozessführungsstrategien beim Hartlöten. Hierzu werden die neuen Ansätze des Impfens von Ni-Lotlegierungen mit geringen Mengen eines Refraktärmetalls wie auch das stromunterstützte Löten (eng. Electric current-assisted brazing, ECAB) erforscht. Ziel ist es dabei, den Anteil an Sprödphasen im Lötgut um mindestens  $\Delta V_{\text{Spröd.}} = 15\%$  zu reduzieren und die mechanischen Eigenschaften des Lötgutes und der Lötverbindung zu verbessern. Ebenfalls ist es das Ziel, die nötigen Prozesstemperaturen zu senken, um hierdurch die thermische Belastung der Konstruktionswerkstoffe zu reduzieren. Im Berichtszeitraum lag der Fokus hierbei auf die Herstellung und die Erforschung von Ti-geimpften amorphen Lotfolien, wie auch auf der Quantifizierung des ECAB-Prozesses.

### Vorgehensweise

Zur Erreichung der Zielsetzung wurden Ti-geimpften amorphen Ni 620-Lotfolien mittels des Melt-Spinning-Verfahrens aus gesinterten Vorlegierungen hergestellt. Anschließend wurde eine definierte Menge der Lotfolie zwischen zwei Halbzeugen bestehend aus dem Warmarbeitsstahl X37CrMoV5-1, appliziert. Das reproduzierbare Einstellen der Lötspaltbreite auf  $D_{\text{Spalt}} = 70\ \mu\text{m}$  erfolgte durch die Verwendung von Abstandslehren zwischen den Halbzeugen. Im Anschluss wurden die Proben im Hochvakuumofen bei  $T_{\text{Löt}} = 1.070\ \text{°C}$  für  $t_{\text{Löt}} = 10\ \text{min}$

gelötet und nachfolgend unter anderem metallografisch (REM/EDX, XRD usw.) und mittels Nanoindentation charakterisiert.

Um den Einfluss des ECAB-Prozesses vertiefend zu untersuchen und zu quantifizieren, wurden ebenfalls aus dem Warmarbeitsstahl X37CrMoV5-1 Stumpfstoßverbindungen hergestellt, welche auch mit Ti-geimpften Lotfolien gelötet wurden. Mittels einer eigens zu diesem Zweck hergestellten Lötvorrichtung wurden diese Proben während des Lötprozesses mit einem Anpressdruck von  $p = 0,2 \text{ MPa}$  und einer Stromdichte von bis zu  $J = 200 \text{ A/cm}^2$  beaufschlagt. Gegenüber konventionellen Lötprozessen mit dieser Lotlegierung konnte hierbei die Löttemperatur, aufgrund der Stromunterstützung, deutlich um  $\Delta T = 60 \text{ K}$  auf  $T_{\text{Löt}} = 1.000 \text{ }^\circ\text{C}$  gesenkt werden. Eine anschließende Quantifizierung des Einflusses des ECAB-Prozesses auf die Bildung von Sprödphasen gelang durch die Bildanalyse von Querschliffaufnahmen mittels der Open-Source-Software ImageJ. Ebenfalls erfolgte eine Quantifizierung der mechanischen Eigenschaften unter anderem anhand von Scherversuchen.

### Ergebnisse

Die Ergebnisse der REM-/EDX-Analyse zu den Ti-geimpften Lötverbindungen zeigen im Ausgangszustand ohne Ti-Impfung ausgeprägte Sprödphasen in Form von CrB-,  $(\text{NiCr})_3\text{B}$ - und  $\text{Ni}_3\text{Si}$ -Phasen, welche ebenfalls mittels XRD verifiziert wurden. Diese Phasen weisen hohe Härten und einen niedrigen plastischen Verformungsanteil auf, Abbildung 1. Dem gegenüber zeigen die Probe, welche mit einer amorphen Lotfolie mit einer Ti-Impfung von  $\omega_{\text{Ti}} = 3 \%$  gelötet wurden eine Zerlegung und Verteilung von Sprödphasen innerhalb des Mischkristalls (Mk). Dieser Effekt kann am deutlichsten an den CrB- und  $\text{Ni}_3\text{Si}$ -Phasen beobachtet werden. Ebenfalls wird die  $(\text{NiCr})_3\text{B}$ -Phase dahingehen beeinflusst, dass diese im geimpften Zustand durch eine  $\text{NiTiCrB}$ -Phase verdrängt wird. Das Härtemapping indiziert dabei für diese Phase einen höheren plastischen Verformungsanteil. Außerdem zeigen die Härtemessungen, dass der Mk im geimpften Zustand im Vergleich zu dem Ausgangszustand weniger weich ist, was auf die breitere Verteilung der Sprödphasen innerhalb des Lötgutes

zurückgeführt wird. Als Ursache für die beobachtete Zerlegung und Verteilung der Sprödphasen wird aktuell eine verstärkte heterogene Keimbildung infolge von Ti-Ausscheidungen, insbesondere der TiC- und TiB-Phasen diskutiert.

