

Einfluss intermetallischer Phasen auf die Langzeitstabilität von ultraschallgeschweißten Kupfer-Aluminium-Kontakten

Petzoldt, F.; Bergmann, J.P.; Schürer, R.; Schneider, S. (1)

Kupfer ist aufgrund seiner sehr guten elektrischen Leitfähigkeit der am häufigsten verwendete Werkstoff im Bereich der elektrischen Leiter und Kontaktierungen. Kostendruck und Leichtbau, vor allem im Automobilbereich, führen jedoch zu einer zunehmenden Substitution von Kupfer durch das wesentlich leichtere und zudem auch billigere Aluminium. Aus technologischen Gründen ist es jedoch oftmals nicht möglich Kupfer komplett zu ersetzen, so dass es an der Schnittstelle zwischen elektrischem Leiter und Gerät zu einer Bimetallverbindung aus Kupfer-Aluminium kommt.

In der Kontaktierungstechnik werden verschiedene Verbindungstechnologien verwendet. Während in der Starkstromtechnik häufig Schraub- und Steckverbindungen eingesetzt werden, werden in der Elektronikindustrie aufgrund geringerer Verbindungswiderstände eher stoffschlüssige Fügeverfahren, wie Löt- und Schweißverfahren, bevorzugt. Die entstehende Verbindung ist jedoch im Allgemeinen als bedingt schweißgeeignet zu bezeichnen, da die Grundwerkstoffe aufgrund ihrer sehr guten Wärmeleitfähigkeit und der hochschmelzenden Aluminiumoxidschicht ein schlechtes Benetzungsverhalten aufweisen. Hinzu kommt, dass das Zustandsdiagramm Kupfer-Aluminium eine Vielzahl spröder intermetallischer Phasen aufweist (Bild 1). Bilden sich diese in der Kontaktierungsstelle, so setzen sie nicht nur die Verbindungsfestigkeit stark herab, sondern besitzen auch im Vergleich zu den Grundwerkstoffen einen deutlich höheren spezifischen Widerstand (Bild 2).

Pressschweißverfahren, wie z. B. das Ultraschallschweißen, ermöglichen es, aufgrund der Vermeidung der schmelzflüssigen Phase, Kupfer mit Aluminium zu fügen und die Ausbildung von intermetallischen Phasen dabei weitestgehend zu minimieren, jedoch stellt sich die Frage nach der Langzeitstabilität der Verbindung. Wird die Verbindung im Einsatzfall später erhöhten Temperaturen ausgesetzt, kommt es zur Alterung

aufgrund von Interdiffusion und Korrosionsprozessen. Langzeitauslagerungen an geschraubten Stromschielen belegen, dass schon bei Temperaturen oberhalb von 100 °C Diffusionsprozesse zur Bildung intermetallischer Phasen führen [3]. Dadurch erhöht sich der Übergangswiderstand der Verbindung, was wiederum im

Einsatzfall, bei zusätzlichem Stromfluss, zu einer lokalen Erwärmung im Bereich der Fügestelle führt.

Untersuchungen verschiedener Autoren zum Diffusionsschweißen und Walzplattieren von Kupfer-Aluminium-Werkstoffen zeigen, dass sich bei Festphasendiffusionsprozessen die γ_2 -Phase (Cu_9Al_4), die η_2 -Phase (CuAl) und die θ -Phase (CuAl_2) bilden [4, 5, 6]. Zudem wird bei längeren Auslagerungszeiten die Bildung von Mikroporen aufgrund des Kirkendall-Effektes beschrieben [5].

Über die Langlebigkeit von stoffschlüssig gefügten Kupfer-Aluminium-Verbindungen können bisher nur wenige Aussagen getroffen werden. Die Untersuchungen beschränken sich meist auf das Wachstum und die Identifikation der intermetallischen Phasen. Die Auswirkungen auf den Übergangswiderstand der Verbindung, als entscheidendes Bewertungskriterium einer elektrischen Verbindung, werden dabei nicht betrachtet oder nur theoretisch diskutiert.

