



Arbeitsgemeinschaft
Wärmebehandlung + Werkstofftechnik e.V.

Arbeitsblatt

Einsatz hocheffizienter Elektronenstrahl-Ablenktechnik zur Randschichtmodifizierung von Aluminiumwerkstoffen

AiF-Nr.:
16385 BG

Obmann:
Prof. P. Krug, Dipl.-Ing. H. Weiß

beteiligte Unternehmen
AUDI AG, Ingolstadt

IWB Werkstofftechnologie GmbH, Chemnitz

IMA GmbH, Dresden

Martinrea Honsel Germany GmbH, Meschede

OSK Kiefer GmbH, Oberhausen

PEAK Werkstoff GmbH, Velbert

pro-beam systems GmbH, Neukirchen

Sennestahl GmbH, Bielefeld

Laufzeit:
01.02.2010 – 31.07.2012

Erstelldatum:
12.11.2012

Forschungsstelle:
Stahlzentrum Freiberg e.V.

Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen

Struktur- und Werkstoffmechanikforschung
Dresden gGmbH

Projektleiter:
Prof. R. Zenker (SZF e.V.)

Dr.-Ing. A. von Hehl (Stiftung IWT)

Prof. R. Franke (SWM gGmbH)

Sachbearbeiter:
Dipl.-Ing. M. Klemm (SZF e.V.)

Dipl.-Ing. A. Rose (Stiftung IWT)

Dr.-Ing. I. Haase (SWM gGmbH)

Forschungsvereinigung:
AWT

Projektbegleitender Fachausschuss
FA 24 (Wärmebehandlung von NE-Metallen)

Zielsetzung und Lösungsweg

Im Rahmen des Vorhabens wurden Untersuchungen zum lokalen Werkstoffengineering ausgewählter Aluminiumwerkstoffe für die beanspruchungsoptimierte Modifizierung der Randschichteigenschaften mittels Elektronenstrahl(EB)-Flüssigphasen-Randschichtbehandlung durchgeführt. Ziel des Projektes war die Weiterentwicklung und Optimierung neuer EB-Mehrprozessstechnologien unter Nutzung hocheffizienter Strahl-Ablenktechnik zur Verbesserung der Randschichtqualität (Risse, Poren u. a.) und der Randschichteigenschaften (z. B. Härte, Verschleiß) und die Verringerung des Bearbeitungsaufwandes im Gesamtprozess durch die Kombination einzelner EB-Behandlungsschritte in einem Prozessdurchlauf. Die Versuche wurden mit den Basistechnologien EB-Umschmelzen (EBU, ohne Zusatzstoff), EB-Umschmelzlegieren (EBUL, mit Co-, Cu-, Ni-Basis-Zusatzstoffen), EB-Umschmelzdispersionslegieren (EBUDL, mit WC-Basis-Zusatzstoff) und deren Kombination mit verschiedenen Untersuchungsschwerpunkten realisiert. Die durchgeführten Arbeiten lassen sich in folgende Schwerpunkte und Zielstellungen gliedern:

- a) Prozesstechnik (SZF e.V.)
 - EB-Randschichtbehandlung unter Nutzung der EB-Anlage K26-15/80 an der TU Bergakademie Freiberg (hochfrequente 3D-Strahlableitung)
 - Weiterentwicklung und Optimierung neuer EB-Randschicht-Technologien sowie Bereitstellung anwendungsbereiter Behandlungstechnologien
- b) Werkstoffanalytik (SZF e.V., Stiftung IWT)
 - Charakterisierung der Werkstoffe und Schichtsysteme (Struktur-/Gefügeanalyse, Phasenanalytik, Eigenspannungszustände, mechanisch-technologische Eigenschaften u. a.)
 - Ermittlung grundlegender Zusammenhänge zwischen technologischen Parametern, Struktur/Gefüge und Eigenschaften
- c) Verschleißverhalten (SWM gGmbH)
 - Charakterisierung des Reibungs-/Verschleißverhaltens der Schichten unter Mischreibungsbeanspruchung bei erhöhter Temperatur
 - tribologische Schadensanalyse

