

Die elektrische Widerstandsmessung als innovatives zfP-Verfahren in der Löttechnologie

Norman SIEVERS, Wolfgang TILLMANN, Reiner ZIELKE
TU Dortmund Lehrstuhl für Werkstofftechnologie

Kurzfassung. Das Hartlöten ist eine geeignete Technik, um artfremde Werkstoffe stoffschlüssig zu verbinden. Allerdings lassen sich im Gegensatz zum Schweißen durch das Löten deutlich niedrigere Prozesstemperaturen zur Herstellung einer hochfesten Fügeverbindung realisieren und es können auch artfremde Werkstoffpaarungen für industrielle Zwecke miteinander verbunden werden. Obwohl diese Technologie seit vielen Jahren in zahlreichen industriellen Anwendungen genutzt wird, treten immer wieder unzulässige Fehler in der Fügeverbindung auf. Diese Fehler sind häufig auf die empfindlichen Prozessparameter zurückzuführen, die bei kleinsten Änderungen bereits kritische Auswirkungen auf den Verbund haben. Zu den häufigsten Fehlerarten gehören eine mangelhafte Benetzung des Lotes auf den Fügepartnern, auftretende thermische Eigenspannungen oder auch eine zu hohe Porosität innerhalb des Lötguts. In der Vergangenheit wurden bereits verschiedene zerstörungsfreie Verfahren wie die Durchstrahlungs- und Ultraschallprüfung an dieser Fügeverbindung erfolgreich eingesetzt. Allerdings verhinderten der hohe Prüfaufwand und die daraus resultierenden Kosten in vielen Fällen einen erfolgreichen industriellen Einzug.

Da kritische Fehler wie Risse und Poren, aber auch intermetallische Phasen im Lötgut einen negativen Effekt auf die elektrische Leitfähigkeit besitzen, lässt das Messen des elektrischen Widerstandes eine Aussage über die gelötete Verbindung zu. So wird in diesem Beitrag die elektrische Widerstandsmessung in Form der 4-Leiter-Technik als erfolgversprechende Alternative für die zerstörungsfreie Prüfung von Hartlötverbindungen vorgestellt. Durch die Einfachheit des Messaufbaus kann eine kostenoptimierte Prüfung realisiert werden. Außerdem kann eine Adaption des Prüfverfahrens in den Lötprozess selber erfolgen, so dass bereits während des Fügens wertvolle Erkenntnisse über den Prozess möglich sind, die zum metallurgischen Verständnis des teilweise komplexen Fügeverfahrens beitragen.

1. Einführung

Hartmetalle haben in der heutigen Zeit einen relevanten Stellenwert unter den Funktionswerkstoffen eingenommen [1]. Als Verbundwerkstoff aus meist karbidischen Hartstoffpartikeln und einem metallischen sowie duktilen Binder sind sie das Bindeglied zwischen den keramischen und metallischen Werkstoffen. Ihre hohe Härte wird im Gegensatz zu Keramiken durch ein erhöhtes elastisch/plastischen Verformungsverhalten unterstützt [2], so dass sie in zahlreichen tribologischen Anwendungen, beispielsweise als Schneidwerkzeug zum Einsatz kommen. Diese Schneidwerkzeuge wie Sägeblätter verwenden zur Steigerung der Verschleißfestigkeit Segmente aus Hartmetallen basierend