Zur Bewertung elektrischer Kontaktierungen wurde der Gütefaktor k als Vergleichsfaktor unterschiedlicher Verbindungen eingeführt [3, 7, 8]. Der Gütefaktor ergibt sich als dimensionsloser Quotient aus dem Verbindungswiderstand R_V und dem Widerstand des Leitermaterials gleicher Länge R_{Leit} . Bei heterogenen Verbindun-

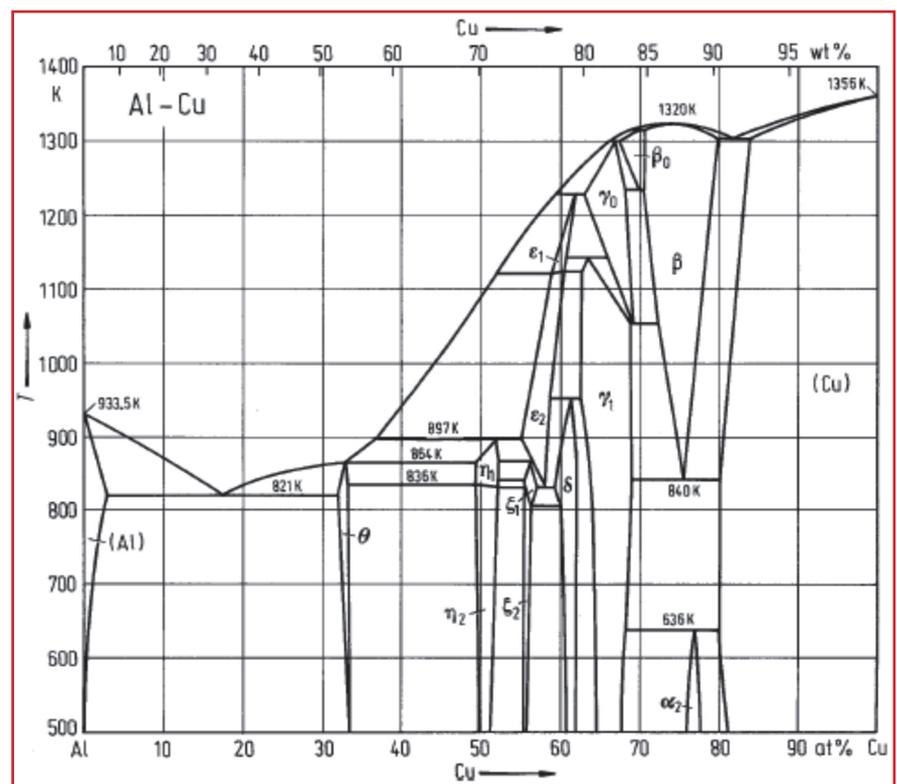


Bild 1: Aluminium – Kupfer – Phasendiagramm [1]

Phase	Cu [wt%]	Al [wt%]	Härte [HV]	spez. el. Widerstand [$\mu\Omega\text{cm}$]
Cu	100	0	100	1,75
γ_1	Cu_9Al_4	20	1050	14,2
δ	Cu_3Al_2	22	180	13,4
ζ_2	Cu_4Al_3	25	624	12,2
η_2	CuAl	30	648	11,4
θ	CuAl_2	45	413	8,0
Al	0	100	60	2,9

Bild 2: Ausgewählte Eigenschaften der intermetallischen Phasen nach [2]

gen wird der Gütefaktor auf den Werkstoff mit geringerem spezifischen Widerstand bezogen.

$$k = R_v / R_{\text{Leit x}} \quad (\text{I})$$

Bei stoffschlüssigen Verbindungen im Stumpfstoß gilt ein Gütefaktor von 1 als ideal, da unter Stromlast innerhalb der Verbindung keine größeren Verlustleistungen und somit keine erhöhte Temperaturentwicklung auftritt. Nach [7] ist ein Gütefaktor von 7 als kritisch zu bewerten, da ein Intermittierungsprozess einsetzt. Durch Auslagerungsversuche kann die Alterung der Verbindung bei definierten Bedingungen simuliert und die damit verbundene Widerstandsveränderung aufgenommen werden. Aus den ermittelten Kennwerten ist es möglich über eine Approximation die ungefähre Lebensdauer der Kontaktierung vorherzusagen.

Untersuchungsmethodik

Für die Auslagerungsversuche wurden 0,2 mm dicke Kupfer- und Aluminiumfolienstreifen (E-Cu mit zum Amboss hin einseitiger 0,01mm dicker Messingschicht; Al99,5) mittels eines torsionalen Ultraschallschweißverfahrens der Fa. Telsonic gefügt. Die Folien wurden dazu in 15 mm breite Streifen getrennt und im Überlappstoß mit einer quadratischen Sonotrodenform (4 x 4 mm) geschweißt. Als Schweißparameter wurden eine Anpresskraft von 150 N, eine Schweißzeit von 0,25 s und eine Sonotrodenauslenkung von 0,28 μm gewählt. Der resultierende Gesamtenergieeintrag betrug 230 Ws.