Ergebnisse

Prozesstechnik

Ausgehend von den bereits bekannten Ergebnissen [1-5] aus dem Forschungsvorhaben 15219 BG wurden zunächst prozessspezifische Untersuchungen zur Erforschung des Einflusses der Strahlparameter und der Strahlführungstechnik durchgeführt, um geeignete Behandlungsstrategien für unterschiedliche Grundwerkstoff-/Zusatzstoff-Kombinationen generieren zu können, geeignete Parameterfenster zu definieren sowie technisch-technologische Grenzen und Möglichkeiten abzuleiten. Ausgehend von den Versuchsergebnissen wurde eine geeignete Behandlungsstrategie in Form einer EB-Zweiprozess-Flüssigphasen-Technologie (Bild 1) entwickelt, mit einer Bahnbreite von 20 mm erprobt und für das EBUL und EBUDL bzgl. verschiedener Grundwerkstoff-/Zusatzstoff-Kombinationen optimiert. Vor der EB-Behandlung wurden die Zusatzstoffe durch thermisches Spritzen auf den Flachproben deponiert.

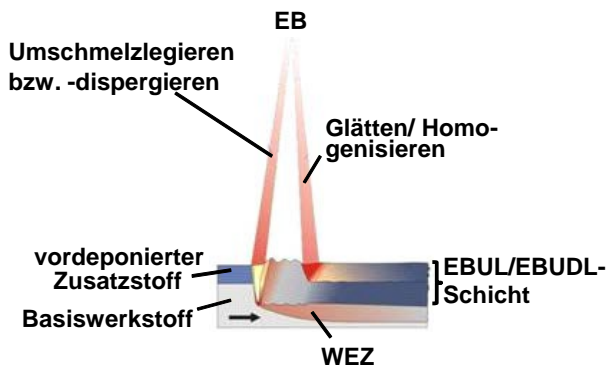


Bild 1: EB-Zweiprozess-Flüssigphasen-Randschichtbehandlung von Aluminium-Werkstoffen

Werkstoffanalytik und Verschleißverhalten

Das EB-Umschmelzen ist ein Verfahren zur Modifizierung des Randschichtgefüges ohne lokale Veränderung der chemischen Zusammensetzung. Die durch das EBU erreichten Schichtdicken (0,5 bis 6,2 mm) und die Oberflächendeformation sind abhängig von den EB-Parametern.

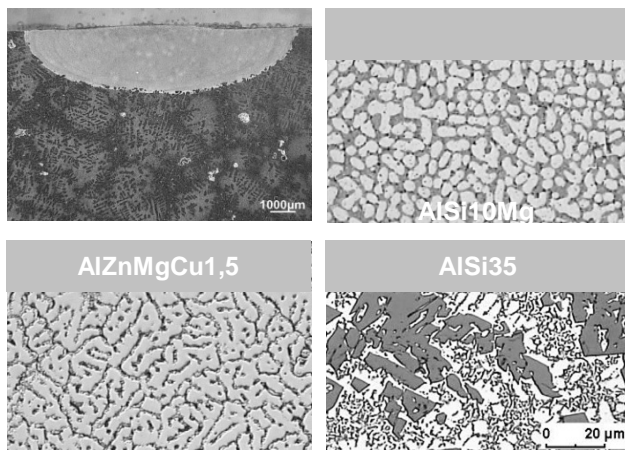


Bild 2: Randschichtgeometrie (AlSi10Mg) und Gefüge nach dem EB-Umschmelzen (□ Detail)

Lokal lässt sich ein homogenes und zumeist deutlich feineres Gefüge als im Grundwerkstoff einstellen. Unabhängig vom Herstellungsverfahren der Ausgangswerkstoffe entsteht im Randschichtbereich ein Gussgefüge. Der Dendritenarmabstand des α -Al-Mischkristalls (Ausgangszustand $\geq 45 \mu\text{m}$) sinkt auf Werte von 2 ... 9 μm . Im Falle der sprühkompaktierten Legierung AlSi35 tritt eine Vergrößerung des primären Siliziums ein (Bild 2).