auf Wolframcarbid und Kobalt, die auf dem Werkzeug angebracht werden. So müssen beispielsweise auf einer einzelnen Kreissäge zahlreiche dieser Hartmetallsegmente möglichst kosteneffizient befestigt werden. Hierzu besitzt das Löten als stoffschlüssiges Fügeverfahren durch eine schnelle Prozessführung bei sehr guten Festigkeitseigenschaften deutliche Vorteile gegenüber anderen Fügeverfahren wie dem Schweißen [3, 4]. Die Festigkeit der Fügeverbindung wird durch eine niedrigschmelzende Legierung erreicht, die auf beiden Fügepartnern eine Benetzung und schmelzflüssige metallurgische Interaktion mit den Grundwerkstoffen bewirkt. Gerade die Hartmetalle gelten hierbei als schwer zu benetzende Werkstoffe, so dass spezielle Lot-Systeme für das Fügen von Hartmetall notwendig sind [5]. In der Vergangenheit konnten die besten Ergebnisse mit Hartlotlegierungen auf Silberbasis und Kupfer erzielt werden, wobei Zusätze an Nickel und Mangan die Benetzungsfähigkeit auf dem Hartmetall verbessern. Da der Lötprozess meist induktiv an Luft stattfindet, müssen die Fügeoberflächen mit speziellen Flussmittel gesäubert und eine erneute Oxidation verhindert werden, damit die metallische Lotschmelze optimal benetzen kann.

2. Fehlerarten in Lötverbindungen zwischen Hartmetall und Stahl und ihre Prüfmöglichkeiten

Das stoffschlüssige Fügen von Hartmetall und Stahl mittels Löten ist ein komplexer Prozess, und erfordert die Beherrschung zahlreicher Einflussparameter. Dennoch können in der Serienfertigung eines kmUs zahlreiche Fehlerarten im Lötgut zu einer Beeinträchtigung der Fertigungsqualität führen [6]. Die wichtigsten dieser Fehlerarten sind in Tabelle 1 aufgeführt und werden im Folgenden am Beispiel eines hartmetallbestückten Sägeblattes erläutert.

Tabelle 1. Übersicht der möglichen Fehlerarten in gelöteten Hartmetall-Stahl Fügeverbindungen

Fehlerart	Ursache	Folge
Lage	– Mangelhafte Fixierung bzw. Anpresskraft	– Einschränkung der Bauteilfunktion
Benetzung	– Verschmutzte Fügestellen – Bauteil nicht vollständig erwärmt – Lot unvollständig aufgeschmolzen – Zu wenig oder falsches Flussmittel	– Verringerte Anbindungsfläche senkt die Festigkeit
Poren	– Flussmittel konnte nicht ausgasen	– Je nach Zahl, Größe und Lage wird die Festigkeit herabgesetzt
Einschlüsse	– Fügestellen wurden nicht ordnungsgemäß gesäubert – Flussmittelreste	– Siehe Poren
Eigenspannungen	– Zu geringer Lötspalt (ggfs. durch zu hohe Anpresskraft) – Zu große Fügeflächen – Kein Verbundlot verwendet	– Eigenspannungen addieren sich in der Bauteilnutzung zu der äußeren Belastung – Initiierung von Rissen
Risse	– Zu hohe Eigenspannungen	– Tragfähigkeit der Fügeverbindung wird gesenkt
Sprödphasen	– Kohlenstoffarmer Stahl – Hartmetall verarmt an Kohlenstoff	– Ausfall des Bauteils – Duktilität bzw. elastische Verhalten der Fügeverbindung wird eingeschränkt

Ist das Hartmetallsegment während des Lötvorganges nicht ausreichend fixiert, kann es auf dem flüssigen Lot aufschwimmen und sich verschieben, so dass die geforderte Lage nicht mehr eingehalten wird und die Bauteilfunktion eingeschränkt ist. Ein solcher Lagefehler lässt sich meist durch eine einfache Sichtkontrolle bereits feststellen.

Bei einem Benetzungsfehler hat das Lot nach dem Lötprozess keinen festen Kontakt zur gesamten Fügefläche. Benetzungsfehler können verschiedene Ursachen haben. Zu den häufigsten gehören eine verschmutzte Fügefläche, ein unvollständig oder inhomogen aufgewärmtes Bauteil, wodurch das Lot nur unvollständig aufgeschmolzen ist oder die Wahl eines falschen oder von zu wenig Flussmittel. Durch die verringerte Anbindungsfläche sinkt die Festigkeit und kann je nach Benetzungsgrad kritische Werte erreichen. Solche Benetzungsfehler lassen sich meist nur mit volumetrischen Prüfverfahren wie der Ultraschall- oder Durchstrahlungsprüfung feststellen, die in ihrer Anwendung für die meisten Unternehmen zu teuer sind im Vergleich zu den Produktionskosten.