Die so generierten Proben wurden anschließend im Wärmeschrank bei $155 \pm 5^\circ\text{C}$ über 2.880 h unter Normalatmosphä-

re ausgelagert. In regelmäßigen Abständen von 240 h wurden Proben entnommen, deren elektrischer Widerstand bestimmt und im Anschluss daran metallografisch die Fügezone betrachtet, um das Wachstum möglicher intermetallischer Phasen zu dokumentieren.

Die Ermittlung des elektrischen Widerstandes erfolgte dazu nach dem Prinzip der Vierleiterschaltung und die Auswertung der Schlitze wurde am Aufrichtmikroskop AxioScope.A1 der Fa. Zeiss und am Philips FEI-REM XL30 mit EDX durchgeführt.

Um gesicherte Aussagen über das elektrische Verhalten von Verbindungen bei deutlich längeren Betriebszeiten zu erhalten, sind ergänzend Diffusionsschweißversuche bei 500°C und einem Anpressdruck von 5 N/mm^2 im Vakuum durchgeführt worden. Zur Erzeugung unterschiedlicher Diffusionsschichtdicken ist die Schweißzeit schrittweise von 15 auf 120 Minuten variiert worden. Die Auswertung der Pro-

ben erfolgte analog zu den ultraschallschweißten Proben.

Ergebnisse

Widerstandsentwicklung der ultraschallschweißten Proben

Zu Beginn der Untersuchungen ($t = 0$) wurde von allen ultraschallschweißten Verbindungen ein durchschnittlicher Verbindungswiderstand von $228,04 \pm 3,7\ \mu\Omega$ gemessen. Bezogen auf den Grundwerkstoff Kupfer mit einem Widerstand von $191,13 \pm 0,5\ \mu\Omega$ ergibt sich nach Gleichung I ein Gütefaktor von 1,2. Nach [8] ist eine Abweichung bis zu einem Gütefaktor von 1,5 für Überlappverbindungen zulässig. Die Abweichungen vom Idealwert begründen sich zum einen in dem nicht die komplette Streifenbreite einnehmenden Schweißpunkt und zum anderen durch Fehlstellen, wie mögliche Hohlräume oder Oxidschichtreste, die den zur Stromübertragung zur Verfügung stehenden Querschnitt reduzieren.

Im Anschluss wurden die Proben im Wärmeschrank für 2.880 h bei konstanter Temperatur von $155 \pm 5^\circ\text{C}$ ausgelagert. Alle 240 h wurden dem Wärmeschrank eine definierte Probenmenge von zehn zufällig ausgewählten Proben entnommen und charakterisiert. Dabei ergab sich der in Bild 3 dargestellte Verlauf des spezifischen elektrischen Widerstandes der Verbindung.

Die Verbindung erreichte zum Zeitpunkt $t = 0$ einen spezifischen elektrischen Widerstand von $0,0456\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Zum Ende des Untersuchungszeitraumes von

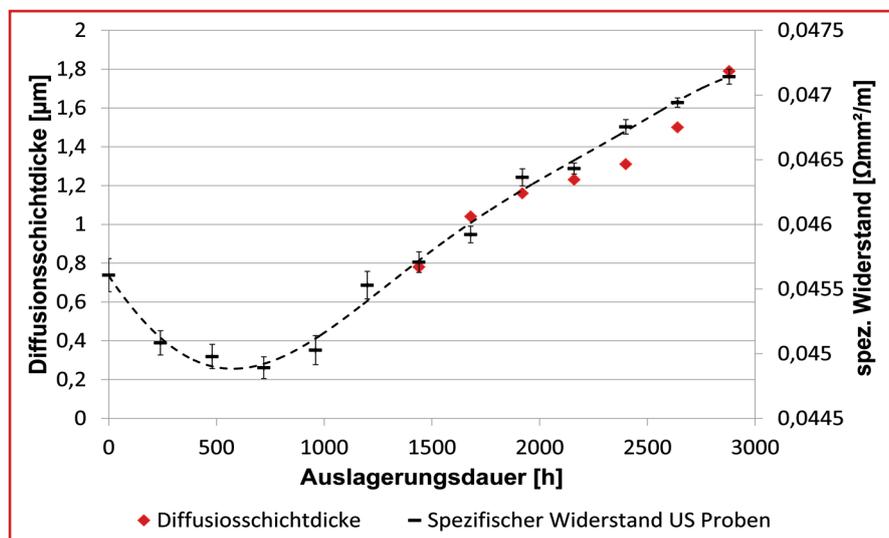


Bild 3: Dicke des intermetallischen Phasensaumes und Widerstandsentwicklung über die Auslagerungsdauer