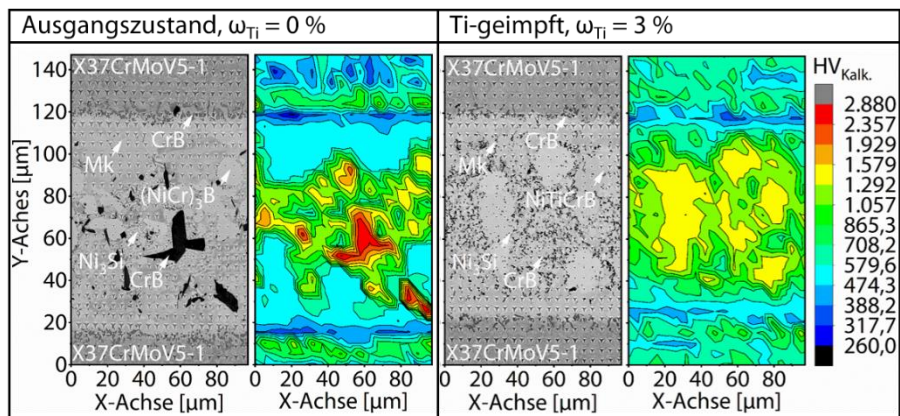


Abbildung 1: REM-Aufnahmen und Härtemappings in HV<sub>Kalk</sub>

Die Ergebnisse der mittels des ECAB-Prozesses hergestellten Proben sind in Abbildung 2 dargestellt. Während im Ausgangszustand verschiedene Sprödphasen, insbesondere die Ni<sub>3</sub>Si- und die (NiCr)<sub>3</sub>B-Phase beobachtet werden können, sind nach dem ECAB-Prozess lediglich verschiedene CrB-Phase im Lötgut wie auch innerhalb der Diffusionszone im Grundwerkstoff zu erkennen.

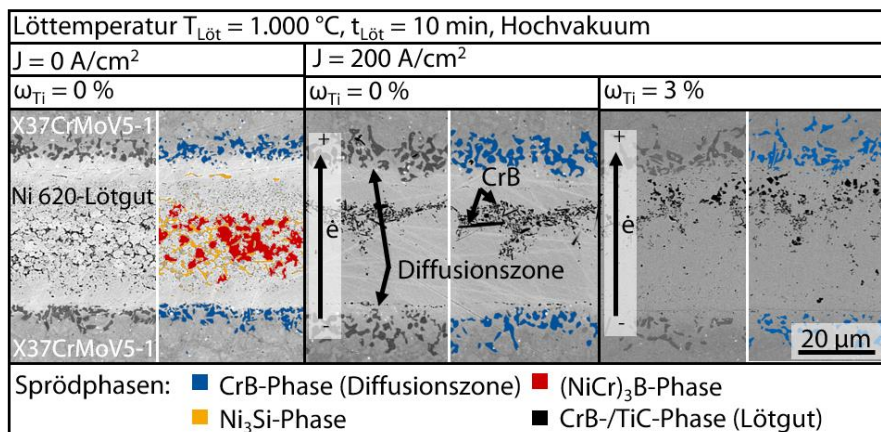


Abbildung 2: REM-Aufnahmen und Phasenanalyse repräsentativer Lötverbindungen

Die Bildanalyse anhand von Querschliffaufnahmen ergibt hierbei eine Reduzierung der Sprödphasen von mehr als  $\Delta V_{Spröd.} = 50 \%$ , wodurch das Ziel der Reduzierung der Sprödphasen um  $\Delta V_{Spröd.} = 15 \%$  deutlich erreicht wurde. Ebenfalls kann bei Nutzung des ECAB-Prozesses anhand von Ultraschalluntersuchungen eine geringere Fehlstellendichte

detektiert und anhand von Scherversuchen eine Steigerung der Scherfestigkeit um ca.  $\tau_{\text{Scher}} = 32\%$  gegenüber dem Prozess ohne Stromunterstützung ermittelt werden. Bei kombinierter Nutzung der Ti-geimpften Lotfolien mit dem ECAB-Prozess, zeigt sich ein ähnliches Bild, jedoch liegen die CrB- und ggfs. TiC-Phasen verteilter im Lötgut vor.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Die Untersuchungen zeigen, dass der werkstofftechnische Ansatz des Ti-Impfens, der prozesstechnische Ansatz des ECAB-Prozesses, wie auch die Kombination der beiden Ansätze eine vorteilhafte Wirkung auf die Mikrostruktur des Lötgutes haben. Die Vorteile des ECAB-Prozesses als neue Prozessführungsstrategie, konnten hierbei bereits anhand der Messung des Sprödphasenanteils wie auch anhand von Scherversuchen quantifiziert werden. In nachfolgenden Untersuchungen wird die Kombination der Ansätze auf die statischen und dynamischen Eigenschaften des Lötgutes und entsprechender Lötverbindungen vertiefend charakterisiert. Außerdem soll die Funktionsfähigkeit dieser beiden Ansätze anhand eines Demonstrators aus der Modellanwendung der Druck- und Spritzgusswerkzeuge veranschaulicht werden.

### **Veröffentlichungen**

#### BOBZIN, K., W. WIETHEGER, J. HEBING

Influence of the titanium inoculation on the melting behavior and microstructure of Ni 620/X38CrMoV5-1 brazing joints, Advanced Engineering Materials, 2021, [10.1002/adem.202100497]

#### BOBZIN, K., H. HEINEMANN, J. HEBING und D. MACHADO

Current-Assisted Diffusion Brazing of Ni-based Filler Metals to Hot Work Steel, Conference Proceedings: 10th International Brazing and Soldering Conference 2021: Denver, Colorado, USA, 02-06 October 2021

#### BOBZIN, K., H. HEINEMANN, und J. HEBING

Influence of titanium inoculation on the microstructure of nickel-based filler metal, Conference Proceedings: 10th International Brazing and Soldering Conference 2021: Denver, Colorado, USA, 02-06 October 2021