Wenn dem Flussmittel während des Lötprozesses nicht genügend Zeit gegeben wird, aus der flüssigen Lotschmelze auszugasen, bleiben im erstarrten Lötgut Poren zurück. Diese können je nach Anzahl, Größe und Lage ebenfalls die Festigkeit herabsetzen. Gerade am Rand der Lötnaht kann durch eine offene Porosität ein kritischer Spannungszustand zur Rissinitiierung entstehen. In vergleichbarer Weise verhalten sich Einschlüsse, die von in der Schmelze verbliebenen Schmutzpartikel oder Flussmittelresten stammen. Die Detektionsgrenzen für solche Poren und Einschlüsse wird bei den Prüfverfahren auch durch die Bauteildimensionierung beeinflusst, so dass eine pauschale Angabe nicht möglich ist.

Da die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Stahl und Hartmetall sich deutlich voneinander unterscheiden, entstehen nach dem Erstarren des Lotes und der weiteren Abkühlung auf Raumtemperatur teils erhebliche Eigenspannungen im Fügeverbund, die zu einem frühzeitigen Versagen des Hartmetalls führen können. Solche Eigenspannungen lassen sich durch größere Lotspalte und auch durch die Verwendung von Schichtloten kompensieren. Zerstörungsfrei messen lassen sich diese Eigenspannungen meist allerdings nur mittels Röntgenbeugung, was einen hohen Zeit- und damit Kostenaufwand besitzt. Übersteigen die thermisch-induzierten Eigenspannungen ein überkritisches Maß, so können sie bereits direkt nach dem Löten zu einer Rissausbreitung im Hartmetall führen.

Um sehr hochfeste Fügeverbindungen an Hartmetallen zu erzeugen, müssen deutlich höherschmelzende Lotsysteme verwendet werden, die meist nur in Vakuumöfen gelötet werden können, um die Bauteile vor einer Oxidation zu schützen. Die langwierige Wärmebehandlung führt gerade bei kohlenstoffarmen Stählen zu einer Entstehung von spröden η -Karbiden am Hartmetall, die ebenfalls die Betriebsfestigkeit der Bauteile beeinträchtigt. Die Entstehung solcher Sprödphasen lässt sich hingegen nach aktuellem Stand der Technik nur mittels metallurgischer Untersuchung des Lötgutes feststellen.

3. Vier-Leiter-Methode zur elektrischen Widerstandsmessung

Die Diskussion im vergangenen Abschnitt bezüglich der verschiedenen Fehlerarten an gelöteten Fügeverbindungen zwischen Hartmetall und Stahl belegt, dass es zerstörungsfreie Prüfmöglichkeiten gibt, um diese Fehlerarten zu identifizieren. Allerdings scheitert deren Einsatz in den meisten mittelständischen Betrieben an den hohen Investitionskosten, die für die Prüfung aufgewendet werden müssen. Dennoch besteht eine große Gefahr durch schwankende Prozessparameter unzulässige Fügeverbundqualitäten zu erzielen, die teils erhebliche wirtschaftliche Folgen in Folge von Gewährleistungsansprüchen mit sich ziehen können. Es fehlt daher ein zuverlässiges zerstörungsfreies Prüfverfahren, das sowohl kostengünstig als auch innerhalb der raschen Produktion zu keinem Zeitverzug führt. Unter

diesen Gesichtspunkten wurde die elektrische Widerstandsmessung als mögliches Verfahren identifiziert und wird aktuell im Forschungsprojekt IGF 18469 N für die Löttechnologie ertüchtigt.