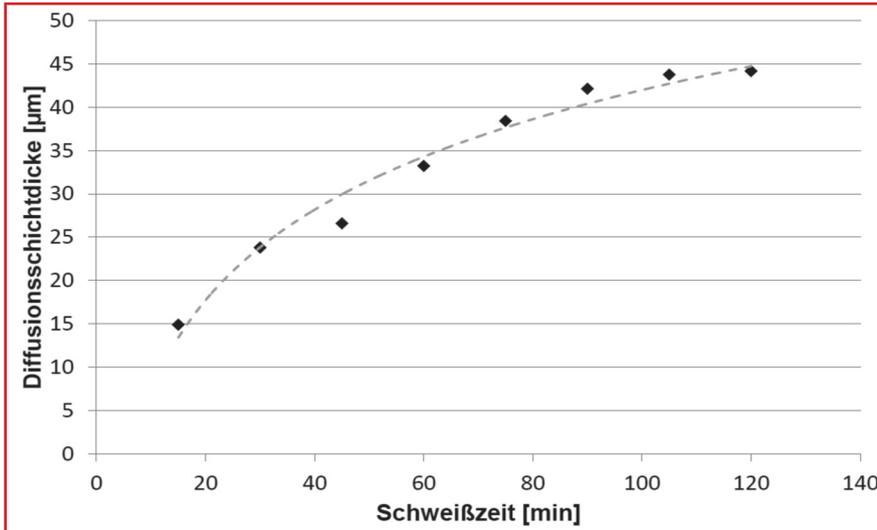


Bild 4: Wachstum der Diffusionszone mit Zunahme der Diffusionsschweißzeit

2.880 h stieg der spezifische Widerstand auf einen Wert von $0,0471 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, was einer Widerstandserhöhung von 3,4 % entspricht. Im gleichen Zeitraum stieg der spezifische Widerstand der Grundmaterialien lediglich um 0,8 % (Cu) bzw. 0,4 % (Al). Der Gütefaktor der Verbindung liegt nach 2.880 h bei 1,4 und kann bis dato als unkritisch betrachtet werden.

Betrachtet man den Verlauf des spezifischen Widerstandes, so ist auffällig, dass der Widerstand nicht wie erwartet von Beginn an steigt, sondern im 1. Drittel des Untersuchungszeitraumes fällt und sich erst nach ca. 720 h eine kontinuierlich ansteigende Tendenz ergibt. Mit Hilfe der mikroskopischen Auswertung lässt sich dies vor allem mit einem Schließen noch vorhandener Fehlstellen in der Fügezone aufgrund von Diffusions- und Kriechprozessen und damit einer Vergrößerung der zur Stromleitung zur Verfügung ste-

henden Fläche begründen. Zudem ist es möglich, dass die mit dem Ultraschallfügeprozess einhergehenden hohen Dehnraten die Leitfähigkeit der Verbindung herabsetzten. Erholungsprozesse durch die erhöhten Temperaturen führen zum Abbau der inneren Spannungen, wodurch es durchaus zu einem Widerstandsabfall zu Beginn des Untersuchungszeitraumes kommen kann.

Die mikroskopische Vermessung des sich bildenden intermetallischen Phasensaums bestätigt die Entwicklung des spezifischen Widerstandes (vgl. Bild 3). An den ultraschallgeschweißten Kupfer-Aluminium-Proben konnten weder im Licht noch im Elektronenmikroskop eine Diffusionszone nachgewiesen werden. Erst bei einer Auslagerung von mehr als 1.200 h bei $155 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ konnte eine Diffusionszone detektiert werden. Im Verlauf der Widerstandsentwicklung ist dieser Moment