Die Verbesserung von Härte und Verschleißeigenschaften in Folge der Gefügefinesung ist jedoch limitiert und setzt möglichen Applikationen hinsichtlich mechanischer Belastungen Grenzen. Die Oberflächenhärte und die Ritzenergiedichte erreichen maximal das 1,9-fache des Grundwerkstoffniveaus (Druck-, Sandguss-, sprühkompaktierte Werkstoffe). Die Legierungen AlSi12CuNiMg und AlZnMgCu1,5 erfahren eine Verringerung der kennzeichnenden Eigenschaften um 10 bis 40 %.

Das Reibungs- und Verschleißverhalten (Modell: Zylinder/Scheibe, oszillierend, in Motorenöl 5W-30, $T_{\text{Öl}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$) kann durch das EBU für die sprühkompaktierten Legierungen verbessert werden. Der spezifische Verschleißkoeffizient sinkt um einen Faktor von 7,5. Der Reibungskoeffizient wird um ca. 40 % verringert. Die Guss- und Knetlegierungen erfahren eine drastische Erhöhung des Verschleißkoeffizienten (bis um den Faktor 240) und des Reibungskoeffizienten (Faktor 2,7 bis 5,2).

Nach dem EBU werden phasenspezifische Druckeigenstressungen (Al: {422}-Gitterebene) von bis zu -50 MPa in der Schichtmitte erzeugt. Diese sind bei den Gusslegierungen stärker als bei den sprühkompaktierten Legierungen ausgeprägt.

Das Lochkorrosionsverhalten (0,01 M NaCl) bleibt nach dem EBU weitgehend unbeeinflusst. Für alle Gusswerkstoffe wird eine geringe Verbesserung von Ruhepotenzial und Korrosionsstromdichte erzielt.

Das EB-Umschmelzlegieren ist ein sehr gut geeignetes Verfahren zur Modifizierung der Randschichteigenschaften von Aluminium-Werkstoffen. Die bei den Versuchen zum EBUL realisierten Schichtdicken (0,5 ... 4,2 mm), die Bahngeometrie und die Schichtqualität sind abhängig von den Strahlparametern, insbesondere der Strahlführungstechnik bzw. der Behandlungsstrategie. Durch die Kombination von verschiedenen Teilprozessen unter Verwendung der hochfrequenten Strahlablenkung kann die Schichtqualität deutlich verbessert werden. Insbesondere im Hinblick auf die bei hohen Zulegerungsanteilen (auf umgeschmolzenes Volumen bezogener Zusatzstoffanteil) erreichbaren Randschichtwertwerte, können die durch Rissbildung limitierten nutzbaren Eigenschaftspotenziale [1] zu höheren Grenzwerten verschoben werden (Gusslegierungen: $\leq 400 \text{ HV } 0,1$ / sprühkompaktierte Legierungen: $\leq 600 \text{ HV } 0,1$). Es wird zudem deutlich, dass die Variation des Zulegerungsanteils die Anteile verschiedener Gefügebestandteile direkt beeinflusst. Somit wird es möglich, für alle Werkstoff-

Kombinationen technisch nutzbare Eigenschaftsintervalle zu realisieren (Bild 3).

Das homogene und in den meisten Fällen sehr feine Randschichtgefüge mit veränderter chemischer Zusammensetzung weist in Abhängigkeit vom Zulegierungsanteil und dem verwendeten Zusatzstoff neue Phasen, vor allem komplexe Eutektika und intermetallische Verbindungen (z. B. Al_9Co_2 , $Cr_{15}Ci_9Si_6$, Al_3Ni_2 , $NiSi_2$, $Al_{21}Cu_{12}Ni_3$) auf.