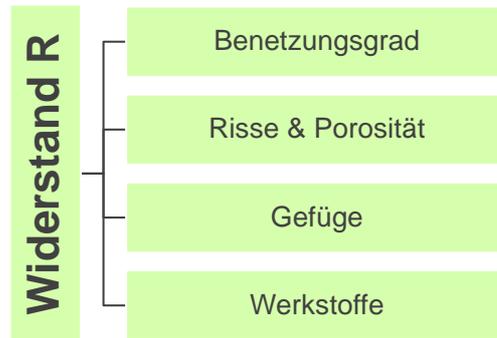


Abb. 1. Einflussfaktoren auf den elektrischen Widerstand R von Hartlötverbindungen.

Die Messung des elektrischen Widerstandes zur Qualitätsprüfung erscheint dahingehend als zweckmäßig, da sowohl die Fügepartner als auch der Lotwerkstoff über eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit verfügen und Imperfektionen wie Porosität und spröde intermetallische Phasen, die die Verbundfestigkeit schwächen, einen hohen elektrischen Widerstand besitzen, siehe Abbildung 1.

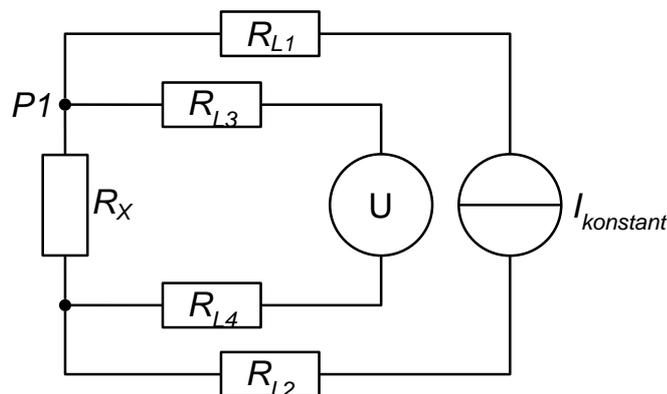


Abb. 2. Prinzipskizze zur 4-Leiter-Methode zur Messung des elektrischen Widerstandes R_x .

Der elektrische Widerstand der Fügeverbindung ist selbst im Falle einer Imperfektion meist kleiner als 1Ω . Aus diesem Grund muss für eine präzise Messung des Widerstandes die so genannte 4-Leiter-Methode verwendet werden. Durch ein äußeres Leiterpaar wird die zu prüfende Fügeverbindung mit einem konstanten Strom I durchflutet. Ein zweites Leiterpaar dient zum Messen des Spannungsabfalls U an der Lötnaht. Da der innere Widerstand des Spannungsmessgerätes im Vergleich zum elektrischen Widerstand der Lötnaht um knapp zwölf 10^{er} -Potenzen höher liegt und der Strom den Weg des geringsten Widerstandes nimmt, kann vereinfacht angenommen werden, dass über das Messgerät selbst kein Strom und daher an Widerstand R_x der Strom $I_x = I_{\text{konstant}}$ der Stromquelle fließt. Hierdurch entfallen die Leiter- und Kontaktwiderstände des Messaufbaus aus der Berechnung des Widerstandes R_x und der Widerstand der Lötnaht kann über das Ohm'sche Gesetz nach Gleichung 1 berechnet werden.

$$\text{Gl. 1. } U_{\text{mess}} = R_x * I_{\text{konstant}}$$

Für die Untersuchungen zur Qualifizierung der elektrischen Widerstandsmessung zur Prüfung von Hartlötverbindungen wurden die Messkontakte zunächst per Punktschweißung mit einem Widerstandsschweißgerät hergestellt, um die Kontaktierungen präzise und reproduzierbar an der Lötnaht anzubringen. Für die Messung der Widerstände wurde ein Nanovoltmeter der Firma Hewlett-Packard verwendet, da es mit Hilfe der 4-Leiter-Methode erlaubt selbst kleinste elektrische Widerstände im $\mu\Omega$ -Bereich zu messen.

4. Ergebnisse

Für die Untersuchungen wurden Hartmetalle der Sorte K10 bestehend aus Wolframcarbid (WC) mit 5,6 gew.-% Kobalt als Bindemetall verwendet. Als Stahl diente Silberstahl (1.2210) mit einem Kohlenstoffanteil von 1,2 % und Zusätzen von 0,7 % Chrom und 0,1 % Vanadium zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit. Die Probekörper haben eine Querschnittsfläche von 8x8 mm, während das Hartmetallplättchen eine Länge von 4 mm und der Stahl eine Länge von 29 mm.