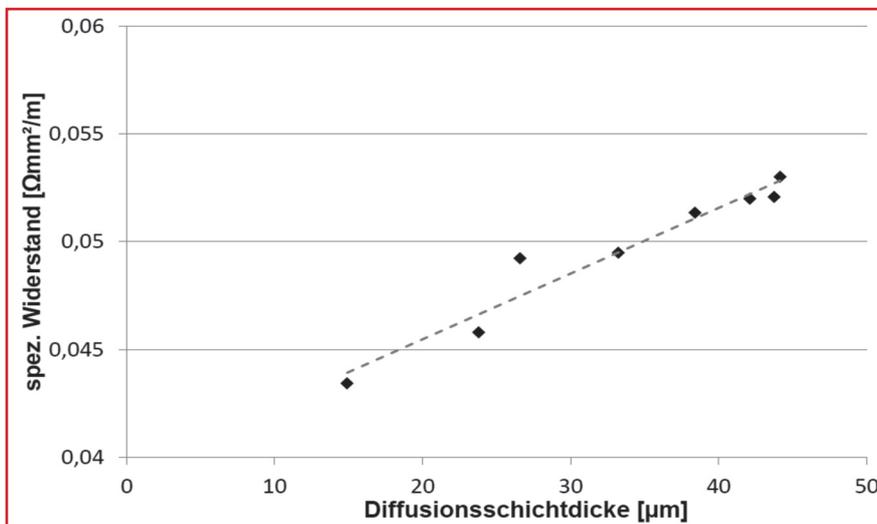


Bild 5: Abhängigkeit des spez. Widerstandes von der Diffusionsschichtdicke

durch einen sprunghaften Anstieg des spezifischen Widerstandes um 1,1 % gekennzeichnet. Im letzten Drittel des Untersuchungszeitraumes stellt sich ein relativ konstantes Phasenwachstum mit durchschnittlich $5,8 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}/\text{h}$ Schichtdickenzunahme ein.

Widerstandsentwicklung der diffusionsgeschweißten Proben

Da die intermetallischen Phasen im Kupfer-Aluminiumsystem bei der gewählten Auslagerungstemperatur von $155 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ sehr langsam wachsen und Oxidationsprozesse den elektrischen Widerstand zusätzlich beeinflussen, ist eine gesicherte Aussage über die Abhängigkeit der Dicke der intermetallischen Phase zu elektrischem Widerstand und somit das Langzeitverhalten anhand der Auslagerungsversuche nur bedingt möglich. Aus diesem Grund wurden Referenzproben in Vakuumatmosphäre diffusionsgeschweißte und analog zu den ultraschallgeschweißten Proben der elektrische Widerstand der Verbindung und der Gütefaktor bestimmt.

Bild 4 zeigt, dass das Wachstum der Diffusionszone nicht konstant abläuft, sondern dem parabolischen Wachstumsgesetz folgt. Bis 90 Minuten Schweißzeit ist ein annähernd kontinuierliches Schichtwachstum zu verzeichnen. Mit zunehmender Dicke der Diffusionszone verlangsamt sich jedoch das Schichtwachstum, da die sich bildenden Phasen aufgrund ihrer dichteren Gitterstruktur als Diffusionsbarrieren wirken und das weitere Schichtwachstum hemmen.

Die Darstellung von spezifischem elektrischem Widerstand über die Diffusionsschichtdicke (Bild 5) zeigt, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen Widerstand und Diffusionsschichtdicke gibt. Bei $500 \text{ }^\circ\text{C}$ Schweißtemperatur, $5 \text{ N}/\text{mm}^2$ Anpressdruck und Schweißzeiten bis zu 120 min wächst die Schichtdicke der Diffusionszone auf bis zu $44 \mu\text{m}$ an. Analog zur Schichtdicke steigt auch der spezifische Widerstand; so dass sich für eine Schichtdicke von $44 \mu\text{m}$ ein Gütefaktor von annähernd 4 ergibt.

Schlussfolgerung

Die Auswertung der Widerstandsentwicklung bei $155 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ über längere Zeiträume zeigt deutlich, dass der elektrische Widerstand einer Kupfer-Aluminium-Kontaktierung aufgrund verschiedener Alte-

rungsvorgänge steigt. Die Untersuchungen zeigen, dass auch bei den relativ geringen Temperaturen Interdiffusionsvorgänge an der Grenzfläche von Kupfer-Aluminium zur Ausbildung von intermetallischen Phasen führen. Die Bildung intermetallischer Phasen innerhalb einer Fügeverbindung wird als kritisch betrachtet, da die intermetallischen Phasen aufgrund ihrer, von den Grundwerkstoffen stark abweichenden, physikalischen Eigenschaften (hohe Härten, geringe Ausdehnungskoeffizienten, etc.) die Verbindungsfestigkeit herabsetzen. Im Fall der elektrischen Leiter kommt hinzu, dass der höhere spezifische elektrische Widerstand der intermetallischen Phase bei Stromfluss zu einer zusätzlichen Wärmequelle direkt innerhalb der Grenzfläche führt. Dadurch wird die Alterung aufgrund von Interdiffusion und intermetallischer Phasenbildung unvermeidlich.

