

Elektrochemie · Galvanotechnik · Korrosion

Verbesserung der Zuverlässigkeit elektrischer Bimetallverbindungen aus Aluminium-Kupfer und Aluminium-Silber für die Energieübertragung im Temperaturbereich 90-200°C

Einleitung

Durch Alterungsprozesse ausgelöste Ausfälle elektrischer Verbindungen im Bereich der Energieübertragung können in Industriezweigen wie der Energieversorgung, Halbleitertechnik und Chemie zu hohen Umsatzeinbußen führen. Das genauere Verständnis dieser Alterungsmechanismen – speziell von Interdiffusionsprozessen mit intermetallischer Phasenbildung IMP – war Aufgabenstellung eines von der AiF geförderten Projekts (AiF 16903 BG) mit dem Ziel, eine Lebensdauerabschätzung dieser Verbindungen zu ermöglichen. Untersucht wurden die Systeme Aluminium-Kupfer (Al-Cu) und Aluminium-Silber (Al-Ag), da diese Werkstoffe in Bulkform oder als Beschichtung aufgrund ihrer guten elektrischen Leitfähigkeit häufig in der Elektroenergieübertragung eingesetzt werden. Dazu sollten die in den beiden Systemen bei Temperaturen bis 200 °C auftretenden IMP gezielt hergestellt und anschließend umfassend strukturell, mechanisch und elektrisch charakterisiert werden. Die gewonnenen Daten sollten eine Lebensdauerabschätzung von Al-Cu- bzw. Al-Ag-Verbindungen ermöglichen.

Herstellungsmethoden für intermetallische Phasen IMP

Zur Herstellung der IMP der Systeme Al-Cu und Al-Ag wurden verschiedene Herstellungsverfahren angewendet (Abb. 1): die physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) und elektrochemische Abscheidungsverfahren aus wässrigen und nicht-wässrigen Elektrolyten (ECD) sowie eine Kombination beider Verfahren (PVD+ECD).

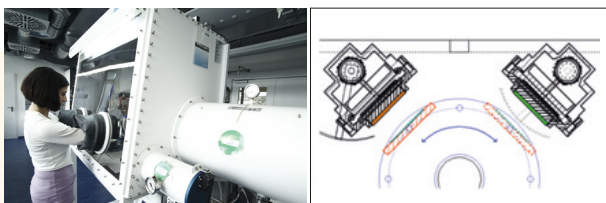


Abb. 1 | Herstellungsmethoden für IMP: Glovebox (links) und Magnetronspütern (rechts)

Im Anschluss wurden die Phasen strukturell, mechanisch und elektrisch charakterisiert. Abb. 2 zeigt schematisch die Synthesewege für die verschiedenen Probenvarianten. Dabei kann zwischen der Herstellung von dicken, freistehenden IMP im Bereich von 40 µm Dicke und dünneren, auf Glassubstraten geträgerten IMP im Bereich 2–5 µm Dicke unterschieden werden. Für die Charakterisierung der Proben – insbesondere die elektrische Vermessung – erwiesen sich die geträgerten Proben als günstig.

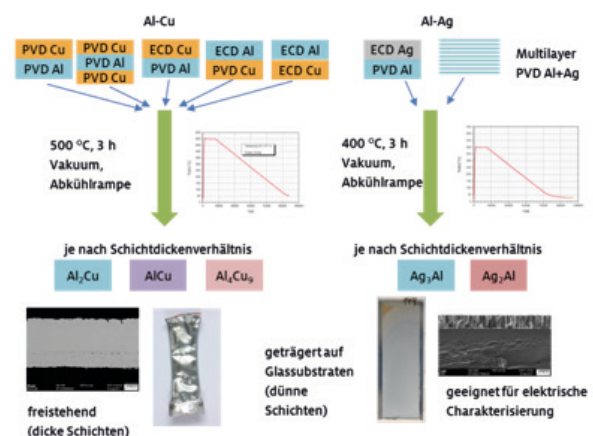


Abb. 2 | Synthesewege IMP (schematisch)

Ergebnisse

Im System Al-Cu dagegen ließen sich mit den genannten Methoden nur 3 der laut Zustandsdiagramm 5 zu erwartenden IMP herstellen: Al₂Cu, AlCu und Al₄Cu₉. Die beiden Phasen Al₂Cu₃ und Al₃Cu₄ konnten nicht bzw. nur als Nebenphase oder mit anderen Methoden synthetisiert werden. Im System Al-Ag wurden beide auftretenden Phasen hergestellt: Ag₂Al und Ag₃Al. Die Härtewerte der Al-Cu-Phasen lagen zwischen 630 HV (Al₂Cu und Al₄Cu₉) und 790 HV (AlCu) mit elastischen Eindringmodul von 105 GPa bis 150 GPa. Noch höhere Werte wurden an Phasengemischen (AlCu + Al₄Cu₉) ermittelt: 850 HV bzw. 160 GPa. Die Härte- werte der Ag-Al-Proben lagen bei 290 HV (Ag₂Al) bzw. 490 HV (Ag₃Al).

Für die elektrische Charakterisierung der Proben wurde ein auf die Anforderungen zugeschnittener Versuchsstand entworfen und aufgebaut (Abb.3). Der Widerstand der Proben wurde abhängig von der Temperatur gemessen und daraus der spezifische elektrische Widerstand und dessen Temperaturbeiwert bestimmt.