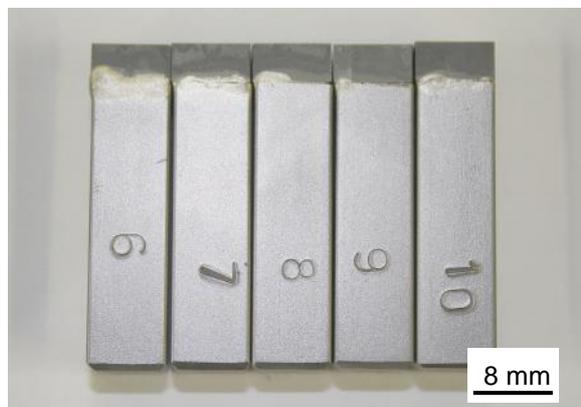


Abb. 3. Gelötete Probekörper aus Silberstahl (1.2210) und Hartmetall (K10) bei einer Prozesstemperatur von 760 °C und einer Haltezeit von 3 s

Die Fügeverbunde wurden induktiv im Brazing Center der Umicore AG mit einem Silberbasislot Ag 449 gelötet [7], das neben Silber noch 16 % Kupfer, 23 % Zinn, 7,5 % Mangan und 4,5 % Nickel besitzt, wobei das Nickel und Mangan als Legierungselemente die Benetzung des flüssigen Lotes auf dem Hartmetall fördern. Um den Lötprozess an Luft zu realisieren, wurde ein Flussmittelpaste FH 12 (nach DIN EN 1045) auf die zu fügenden Flächen aufgetragen. Unterschiedliche Fügeverbundqualitäten ließen sich ein Variieren der Prozesstemperaturen während des Lötens bei einer konstanten Haltezeit von 3 s realisieren. Die Temperatur wurde in den Untersuchungen mittels Pyrometer auf der Oberfläche des Hartmetalls gemessen. Pro Parameterwahl wurden 4 Bauteile gelötet und geprüft. In Abbildung 3 sind exemplarisch 5 Probekörper, die alle bei einer Prozesstemperatur von 760 °C und einer Haltezeit von 3 s gelötet wurden, abgebildet. Obwohl die Herstellung aller dargestellten Probekörper mit gleichen Prozesseinstellungen erfolgte, zeigt die Oberfläche der Lötnaht deutliche Unterschiede auf. Während bei Probe 6 das Lot aus der Naht ausgetreten ist und auch die äußere Oberfläche des Hartmetalls und Stahl benetzt hat, so dass ein homogener Übergang zwischen den Fügepartnern entstanden ist, sind an Probe 8 und 9 kleine Spalte in der Lötnaht zu erkennen, die bei einer Belastungen einen ungünstigen Spannungszustand und damit ein frühzeitiges Versagen der Fügeverbundung begünstigen.

Die elektrische Widerstandsmessung wurde an jeder Seite durchgeführt und somit der Mittelwert aus allen 4 Messwerten berechnet. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Diagramm von Abbildung 4 zusammengefasst.