Mit Hilfe der Diffusionsschweißversuche konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass ein direkter Zusammenhang zwischen intermetallischer Phasendicke und spezifischem elektrischen Widerstand der Fügeverbindung besteht. Ausgehend von dieser Erkenntnis kann mittels des kritischen Gütefaktors $k = 7$ [6] die entsprechende kritische intermetallische Phasendicke abgeschätzt werden.

$$\frac{\partial k(d)}{\partial d} = \frac{k(DB) - k(US)}{d(DB) - d(US)} = 0,065 \mu\text{m}^{-1}$$

$$d_{krit} = \frac{k_{krit} - k_0}{0,065 \mu\text{m}^{-1}} = 89,4 \mu\text{m}$$

Für die Verbindung von Kupfer-Aluminium errechnet sich eine Schichtdicke von ca. $90 \mu\text{m}$ als kritisch. Setzt man vereinfachend ein konstantes Phasenwachstum voraus ist es möglich eine Lebensdauer der Verbindung unter konstanten Bedingungen abzuschätzen. Im Untersuchungsbeispiel wächst der intermetallische Phasensaum bei konstanten Auslagerungsbedingungen unter $155 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ um $5,8 \cdot 10^{-4} \mu\text{m/h}$. Damit ergibt sich rechnerisch ein Zeitraum von ca. 17 Jahren bevor die kritische Schichtdicke erreicht wird.

Zu beachten ist, dass dies eine vereinfachte Schätzung ist, da nur thermische Alterungsprozesse berücksichtigt und konstantes Schichtwachstum vorausgesetzt wird. Unter Realbedingungen, d. h. bei elektrischem Stromfluss, korrosivem Angriff und thermo-mechanischen Wechselbelastungen, ist davon auszugehen, dass zusätzliche Alterungsprozesse wie z. B. Elektromigrationsprozesse und Reibkorrosion den Verbindungswiderstand negativ beeinflussen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Herrn Schneider und Herrn Lang der Fa. Telsonic

für die Unterstützung bei der Herstellung der ultraschallgeschweißten Proben.

Literatur

- [1] Landolt-Börnstein: New series IV/5 Thermodynamic Properties, Phase Equilibria, Crystallographic and Thermodynamic, Data of Binary Alloys; Volume: 5; Springer-Verlag (1998)
- [2] Braunovic, M.; Konchits, V. V.; Myshkin, N. K.: Electrical contacts, fundamentals, applications and technology; CRC Press 2007
- [3] Schneider, R.; Löbl, H.; Großmann, S.; Schoenemann, T.; Holdis, M.: Langzeitverhalten von Aluminium-Kupfer-Verbindungen in der Elektroenergietechnik; Metall 63 (2009); pp 591-594
- [4] Calvo, F. A.; Urena, A.; Gomez de Salazar, J. M.; Moleda, F.: Special features of the formation of the diffusion bonded joints between copper and aluminium; Journal of Material science 23 (1988); pp 2273-2280
- [5] Peng, X. K.; Wuhrer, R.; Heness, G.; Yeung, W. Y.: On the interface development and fracture behaviour of roll bonded copper / aluminum metal laminates; Journal of Material Science 34 (1999); pp 2029-2038
- [6] Papkala, H.; Piekos, A.: Pressure welding of aluminium to copper; Welding international; Vol 20; No. 3; pp 173-182
- [7] Bergmann, R.: Zum Langzeitverhalten des Widerstandes elektrischer Stromschienenverbindungen, Fortschrittbericht VDI, Reihe 21: Elektrotechnik; Nr. 195, VDI Verlag 1996
- [8] Großmann, S.; Löbl, H.; Schlegel, S.: Erfahrungen zum Langzeitverhalten von Aluminium-Verbindungen in Starkstromanlagen; 21. Albert-Keil-Kontaktseminar 2011, Karlsruhe; pp 129-135

(1) *Fachgebiet Fertigungstechnik; Technische Universität Ilmenau, info.fertigungstechnik@tu-ilmenau.de*