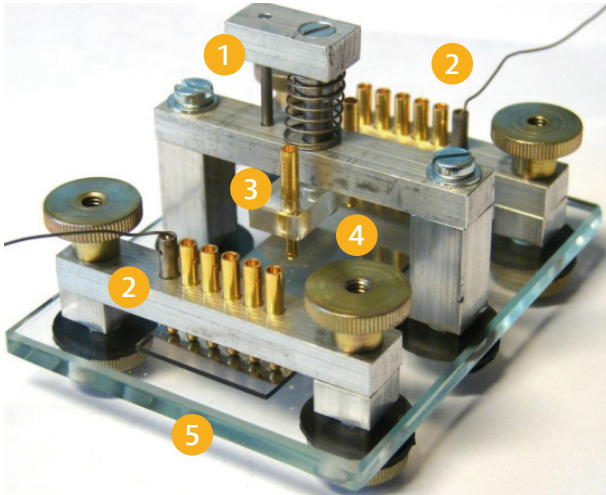


Abb. 3 | Prüfstand elektrische Eigenschaften: (1) Federmechanismus mit Verdrehsicherung, Halterung für Spannungsabgriffe, (2) Einspannvorrichtung mit Stromeinspeisung, (3) Spannungsabgriff, (4) IMP-Probe auf Glassubstrat, (5) Grundplatte aus Glas

Die Widerstände der IMP Al_2Cu und AlCu deckten sich dabei mit den Literaturwerten. Bei Al_4Cu_9 ergaben sich große Unterschiede zwischen den verschiedenen Herstellungsverfahren. Die Ursachen dafür konnten bisher nicht abschließend geklärt werden. Im System Al-Ag lag der spezifische elektrische Widerstand der Phasen etwas höher als in der Literatur angegeben. Dabei sind keine Unterschiede zwischen den verwendeten Herstellungsverfahren feststellbar. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Anhand der Ergebnisse der elektrischen Messungen, den Untersuchungen an Realproben und einer Modellrechnung zum Einfluss des Widerstandes der IMP kann ausgesagt werden, dass in beiden Systemen nicht allein die IMP-Bildung für das schlechte Langzeitverhalten der Verbindungen verantwortlich sein kann.

Eigenschaften	System Al-Cu	System Al-Ag
strukturell	3 von 5 Phasen darstellbar: Al_2Cu , AlCu , Al_4Cu_9	2 von 2 Phasen darstellbar: Ag_2Al , Ag_3Al
mechanisch	Al_2Cu 632HV, AlCu 794HV, Al_4Cu_9 636HV; vgl. Al 56HV, Cu 175HV	Ag_2Al 291HV, Ag_3Al 488HV, vgl. Al 56HV, Ag 72HV
elektrisch	$\rho_{\text{Al}_2\text{Cu}}$ und ρ_{AlCu} ähnlich Literatur, unabh. v. Herstellungsverfahren, $(5-7) \cdot \rho_{\text{Cu}}$ $\rho_{\text{Al}_4\text{Cu}_9}$: Werte > Literatur, große Unterschiede zwischen Herstellungsverfahren, $(9-22) \cdot \rho_{\text{Cu}}$	Werte bei beiden Herstellungsverfahren annähernd gleich, $\rho_{\text{Ag}_2\text{Al}}$ und $\rho_{\text{Ag}_3\text{Al}}$ wenig > Literatur, ρ_{IMP} deutlich höher als Reinelemente $\rho_{\text{Ag}_2\text{Al}} \approx 21 \cdot \rho_{\text{Ag}}$ $\rho_{\text{Ag}_3\text{Al}} \approx 33 \cdot \rho_{\text{Ag}}$
Fazit	Oxidation an Phasengrenze Al-Cu unterbindet IMP-Wachstum	Oxidation als Konkurrenzreaktion zur IMP-Bildung (O-Diffusion durch Ag)
Schlechte Langzeitstabilität bei Al-Cu-Verbindungen wird nicht allein durch IMP-Bildung verursacht.		

Tab. 1 | Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Nachweis, dass IMP nur in flächigen, fremd- und oxidfrei hergestellten, stoffschlüssigen Verbindungen entstehen und dort den Gesamtwiderstand einer Verbindung nicht signifikant beeinflussen, ist im Hinblick auf die Gestaltung künftiger Bimetallverbindungen von großem wissenschaftlichen und wirtschaftlichem Interesse.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 16903BG der Forschungsvereinigung Edelmetalle und Metallchemie wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Projekt: AiF 16903 BG

Forschungspartner

Technische Universität Dresden, Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik

Projektbegleitender Ausschuss

ABB Schweiz AG | Guggenberger-Aschenauer Metallveredelungswerk GmbH | Iolitec GmbH | Maschinenfabrik Reinhausen GmbH | Metge Consulting | Multi-Contact AG | Nehlsen Flugzeug-Galvanik | Schlötter Galvanotechnik Schneider Electric Sachsenwerk GmbH | Siemens AG | Werner Industrielle Elektronik

Ansprechpartner

fem | Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie | Katharinenstraße 17 | 73525 Schwäbisch Gmünd
Dipl.-Ing. Heidi Willing, willing@fem-online.de | Dipl.-Ing. (FH) Herbert Kappl, kappl@fem-online.de