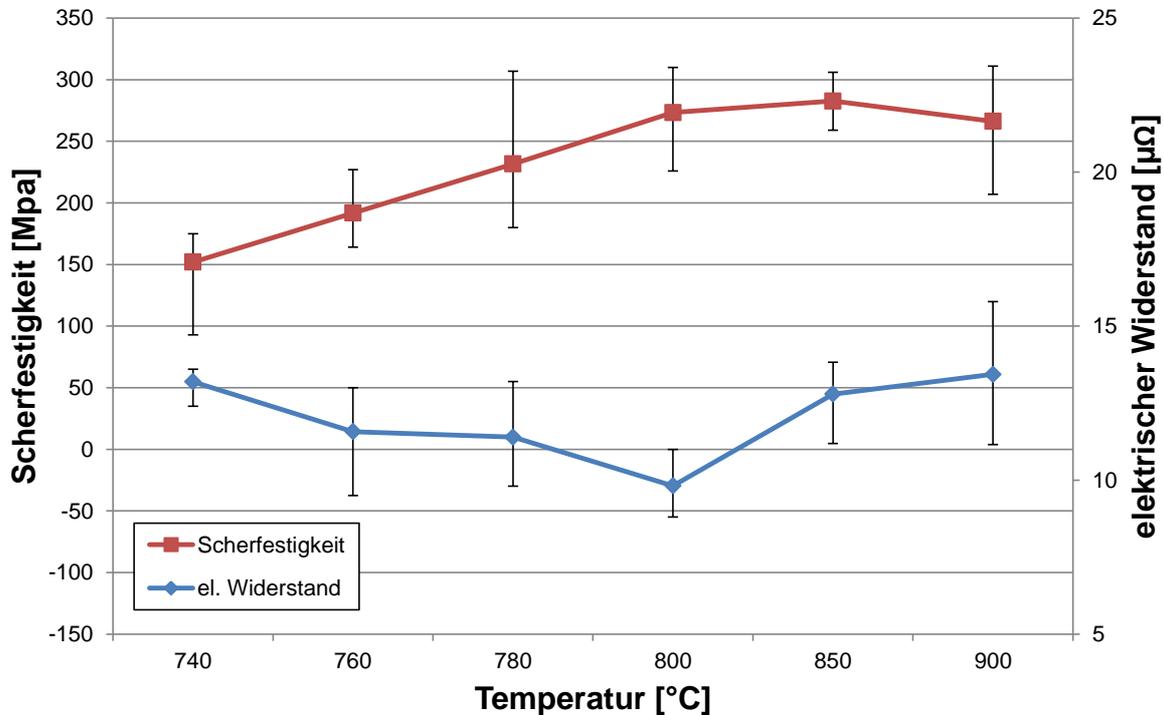


Abb. 4. Korrelation zwischen Scherfestigkeit und elektrischen Widerstand von gelöteten Fügeverbunden zwischen Stahl und Hartmetall [7]

Hierbei sind der Mittelwert je Parameterstufe als Punkt und durch die Fehlerbalken sowohl der höchste wie auch der niedrigste Messwert aus der Scherfestigkeitsprüfung bzw. Mittelwert je Probe der elektrischen Widerstandsmessung dargestellt. Beginnend bei einer Prozesstemperatur von 740 °C ist ein deutlicher Anstieg der Scherfestigkeit bis zu einem Maximalwert von knapp über 300 MPa zu erkennen, während der elektrische Widerstand kontinuierlich bis unterhalb von 10 $\mu\Omega$ sinkt. Bei der Scherfestigkeit existiert zwischen 800 °C und 850 °C ein leichtes Plateau, ehe die Scherfestigkeit in Folge einer Überhitzung der Fügezone bis auf 900 °C wieder abfällt. Der elektrische Widerstand beginnt hingegen ab 800 °C wieder zu steigen, so dass sich sowohl für die maximale Scherfestigkeit als auch für den minimalen elektrischen Widerstand ein Intervall zwischen 800 °C und 850 °C identifizieren lässt. Um das Verhalten des elektrischen Widerstandes genauer zu erklären, wurden die Bruchflächen der gescherten Probekörper fraktographisch und das Lötgut anhand von Querschliffen an zusätzlichen Proben analysiert. Die Resultate sind in jeweils in Abbildung 5 und 6 aufgeführt.

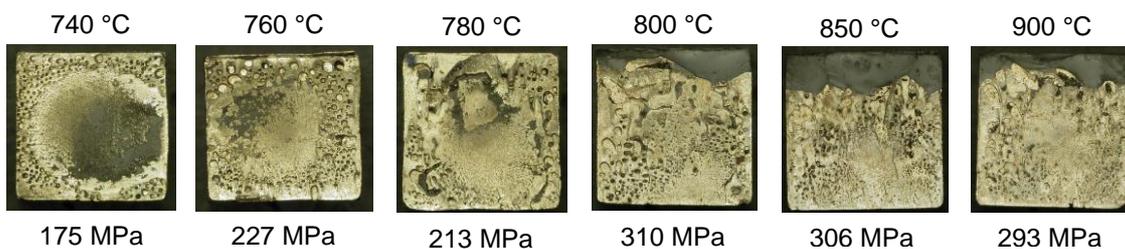


Abb. 5. Fraktographische Analyse der Bruchflächen auf der Hartmetallseite mit den zugehörigen Prozesstemperaturen bei einer Haltezeit von 3 s und den gemessenen Scherfestigkeiten

Bei der fraktographischen Analyse in Abbildung 5 sind 6 Bruchflächen für jeweils unterschiedliche Prozesstemperaturen zusammen mit der resultierten Scherfestigkeit aufgeführt. Bei den niedrigen Prozesstemperaturen von 740 °C bis 780 °C ist deutliche eine nicht vollständig benetzte Lotoberfläche auf dem Hartmetall in Folge einer zu geringen Erwärmung des Bauteils zu erkennen. Weiterhin sind im Lötgut zahlreiche, durch das Flussmittel bedingte Poren zu sehen. Hieraus resultiert eine nur geringe Scherfestigkeit von bis zu 227 MPa. Ab einer Prozesstemperatur von 800 °C konnte die Lötnaht vollständig mit dem Lot benetzt werden, so dass sich ein hochfester Fügeverbund ausgebildet hat. Auch das Flussmittel konnte durch die höhere Prozesstemperatur besser ausgasen, so dass die Porengröße und Anzahl deutlich kleiner ist. Dadurch konnten Festigkeiten von über 300 MPa erzielt werden und weiterhin erfolgte das Versagen nicht in der Lötnaht sondern initiierte im Hartmetall, so dass das Lötgut nicht die schwächste Komponente des Fügeverbundes darstellte. Die Informationen aus der fraktographischen Analyse erklären sowohl den Anstieg der Scherfestigkeit als auch das Sinken des elektrischen Widerstandes bis hin zu einer Prozesstemperatur von 800 °C, durch die zahlreichen Hohlräume in Folge der mangelhaften Benetzung und Poren im Lötgut. Steigt die Prozesstemperatur weiter auf bis zu 900 °C an, erhöht sich der elektrische Widerstand und die Scherfestigkeit fällt leicht herab. Durch die verbesserte Benetzung müsste allerdings sowohl ein geringerer Widerstand als auch eine erhöhte Festigkeit resultieren.

Aus diesem Grund wurden Querschliffe durch das Lötgut präpariert und das Gefüge mittels Farbniederschlagsätzungen nach Murakami zur Identifizierung von karbidischen Ausscheidungen analysiert. Die Befunde in Abbildung 6 zeigen das Lötgut an der Hartmetallseite. Das Ätzmittel wirkte nach den Empfehlungen von Schedler [8] nur 3 s ein, um komplexere Karbidformen der Form M_xC mit $x > 1$ zu visualisieren, so dass das Monokarbid WC des Hartmetalls selbst nicht mit dem Ätzmittel reagierte.

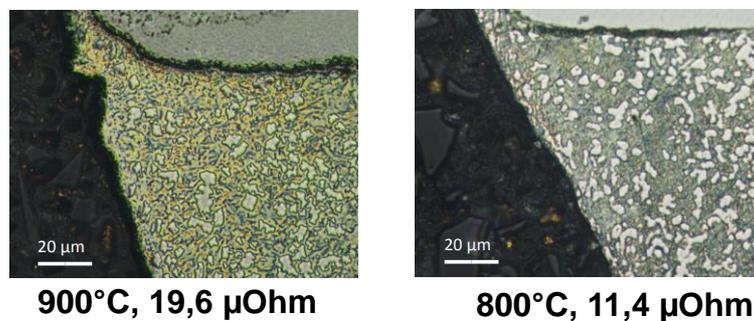


Abb. 6. Metallurgische Untersuchung des Lötgutes anhand von Farbniederschlagsätzung nach Murakami zur Identifizierung von Karbiden (gelb/braun)

Während bei einer Prozesstemperatur von 800 °C die Ätzung keine farblichen Rückstände hinterließ, ist bei einer Temperatur von 900 °C der Randbereich des Lötgutes komplett verfärbt. Dieser Befund deutet daraufhin, dass das flüssige Lot bei der hohen Prozesstemperatur mit dem Hartmetall reagiert hat und somit von Karbiden durchsetzt ist. Da Karbide einen höheren elektrischen Widerstand als metallische Werkstoffe aufweisen, erklärt dies den Anstieg der Widerstandsmessung aus Abbildung 4.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Herstellung hochfester Verbindungen zwischen Stahl und Hartmetall stellt das Löten für viele Unternehmen aus wirtschaftlicher und funktioneller Sicht die beste

Fügetechnologie dar. Das induktive Löten wird an Luft mit geeigneten Flussmittel realisiert und ermöglicht beanspruchungsfähige Lötnahte, wie sie beispielweise bei der Produktion von Kreissägen notwendig sind. Bei einem Abweichen von den idealen Prozessparametern kann es jedoch schnell zu kritischen Qualitätseinbußen kommen. Diese Lötfehler mit Hilfe etablierter zerstörungsfreier Prüfverfahren zu identifizieren ist bedingt durch die hohen Prüfkosten für viele Unternehmen nicht zu bewerkstelligen.

Eine potentielle Alternative stellt nach Erkenntnissen der vorliegenden Untersuchung die elektrische Widerstandsmessung zur Prüfung von gelöteten Fügeverbindungen zwischen Hartmetall und Stahl dar. Die Prüfmethode erlaubt die Identifizierung der signifikantesten Mängel, die die Betriebsfestigkeit der Fügeverbindung beeinträchtigen. Durch die Einfachheit des Prüfverfahrens und die vergleichsweise geringen Investitionskosten ließe sich die Prüfmethode in bestehende Fertigungslinien ohne großen Aufwand integrieren.

Allerdings sollte das Verfahren bezüglich der genauen Aussagefähigkeit bezüglich der Fehlertiefenlage analysiert werden. Außerdem müssen noch verschiedene Arten zur reversiblen und sicheren Kontaktierung entwickelt werden, um ein gänzlich zerstörungsfreies Prüfverfahren bereitzustellen.

7. Danksagung

Das IGF-Vorhaben 18469 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Weiterhin sei der Umicore AG und dem Leiter des dortigen Brazing Centers Herrn Schnee für die tatkräftige Unterstützung gedankt.

Referenzen

- [1] H. Ortner, P. Ettmayer und H. Kolaska, „The history of the technological progress of hardmetals,“ Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, pp. 148-159, August 2014P.
- [2] R. Kieffer und F. Benesovsky, Hartstoffe, Wien: Springer-Verlag, 1963
- [3] M. Roberts, „Brazing cemented carbide“, Metal construction , pp. 12-18, 1987
- [4] M. Strojczek, „Prozesssicheres Induktionslöten mit Lotpasten,“ DVS-Berichte 243, 2007
- [5] H. Haferkamp, D. Neumann, A. Frohmann, P. Cordini und M. Goede, „Löten von Hartmetallschneiden auf Sägeblätter“ Der Praktiker, pp. 256-258, 2002.
- [6] M. Bronny und M. Schimpferman, „Hartlöten von HW-Schneidwerkzeugen“ Umicore AG & Co. KG, Hanau, 2014
- [7] W. Tillmann, N. Sievers, D. Schnee, R. Zielke, L. Wojarski, H. Ries, F. Özkan: „Comparison between the Electrical Resistance and the Shear Strength of Brazed Cemented Carbides“, Proceedings International Conference on Brazing, Soldering and Special Joining Technologies, Beijing, 2014
- [8] W. Schedler, Hartmetall für den Praktiker, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988