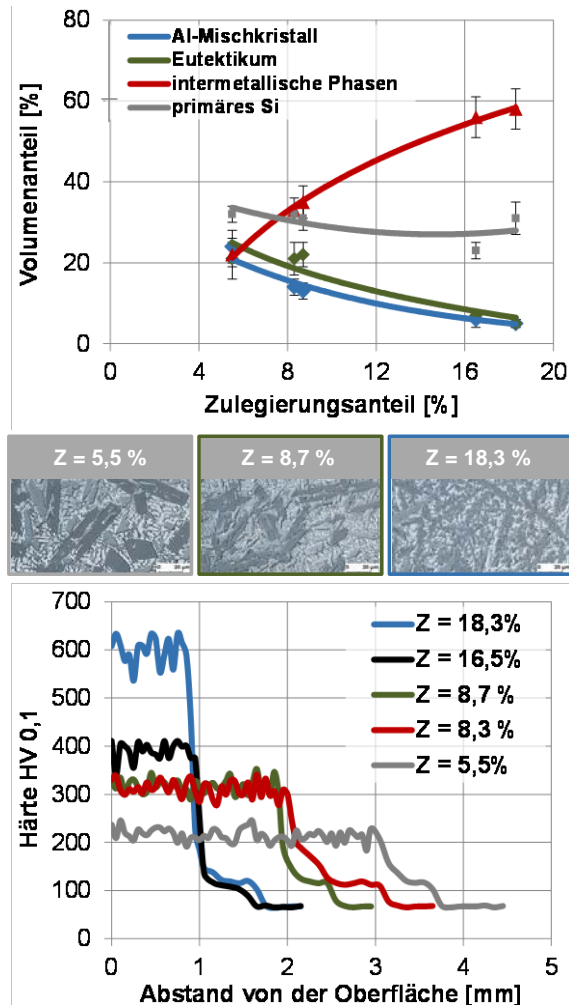


Bild 3: Einfluss des Zulegierungsanteils auf die Gefügeausbildung und die Randschichthärtigkeit nach dem EBUL (AlSi35, Zusatzstoff CuNi38)

Mittels EBUL können Härtesteigerungen um etwa 16 % für die Knetlegierung, um einen Faktor 2 bis 3,7 für die Gusswerkstoffe und um einen Faktor 1,3 bis 7,8 für die sprühkompaktierten Legierungen erzielt werden. Die Ritzenergiedichte steigt im Falle der Knetlegierung nach dem EBUL um ca. 40 %. Die EBUL-Schichten der Guss- und sprühkompaktierten Legierungen weisen 1,4 bis 4-fache Werte der Ritzenergiedichte der Ausgangsmaterialien auf. Die größten Steigerungen der kennzeichnenden Randschichteigenschaften werden durch das EBUL mit Cu- bzw. Ni-Basis-Zusatzstoffen erzielt.

Bezüglich des Reibungs- und Verschleißverhaltens erfährt die Knetlegierung AlZnMgCu1,5 zwar starke Verbesserungen des spezifischen Verschleißkoeffizienten (Faktor 3 bis 100), befindet sich aber im Vergleich zu den anderen Al-Legierungen immer

noch auf einem relativ niedrigen Niveau. Die Gusslegierungen weisen nach dem EBUL mit Cu- und Co-Basis-Zusatzstoff deutlich verringerte spezifische Verschleißkoeffizienten auf (Faktor 2,5 - 4). Der Reibungskoeffizient bleibt nahezu konstant. Im Vergleich zum unbehandelten Material erfährt die sprühkompaktierte Legierung AlSi35 die stärksten Verbesserungen. Für das EBUL mit Cu- und Ni-Basis-Zusatzstoffen sinkt der spezifische Verschleißkoeffizient um den Faktor 14, für Co-legierte Randschichten um den Faktor 6,4. Der Reibungskoeffizient wird um etwa 25 % reduziert. In allen Fällen erfolgt die Schädigung der Randschichten durch mikroabrasive Prozesse, durch das Brechen und Herauslösen harter Gefügebestandteile (z. B. Si_p , intermetallische Verbindungen).

Das Korrosionsverhalten (0,01 M NaCl-Lösung) wurde exemplarisch für die Legierungen AlSi9Cu3 und AlSi35 nach dem EBUL mit Cu-Basis-Zusatzstoff untersucht. Die Gusslegierung erfährt eine Verbesserung von Ruhepotential und Korrosionsstromdichte und erreicht ein Niveau, das dem der Legierung AlSi35 im Ausgangszustand entspricht. Bei der Legierung AlSi35 wird nach dem EBUL mit CuNi38 eine Verschlechterung des Lochkorrosionsverhaltens festgestellt.

Ausgehend von der Schichtmitte, quer zur Behandlungsrichtung liegen im Bereich maximaler Härte überwiegend Druckspannungen (bis -120 MPa) vor. Im Übergang zum Schichtrand wechseln diese in den Zugspannungsbereich bzw. treten alternierend auf. Im Bereich der Wärmeeinflusszone liegen keine bzw. Zugeigenstressungen vor (Bild 4).

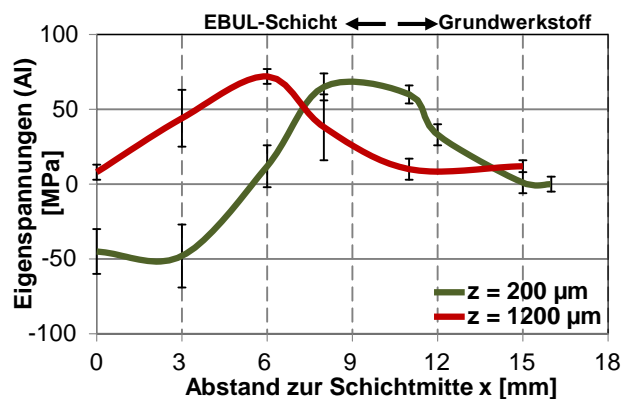


Bild 4: Quereigenstressungen senkrecht zur Behandlungsrichtung in verschiedenen Tiefen (z) nach dem EBUL (AlSi9Cu3, Zusatzstoff CuNi38)

Im Vergleich zu den unbehandelten Materialien und den ohne Zusatzstoff umgeschmolzenen Randschichten kommen EBUL-Schichten auf Aluminiumwerkstoffen auch für Applikationen mit höheren Anforderungen, insbesondere bzgl. Verschleißbeanspruchungen, in Betracht.

Das EB-Umschmelzdispersionslegieren mit harten WC-Partikeln wurde an den Guss- und sprühkompaktierten Legierungen untersucht. Das EBUDL muss mehrstufig gestaltet werden, um eine ausreichend gute Verteilung der Hartstoff-Partikel zu erzielen (Bild 5).

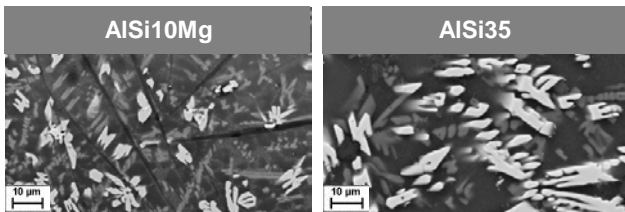


Bild 5: Gefügeausbildung nach dem EBUDL mit WC/Co-Zusatzstoff (WC-Partikel: hellgraue Bereiche)

Bedingt durch die geringen Legierungseffekte in der Randschichtmatrix sind im Vergleich zum EBUL keine stärkeren Steigerungen von Härte und Ritzenergiedichte zu verzeichnen. Beide Kennwerte steigen auf etwa das 1,3 bis 4,8-fache des Grundwerkstoffniveaus. Ähnliche Tendenzen zeigen sich für das Reibungs- und Verschleißverhalten (Bild 6).

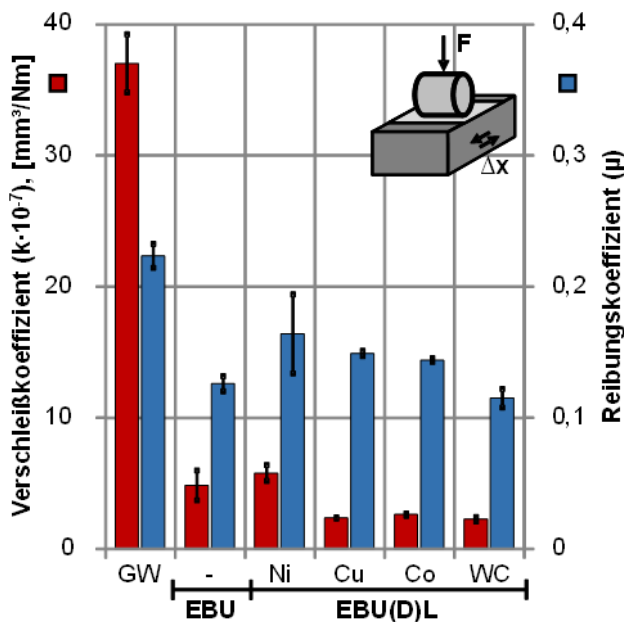


Bild 6: Tribologische Eigenschaften in Abhängigkeit von der EB-Randschichttechnologie (AISi35)

Um übergreifend die Effekte des EBUL und EBUDL zum Tragen zu bringen, wurde eine Mehrstufen-Technologie entwickelt, sodass Randschichten mit gradierten Eigenschaftsprofilen erzeugt werden konnten (Bild 7). Diese Schichten enthalten durch das EBUL ein geeignetes, hartes Matrixgefüge (≤ 600 HV 0,1) und gleichzeitig harte "WC-Inseln" (≤ 2000 HV 0,01). Die Kombinationsbehandlung hat zur Folge, dass Härtesteigerungen von bis zu einem Faktor von 8,4 erzielt werden können. Die Ritz-

energiedichte nimmt um das 3,2 bis 4,2-fache zu. Für das Verschleißverhalten sind dadurch deutliche Verbesserungen zu erwarten (Gusswerkstoffe: Faktor ≤ 5 / sprühkompaktierte Legierungen: Faktor ≤ 20). Die Kombination der Technologien Randschichtlegieren/-dispersieren von Al-Legierungen kann als spezielle Lösung für Applikationen mit höchsten Anforderungen, speziell bei Gleitreibungsbeanspruchung, angesehen werden.

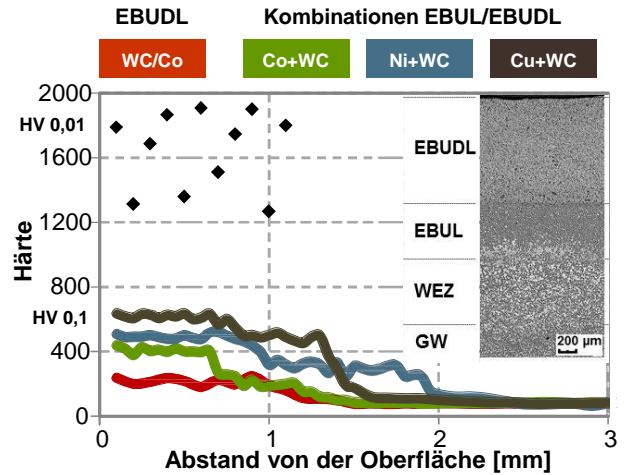


Bild 7: Schichtaufbau und Härteprofile nach dem EBUDL bzw. EBUL+EBUDL (AISi35)

Fazit

Die Ergebnisse zur EB-Randschichtbehandlung von Al-Legierungen zeigen die Potenziale moderner EB-Technologien auf. Unter Nutzung der Möglichkeiten der hochfrequenten Strahlableitung in Verbindung mit EB-Flüssigphasen-Mehrprozessstechnologien gelingt es äußerst effizient, die Schichtqualität und die nutzbaren Eigenschaften von Schicht-Matrix-Verbunden deutlich zu verbessern. Mit dem Nachweis der Anwendbarkeit der EB-Mehrprozessstechnologien [6] wird eine neue Entwicklungsrichtung auf dem Gebiet der EB-Strahlführungstechniken eingeleitet, welcher ausgezeichnete Chancen für die industrielle Umsetzung prognostiziert werden.

Literatur

[1] Schlussbericht IGF-FV15219BG, 2009
 [2] HTM 64 (2009) 4, S. 208-214
 [3] Wear 269 (2010) 11-12, S. 921-929
 [4] Tribologie + Schmierungstechnik 58 (2011) 4, S. 14-19
 [5] Materials Science Forum 169 (2011), S. 79-82
 [6] Schlussbericht IGF-FV16385BG, 2012

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 16385 BG der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. 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.

Es wurde vom Fachausschuss 24 (Wärmebehandlung von NE-Metallen) der AWT betreut.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages