UNIVERSITÄT AUGSBURG
Universitätsbibliothek

OPEN ACCESS
OPUS AUGSBURG

Verbesserung der Werkstoff- und Bauteileigenschaften von Luftfahrtstringern durch Verbundstrangpressen

T. Hammers, D. Pietzka, T. Kloppenborg, Kay A. Weidenmann, E. Kerscher, M. Schikorra, A. E. Tekkaya, D. Löhe

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Hammers, T., D. Pietzka, T. Kloppenborg, Kay A. Weidenmann, E. Kerscher, M. Schikorra, A. E. Tekkaya, and D. Löhe. 2009. "Verbesserung der Werkstoff- und Bauteileigenschaften von Luftfahrtstringern durch Verbundstrangpressen." In *Integration von Umformen, Trennen und Fügen für die flexible Fertigung von leichten Tragwerkstrukturen: Zwischenbericht der Phase 2, 1. Januar 2007 bis 31. Dezember 2008*, edited by A. E. Tekkaya, 351–69. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Nutzungsbedingungen / Terms of use:

licgercopyright

Dieses Dokument wird unter folgenden Bedingungen zur Verfügung gestellt: / This document is made available under these conditions:
Deutsches Urheberrecht
Weitere Informationen finden Sie unter: / For more information see:
https://www.uni-augsburg.de/de/organisation/bibliothek/publizieren-zitieren-archivieren/publiz/

Verbesserung der Werkstoff- und Bauteileigenschaften von Luftfahrtstringern durch Verbundstrangpressen

Thilo Hammers[1,a], Daniel Pietzka[2,b], Thomas Kloppenborg[2,c], Kay Weidenmann[1,d], Eberhard Kerscher[1,e], Marco Schikorra[2,f], A. Erman Tekkaya[2,g], Detlef Löhe[1,h]

[1]Institut für Werkstoffkunde I, Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe

[2]Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Baroper Str. 301, 44227 Dortmund

[a]Thilo.Hammers@iwk1.uni-karlsruhe.de, [b]Daniel.Pietzka@iul.tu-dortmund.de, [c]Thomas.Kloppenborg@iul.tu-dortmund.de, [d]Kay.Weidenmann@iwk1.uni-karlsruhe.de, [e]Eberhard.Kerscher@iwk1.uni-karlsruhe.de, [f]Marco.Schikorra@iul.uni-dortmund.de, [g]Erman.Tekkaya@iul.tu-dortmund.de, [h]Detlef.Löhe@iwk1.uni-karlsruhe.de

Keywords: Strangpressen, Verbund, Flugzeugbau, hochfeste Aluminiumlegierungen

Zusammenfassung

Ziel des Teilprojektes ist es, die Werkstoff- und Bauteileigenschaften von Luftfahrtstringern durch Verbundstrangpressen zu verbessern. Optimierungskriterien sind dabei die Erhöhung des Widerstandes gegen Rissausbreitung sowie die Verbesserung der Restfestigkeit von Stringer-Blechbauteilen (Hautfeldern). Das Institut für Umformtechnik und Leichtbau aus Dortmund untersucht dazu die Umsetzbarkeit der Verbundprofilherstellung mit den Luftfahrtlegierungen EN AW-6056 und EN AW-2099 und den eingebetteten hochfesten Drähten auf Kobalt- und Eisenbasis. Am Institut für Werkstoffkunde I in Karlsruhe werden die mechanischen Eigenschaften der Verbundprofile hinsichtlich der quasistatischen Festigkeiten der Verbunde sowie der Grenzflächen zwischen Matrixmaterial und Verstärkungselement analysiert.

Summary

The project's aim is to improve the material and component properties of aircraft stringer profiles. Criteria for an optimization are an improved crack growth resistance and residual strength of stringer panels. The main task at the Institute of Forming Technology and Lightweight Construction in Dortmund is to enhance the process stability, especially to guarantee an optimal embedding of the wires, and to optimize their positioning. Simultaneously, the Institute of Material Science and Engineering I in Karlsruhe analyzes the profile's mechanical properties and the interface between wire and matrix under quasistatic loading conditions.

Einleitung

Im Rahmen des Transferprojektes T1 wird untersucht, ob sich das Verbundstrangpressen auf eine industrielle Serienfertigung von Flugzeugstringern übertragen lässt. Hierbei sind insbesondere die Verwendung der in der Luftfahrt eingesetzten hochfesten Aluminiumlegierungen sowie deren Wärmebehandlung und das Recken der Stringer als neue Herausforderungen hinsichtlich der Optimierung des Fertigungsprozesses und der Werkstoffsysteme zu betrachten. Das Schweißen von Stringern ist im Flugzeugbau nur in Bereichen üblich, die während des Betriebes keinen Zugspannungen unterliegen, da die Schwingfestigkeit der Schweißnähte legierungsbedingt nur gering ist. Verstärkte Verbundstringer könnten hier durch die innere Verstärkungselement-Matrix-Grenzfläche die Rissausbreitung verzögern und damit den Einsatz des Schweißens auch in anderen Strukturbereichen ermöglichen, ohne die Betriebssicherheit einzuschränken.
Im Mittelpunkt des Transferprojektes sollen die Untersuchung und Bewertung verschiedener Materialkombinationen zur Herstellung von Verbundstringern stehen, die in der Tragwerkstruktur von Luftfahrzeugen verbaut werden sollen. Dabei liegt ein Schwerpunkt auf der Frage nach dem positiven Einfluss der Verstärkung auf den Versagensmechanismus durch Risswachstumsverzögerung und der Steigerung der Restfestigkeit. Ausgangspunkt für die Untersuchungen an den Werkstoffsystemen sind die warmaushärtbaren Aluminiumstrangpresslegierungen EN AW-6056 und EN AW-2099, deren Verwendung in der Luftfahrtindustrie heute Stand der Technik ist. Als Verstärkungselemente sind hier höchstfeste Federstähle und Kobaltbasislegierungen von vorrangigem Interesse.
Kenntnisse über das Verbundstrangpressen anderer Materialkombinationen sind zwischenzeitlich durch die vorangegangenen Untersuchungen im SFB/TR10 gewonnen worden und standen dem Transferprojekt zur Verfügung. Die hier untersuchten Matrixlegierungen erfordern aufwändige Wärmebehandlungen und ein Recken der Profile, damit das gewünschte Festigkeitsniveau überhaupt erreicht werden kann [Ost98]. Dieser Aspekt blieb im SFB/TR10 bislang außen vor, weil sich die Untersuchungen auf die Aluminiumstrangpresslegierung EN AW-6060 (AlMgSi0,5) konzentrierten, die vor allem im Automobilbereich eingesetzt wird und für erste Untersuchungen nach dem Strangpressen nicht mehr wärmebehandelt wurde. Eine dem Strangpressen nachgeschaltete Wärmebehandlung kann jedoch zur Änderung der Grenzflächenmorphologie führen. Dabei können spröde Phasen entstehen, die die mechanische Belastbarkeit der Grenzfläche senken. Dies wurde für durch Flüssigphasenverfahren hergestellte Aluminium-

Stahl-Verbunde bereits berichtet. Erste Untersuchungen der Reaktion von Aluminium mit Eisen wurden 1914 angestrengt [Gui14], quantitative Untersuchungen an diesem System folgten 1959 durch [Heu59].

Der für die Matrixlegierungen notwendige Reckprozess kann zusätzlich einen deutlichen Einfluss auf die Verstärkungselemente und die Grenzfläche im Verbundprofil haben und sich damit auf die mechanischen Eigenschaften der Profile auswirken.

Manche Kobaltbasislegierungen zeichnen sich in bestimmten Wärmebehandlungszuständen durch sprödes Verhalten aus, was wiederum das mechanische Verhalten kobaltbasisdrahtverstärkter Proben beeinflussen könnte. Kobaltbasislegierungen bieten neben Nickelbasislegierungen gegenüber stahldrahtverstärkten Proben beim Einbetten in eine Aluminiummatrix auch ein Potenzial zur Grenzflächenscherfestigkeitssteigerung [Wei06b].

Da die Grenzfläche bei den zu charakterisierenden Verbundstringern innenliegend ist, mussten geeignete Prüfmethoden entwickelt werden. Ein Verfahren ist der von [Mar84] vorgeschlagene Push-Out-Test, der an einzelnen Verstärkungselementen durchgeführt wird. Auch im TR10 wurde diese Prüfmethode bereits etabliert und steht dem Transferprojekt T1 zur Verfügung. Im Teilprojekt A3 wurde in der ersten Förderphase vor allem der Einfluss von chemischen und mechanischen Vorbehandlungen der Verstärkungselemente auf die Verbundeigenschaften untersucht [Wei06b]. Generell ist gegenüber einer rein mechanischen Anbindung [Kim90] eine chemische Reaktionsbindung zwischen Verstärkungselement und Matrix im Verbund deutlich besser [Sco91], obwohl diese die Gefahr von Faserschädigungen mit sich bringt [Tha94].

Theoretische Grundlagen

Modell zur Beschreibung von Verbundwerkstoffen

Eine schematische Zugverfestigungskurve eines Verbundes sowie der einzelnen Komponenten nach [Wei06a, vergleiche [Cou90]] ist in Bild 1 dargestellt und baut auf dem sogenannten Kelly-Modell [Kel65] auf. Hierbei unterscheidet man vier Bereiche:

- Im Bereich I werden sowohl das Verstärkungselement als auch das Matrixmaterial rein elastisch verformt.
- Der Bereich II zeichnet sich dadurch aus, dass das Verstärkungselement weiterhin elastisch, die Matrix jedoch bereits elastisch-plastisch verformt wird.
- Im weiteren Verlauf der Beanspruchung (Bereich III) unterliegen beide Komponenten einer elastisch-plastischen Verformung.

- Im Übergang zu Bereich IV versagt das Verstärkungselement und der verbleibende Matrixwerkstoff wird bis zum Bruch verformt [Cou90, Kel65].

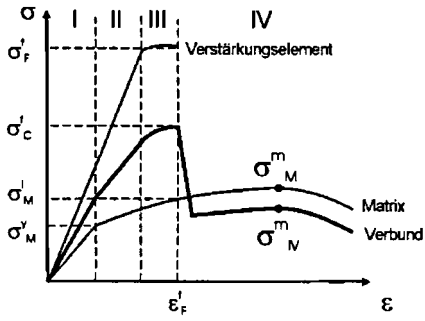


Bild 1: Schematische Zugverfestigungskurve eines Verbundes und seiner jeweiligen Komponenten nach [Wel06a, Cou90]

Unter der Annahme, dass in Matrix und Verstärkungselement die gleichen Dehnungen herrschen, ist es nach dem Kelly-Modell möglich, gemäß Gleichung 1 die Verbundfestigkeit σ'_C zu berechnen. Voraussetzung für diese Vorhersage ist, dass die mechanischen Eigenschaften der beiden Komponenten bekannt sind [Kel65].

$$\sigma'_C = f_M \sigma'_M\left(\varepsilon'_F\right) + f_F \sigma'_F \qquad \text{Gl.1}$$

Die Größen f_M und f_F bezeichnen hierbei die jeweiligen Volumenanteile für Matrix und Faser, σ'_F bezeichnet die Bruchspannung des einzelnen Verstärkungselementes bei der Bruchtotaldehnung ε'_F und $\sigma'_M(\varepsilon'_F)$ die Spannung der unverstärkten Matrix bei Bruchtotaldehnung des einzelnen Verstärkungselementes.

Der Push-Out-Test

Beim Push-Out-Test wird die Maximalkraft F_{max} bestimmt, welche benötigt wird, um das Verstärkungselement aus der Matrix herauszudrücken. Bezieht man diese Maximalkraft auf die Mantelfläche πdh des eingebetteten Verstärkungselementes, erhält man die Grenzflächenscherfestigkeit σ_{deb}, wie in Gleichung 2 dargestellt [Mar84]:

$$\sigma_{deb} = \frac{F_{max}}{\pi d h} \qquad \text{Gl.2}$$

Versuchspressungen zur Herstellung von Verbundstringern

Die Testpressungen wurden auf einer im Versuchsfeld in Dortmund vorhandenen 10-MN-Strangpresse durchgeführt. In Förderperiode I wurde im Rahmen des SFB/TR10 die Herstellbarkeit von endlos verstärkten Strukturbauteilen aus einer Aluminiumstandardlegierung EN AW-6060 untersucht. Aus diesem Grund musste zunächst die Pressbarkeit der Verbundstringer auf der Versuchspresse nachgewiesen werden, weil für die Fertigung der Verbundstringer hochfeste Aluminiumknetlegierungen EN AW-6056 (Al-Mg-Si-Legierung) und EN AW-2099 (Al-Cu-Li-Legierung) der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt werden sollten.
In der ersten Versuchspressung wurde ein bisher erfolgreich eingesetztes Verbundwerkzeug aus dem Projekt Verbundstrangpressen verwendet. Es handelte sich um ein Werkzeug zur Fertigung eines Flachprofils mit dem Querschnitt 56x5 mm^2 mit einem Pressverhältnis von 1:60. Als Blockwerkstoff wurde EN AW-2099 der Firma Alcoa mit einer Blocklänge von 300 mm getestet. Vor Pressbeginn wurde jeweils ein Federstahldraht X2CrNiMo12-9-4 (Nanoflex) von der Firma Sandvik und ein Kobaltbasisdraht 2.4782 (Nivaflex 45/18) der Firma Vacuumschmelze ins Werkzeug eingeführt. Eine Fertigung eines Verbundprofils mit einer kontinuierlichen Einbettung beider Drähte war möglich. Allerdings wurden bei dem Versuch dauerhaft die maximalen Stempelkräfte erreicht, sodass der Stempel ab einer Bauteillänge von 500 mm nicht mehr verfahren werden konnte und der Prozess abgebrochen werden musste. Für die Herstellung der Stringerprofile aus den hochfesten Aluminiumknetlegierungen ist die Verbesserung der Prozessstabilität notwendig.

Als problematisch stellte sich die niedrige Werkzeugtemperatur heraus. Dieses Problem wird dadurch verstärkt, dass während des Pressvorganges Wärme in den Gegenholm der Maschine abfließt. Als Gegenmaßnahme wurden Zirkoniumoxidplatten in einen modifizierten Werkzeughalter integriert (vgl. Bild 2). Die Werkzeugtemperatur konnte durch diese Maßnahme deutlich gesteigert werden, dadurch wird die Pressbarkeit hochfester Legierungen verbessert.

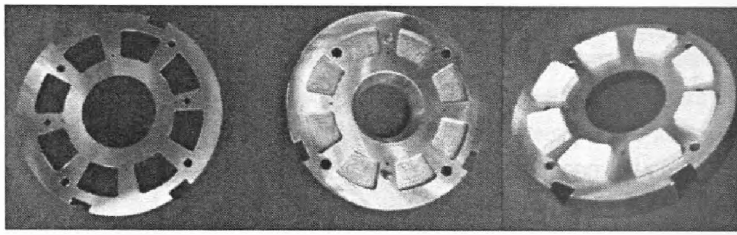
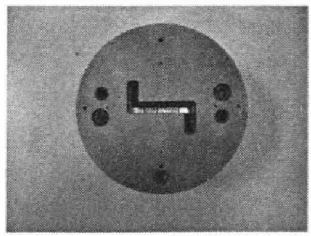


Bild 2: Werkzeugisolierung mit keramischen Einsätzen

Bei weiteren Pressversuchen mit dem Werkstoff EN AW-2099 traten trotz Werkzeugisolierung sehr hohe Presskräfte auf, die maßgeblich durch das hohe Pressverhältnis beeinflusst werden. Zur zusätzlichen Reduktion der benötigten Presskräfte und zur Erhöhung der möglichen Pressgeschwindigkeiten wurde ein neues Werkzeug für die Zuführung von 4 Verstärkungsdrähten entworfen, das ein Pressverhältnis von 1:19 ermöglicht (Bild 3). Das Werkzeug hat vergrößerte Einläufe, die den Werkstofffluss weniger hemmen als das bisher verwendete Werkzeug. Aus der Z-Kontur des Profils sollen für die weiteren Untersuchungen zwei Stringer für die Hautfelder ausgefräst werden. Eine weitere Verringerung des Pressverhältnisses zur Reduktion der Prozesskräfte ist nicht sinnvoll, weil dies zu einer schlechten Einbettung der Drähte aufgrund des sinkenden Pressdrucks führen würde. Des Weiteren würde sich die herstellbare querpressnahtfreie Profillänge durch die gegebene Volumenkonstanz verkürzen. Als Querpressnaht wird eine Durchmischungszone aus vorherigem und folgendem Blockwerkstoff beim Block-auf-Block-Pressen bezeichnet, die sich bis zu einem bestimmten Bereich zungenförmig durch das Profil zieht. Das Profil besitzt dort geringere Festigkeiten als der Rest des Halbzeugs. Aus diesem Grund wird der Bereich mit Querpressnähten bei Profilen in Strukturbauanwendungen entfernt.

Werkzeug (Frontansicht)



profilgebender Durchbruch

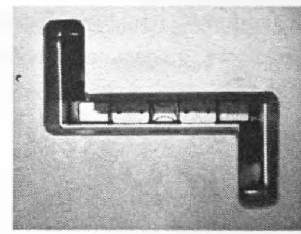


Bild 3: Verbundwerkzeug für den Einsatz von hochfesten Aluminiumlegierungen

Für das nach dem Strangpressen erforderliche Recken der Profile und für die anschließende Fertigung der Hautfelder ist eine querpressnahtfreie Profillänge von mindestens 1500 mm erforderlich. Bedingt durch den Zielkonflikt der Anforderungen, ein Strukturbauteil mit der geforderten Mindestlänge ohne Querpressnähte aus zwei hochfesten Aluminiumknetlegierungen herzustellen, wurde neben der Werkzeuggeometrie gleichzeitig auch die Blockeinsatzlänge angepasst. Eine Verkürzung der Blocklänge führt beim direkten Strangpressen zu niedrigeren Presskräften, weil die auftretende Reibung zwischen Block und Aufnehmer verringert wird.

Mit dem neuen Werkzeug und der optimierten Blocklänge wurde zur Bestimmung der Querpressnahtlänge und -lage ein Pressblock an der Oberfläche mit dem Trennmittel Bornitrid besprüht und im Anschluss an einen nicht präparierten Block verpresst. Anhand von Querschliffen war die Querpressnaht bis zu einer Profillänge von ca. 1200 mm deutlich sichtbar (vgl. Bild 4). Ab einer Profillänge von 1400 mm war keine Querpressnaht mehr nachweisbar.

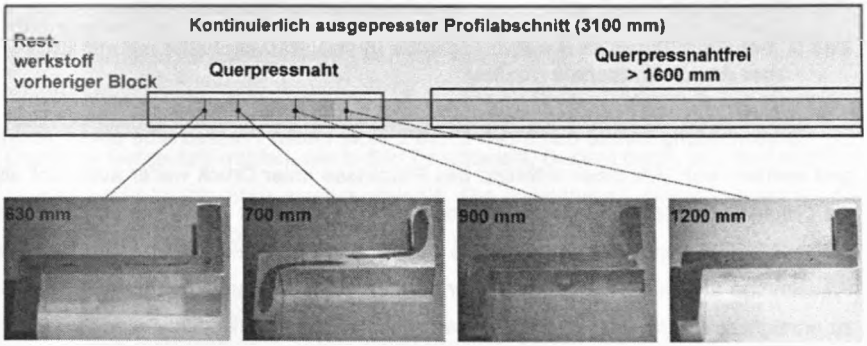


Bild 4: Analyse zur Länge der Querpressnähte (Schliffbilder nachbearbeitet)

In mehreren Testpressungen konnten verstärkte Profile aus den Blockwerkstoffen der beiden genannten Legierungen prozesssicher hergestellt werden. Temperaturaufzeichnungen mit Thermoelementen bestätigten, dass die Anforderungen an den Prozess bezüglich homogener Temperaturverteilung in ausreichendem Maße erfüllt werden [Klo08]. Allerdings zeigten mikroskopische Auswertungen, dass die Drähte teilweise nicht spaltfrei in der umgebenden Aluminiummatrix eingebettet werden konnten. Durch ein Anstellen der Führungsflächen am Werkzeug in einem kleinen Winkel konnte der

Druck auf den Verbund beim Profilaustritt erhöht werden, sodass die Einbettung der Drähte im Profil verbessert werden konnte.

Beim Block-auf-Block-Pressen mehrerer Blöcke der Legierung EN AW-2099 trat in unregelmäßigen Intervallen ein Kleben zwischen Presstempel und Durchgangsbohrung im Aufnehmer auf. Das Kleben wird durch eine vermehrte Schalenbildung an der Stempeloberfläche und Anlagerungen an der Aufnehmerbohrung verursacht (Bild 5, links) und verschlechtert die Verfahrbewegung zwischen Stempel und Aufnehmer signifikant.

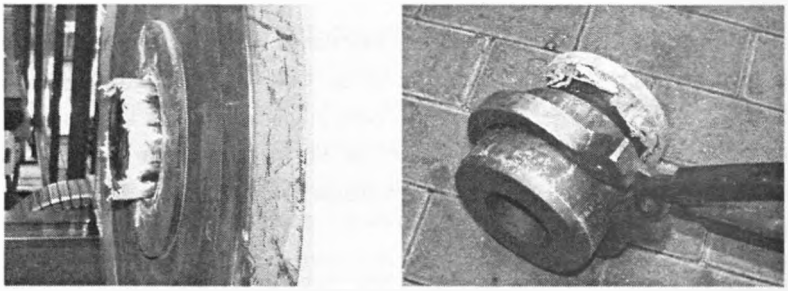


Bild 5: Schalenbildung an der Pressscheibe (links); Räumscheibe mit anhaftender Aluminiumschale (rechts)

Die Schalenbildung konnte durch den Einsatz einer neuen Pressscheibe etwas verringert werden, weil sich diese während des Prozesses unter Druck weiter ausdehnt als die bisher verwendete und somit weniger Werkstoff zwischen Aufnehmerbohrung und Stempel fließen kann. Allerdings musste das Kleben weiter reduziert werden, um das Pressen von 55 Blöcken je Legierung für die Fertigung der benötigten Verbundstringer zu ermöglichen. Eine deutliche Verbesserung konnte durch die Verwendung von speziellen Räumscheiben erreicht werden. Mithilfe von Räumscheiben wurden die größeren verfestigten Werkstoffablagerungen in den Randzonen der Aufnehmerbohrung entfernt. Die Scheiben werden von der dem Werkzeug abgewandten Seite in die Aufnehmerbohrung gelegt und mit dem Stempel in Pressrichtung durch die Bohrung gedrückt, wobei die Aufnehmerbohrung von Ablagerungen geräumt wird. Bild 5 rechts zeigt eine Räumscheibe und die entfernte Aluminiumschale nach dem Gebrauch.

In vorherigen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass inhomogene Prozessbedingungen zu Lageabweichungen der Drähte im Profil führen [Sch07a, Sch07b, Kle06]. Um zu kontrollieren, ob die Drähte an der gewünschten Position in der späteren

Druck auf den Verbund beim Profilaustritt erhöht werden, sodass die Einbettung der Drähte im Profil verbessert werden konnte.

Beim Block-auf-Block-Pressen mehrerer Blöcke der Legierung EN AW-2099 trat in unregelmäßigen Intervallen ein Kleben zwischen Presstempel und Durchgangsbohrung im Aufnehmer auf. Das Kleben wird durch eine vermehrte Schalenbildung an der Stempeloberfläche und Anlagerungen an der Aufnehmerbohrung verursacht (Bild 5, links) und verschlechtert die Verfahrbewegung zwischen Stempel und Aufnehmer signifikant.

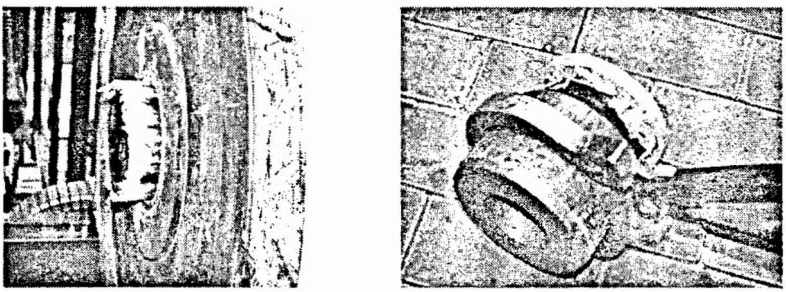


Bild 5: Schalenbildung an der Pressscheibe (links); Räumscheibe mit anhaftender Aluminiumschale (rechts)

Die Schalenbildung konnte durch den Einsatz einer neuen Pressscheibe etwas verringert werden, weil sich diese während des Prozesses unter Druck weiter ausdehnt als die bisher verwendete und somit weniger Werkstoff zwischen Aufnehmerbohrung und Stempel fließen kann. Allerdings musste das Kleben weiter reduziert werden, um das Pressen von 55 Blöcken je Legierung für die Fertigung der benötigten Verbundstringer zu ermöglichen. Eine deutliche Verbesserung konnte durch die Verwendung von speziellen Räumscheiben erreicht werden. Mithilfe von Räumscheiben wurden die größeren verfestigten Werkstoffablagerungen in den Randzonen der Aufnehmerbohrung entfernt. Die Scheiben werden von der dem Werkzeug abgewandten Seite in die Aufnehmerbohrung gelegt und mit dem Stempel in Pressrichtung durch die Bohrung gedrückt, wobei die Aufnehmerbohrung von Ablagerungen geräumt wird. Bild 5 rechts zeigt eine Räumscheibe und die entfernte Aluminiumschale nach dem Gebrauch.

In vorherigen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass inhomogene Prozessbedingungen zu Lageabweichungen der Drähte im Profil führen [Sch07a, Sch07b, Kle06]. Um zu kontrollieren, ob die Drähte an der gewünschten Position in der späteren

Mechanische Werkstoffprüfung

Probenmaterialien und Probengeometrien

Die Proben wurden aus den oben erwähnten verbundstranggepressten Profilen entnommen. Im Weiteren werden die Verbunde durch die Matrixlegierungen (EN AW-6056 oder EN AW-2099, kurz 2099 und 6056) und das Verstärkungselement (Stahldraht oder Co-Basisdraht) bezeichnet. Wird bei der Bezeichnung kein Verstärkungselement angeführt, handelt es sich um unverstärkte Proben aus dem jeweiligen Matrixmaterial.
Die zylindrischen Zugproben besitzen eine Messstreckenlänge von 20 mm und einen Messstreckendurchmesser von 3 mm. Die Verstärkungselemente mit einem Durchmesser von 1 mm liegen in der Probenachse. Der Verstärkungsanteil beträgt somit in der Messstrecke 11 Vol.-%. Die Probengeometrie ist in Bild 8 links dargestellt.
Die Proben für die Push-Out-Tests besitzen eine Höhe von 1 mm, wobei der Draht von ausreichend Matrixmaterial umgeben ist (siehe Bild 8 rechts).

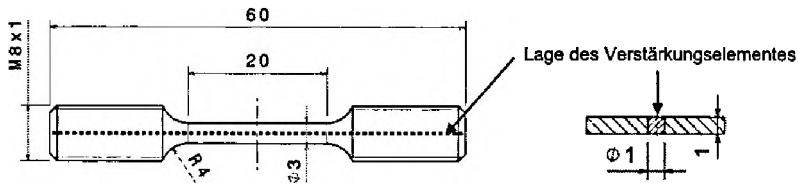


Bild 8: Probengeometrien (Abmessungen in mm), links: Zugversuchsprobe, rechts: Push-Out-Probe

Versuchsdurchführung

Die Zugversuche wurden auf einer Universalprüfmaschine der Bauart Zwick 1478 durchgeführt. Die Querhauptgeschwindigkeit betrug $2{,}2 \times 10^{-3}$ mm/s, was einer Dehngeschwindigkeit von $1{,}1 \times 10^{-4}$ s^{-1} in der Messstrecke entspricht. Die Dehnungsmessung erfolgte mittels Ansatzdehnungsaufnehmer direkt in der Messstrecke. Je Probenzustand wurden drei Zugversuche durchgeführt. Im Folgenden wird jeweils nur eine exemplarische Kurve wiedergegeben.
Die Push-Out-Tests zur Bestimmung der Grenzflächenscherfestigkeit zwischen Verstärkungselement und Matrixmaterial wurden mit einer Prüfmaschine der Bauart Zwick I 2,5 kN und einem konischen Indenter mit einem Kalottenradius von 0,5 mm, wie in [Wei06b] beschrieben, durchgeführt. Die Geschwindigkeit des Indenters betrug hierbei

0,5 mm/min. Der Versuch wurde nach 500 µm Indenterweg abgebrochen, da es andernfalls zum Kontakt zwischen der Mantelfläche des Indenters und dem Matrixmaterials gekommen wäre.

Versuchsergebnisse der Zugversuche

Die Zugverfestigungskurven von verstärkten und unverstärkten Proben aus EN AW-2099 bzw. EN AW-6056 wurden analysiert und anschließend mit dem theoretischen Modell nach Kelly verglichen.

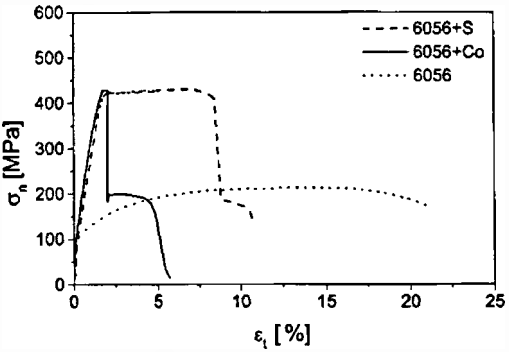


Bild 9: Zugverfestigungskurven von unverstärkten und verstärkten Proben aus EN AW-6056

Bild 9 zeigt die Zugverfestigungskurven von unverstärkten und verstärkten Proben aus EN AW-6056. Die unverstärkte Matrix verhält sich sehr duktil und weist eine Zugfestigkeit von ca. 210 MPa auf. Die Festigkeitssteigerung durch die Verstärkungselemente ist deutlich zu erkennen und beträgt bei beiden Verstärkungselementen ca. 430 MPa. Gleichzeitig nimmt die Duktilität deutlich ab, wobei die Totaldehnung bei Bruch des Verstärkungselementes bei 6056+S deutlich größer ausfällt als bei 6056+Co, was auf die geringe Duktilität des Co-Basisdrahtes zurückzuführen ist.

Bei den in Bild 10 dargestellten Zugverfestigungskurven von unverstärkten und verstärkten Proben aus EN AW-2099 ist analog zu den verstärkten EN AW-6056-Proben wiederum deutlich die Wirkung des Verstärkungselementes zu erkennen. Allerdings ist die Duktilität der EN AW-2099-Matrix deutlich geringer, was ebenfalls die Duktilität der stahldrahtverstärkten Proben beeinflusst. Dieser Einfluss ist bei den Proben mit Co-Basisdraht nicht zu erkennen. Die höhere Festigkeit der EN AW-2099-Matrixlegierung

zeigt sich jedoch deutlich in den höheren Verbundfestigkeiten der verstärkten Proben aus EN AW-2099 gegenüber verstärkten Proben aus EN AW-6056.

Die verstärkten Varianten mit EN AW-2099-Matrix unterscheiden sich kaum in der Verbundfestigkeit von ca. 540 MPa. Die Totaldehnung bei Bruch des Verstärkungselementes bei den Co-Basisdrahtverstärkten Proben ist für beide Matrixmaterialien gleich. Bei den stahldrahtverstärkten Proben ist der Einfluss der Matrixduktilität deutlich zu sehen.

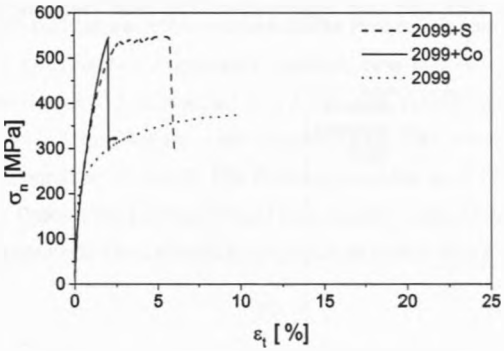


Bild 10: Zugverfestigungskurven von unverstärkten und verstärkten Proben aus EN AW-2099

Fraktographische Ergebnisse drahtverstärkter Zugproben

Die Untersuchung der Bruchflächen im Rasterelektronenmikroskop (REM) zeigte für die zwei Verstärkungselementwerkstoffe ein grundsätzlich unterschiedliches Verhalten, welches unabhängig von der Matrixlegierung auftritt.

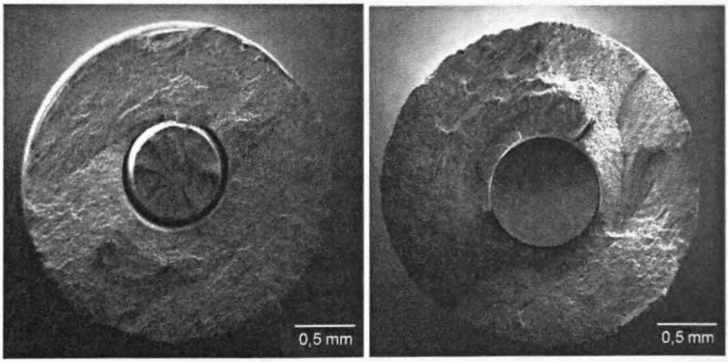


Bild 11: REM-Aufnahmen der Bruchflächen, links: 2099+S, rechts: 2099+Co

Während es beim Stahldraht zur deutlichen Einschnürung des Drahtes kam (Bild 11 links), war beim Co-Basisdraht keine Einschnürung desselben zu erkennen (Bild 11 rechts). Dieses unterschiedliche Versagensverhalten trägt auch zur Differenz der Bruchtotaldehnung beim Versagen des Verstärkungselementes zwischen den S- und Co-drahtverstärkten Verbunden bei.

Vergleich der Versuchsergebnisse mit den theoretischen Modellen

Tabelle 1 zeigt den Vergleich der gemessenen ($\sigma^f_{C,exp.}$) und der mit dem theoretischen Modell (s.o.) berechneten ($\sigma^f_{C,ber.}$) Verbundfestigkeiten. Die mechanischen Eigenschaften der Verbunde lassen sich aus denen der einzelnen Komponenten konservativ abschätzen, was durch den Quotient $Q_1 = \sigma^f_{C,exp.} / \sigma^f_{C,ber.}$ verdeutlicht wird.

Tabelle 1: Vergleich der mechanischen Kennwerte aus den Zugversuchen mit den theoretisch berechneten Werten

Material	$\sigma^f_{C,exp.}$ [MPa]	σ^f_F [MPa]	ε^f_F [%]	$\sigma^f_M(\varepsilon^f_F)$ [MPa]	$\sigma^f_{C,ber.}$ [MPa]	Q_1 [MPa]	$\varepsilon^f_{F,real}$ [%]	$\sigma^f_{M,real}$ [MPa]	$\sigma^f_{C,ber.,real}$ [MPa]	Q_2 [MPa]
6056+S	427	1640	1,50	140,5	305,4	1,40	8,44	206,9	364,5	1,17
6056+Co	428	2240	2,07	153,7	383,2	1,12	2,03	155,9	385,2	1,11
2099+S	543	1640	1,50	273,5	423,8	1,28	5,67	354,3	495,7	1,10
2099+Co	544	2240	2,07	294,3	508,3	1,07	2,03	299,8	513,2	1,06

Im Modell zur Vorhersage der Verbundfestigkeit wird nicht berücksichtigt, dass die Verstärkungselemente aus Stahldraht bei den untersuchten Verbunden im eingebetteten Zustand deutlich höhere Dehnungen bis zum Bruch ertragen können als die einzelnen Verstärkungselemente im nicht eingebetteten Zustand. Dies führt zu der größeren Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Festigkeiten dieser Verbunde, da im theoretischen Modell σ^f_M auf Grund dieser Dehnungsdifferenz unterschätzt wird. Werden hingegen die realen Dehnungen beim Bruch der Verstärkungselemente innerhalb des Verbundes $\varepsilon^f_{F,real}$ berücksichtigt und wird mit der realen Spannung in der Matrix $\sigma^f_{M,real}$ die Verbundfestigkeit $\sigma^f_{C,ber.,real}$ berechnet, so zeigt sich ein deutlich geringerer Unterschied zwischen berechneter und gemessener Verbundfestigkeit, was mit dem Quotient $Q_2 = \sigma^f_{C,exp.} / \sigma^f_{C,ber.,real}$ verdeutlicht wird (siehe Tabelle 1). Diese verbleibende Unterschätzung der tatsächlichen Verbundfestigkeit könnte auf den Eigenspannungszustand zurückzuführen sein, welcher sich nach dem Verbundstrangpressprozess ein-

stellt und aus den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Matrix- und Verstärkungselementwerkstoff resultiert.

Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen

Um die Einbettung der Verstärkungselemente nach dem Verbundstrangpressen beurteilen zu können, wurden Querschliffe angefertigt, wie in Bild 12 und Bild 13 dargestellt.

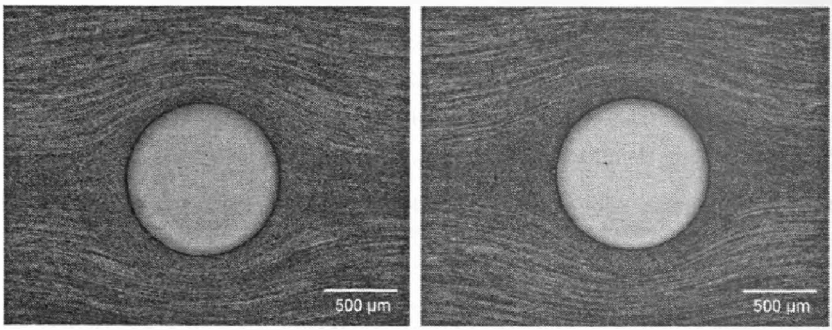


Bild 12: Geätzte Querschliffe der Verbunde, links: 6056+S, rechts: 6056+Co

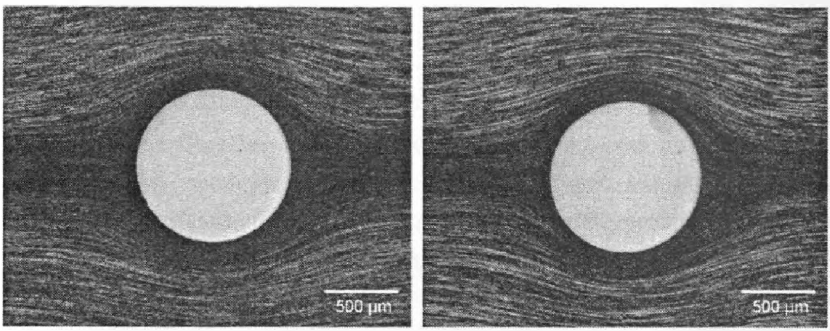


Bild 13: Geätzte Querschliffe der Verbunde, links: 2099+S, rechts: 2099+Co

Die Verstärkungselemente liegen in der Längspressnaht, welche sich durch ein feinkörnigeres Gefüge auszeichnet. Dies wird durch die stärkere plastische Deformation in diesem Bereich beim Strangpressen und dadurch hervorgerufene Rekristallisationsvorgänge bewirkt, wie in [Wei07] analog für EN AW-6060 beschrieben. Die Einbettung der Verstärkungselemente ist bei allen Verbundkombinationen sehr gut.

Versuchsergebnisse der Push-Out-Tests in Abhängigkeit der Wärmebehandlung

In Bild 14 sind die Mittelwerte sowie Standardabweichungen der Grenzflächenscherfestigkeiten der verschiedenen Werkstoffkombinationen in Abhängigkeit von ihrem Wärmebehandlungszustand aufgeführt. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass die erreichbaren Grenzflächenscherfestigkeiten σ_{deb} durch den Matrixwerkstoff bestimmt und durch die Wärmebehandlungen und das Recken sehr stark beeinflusst werden. Die höchsten Grenzflächenscherfestigkeiten werden bei beiden Matrixlegierungen nach dem Recken im Zustand R-2 und R-3 erreicht, wobei besonders die hohen Grenzflächenfestigkeiten bei den Verbunden mit Verstärkungselementen auf Kobaltbasis auffallen. Dies wurde auch in [Wei06b] bei Verbunden aus EN AW-6060 verstärkt mit Haynes25-Draht beobachtet.

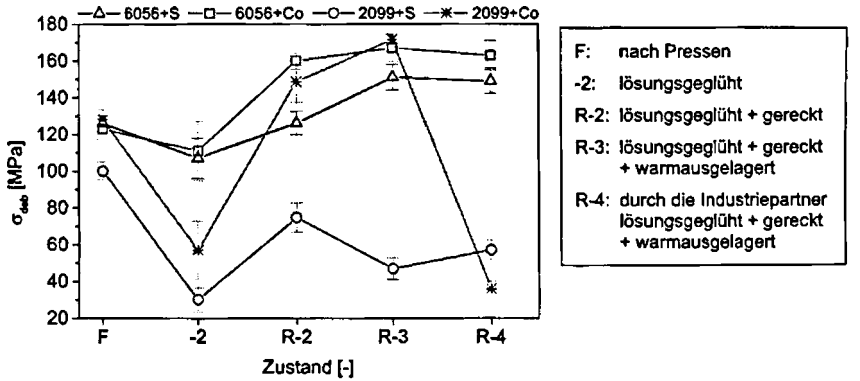


Bild 14: Übersicht über die gemessenen Grenzflächenscherfestigkeiten in Abhängigkeit des Wärmebehandlungszustandes

Im Zustand F direkt nach dem Strangpressen sind die Grenzflächenscherfestigkeiten bis auf die Kombination 2099+S nahezu identisch bei 123-128 Mpa. Durch die anschließende matrixspezifische Lösungsglühbehandlung (Zustand -2) kommt es zu einem deutlichen Absinken der Grenzflächenscherfestigkeit bei den Proben aus EN AW-2099, bei 2099+S bis auf 30 MPa. Dieser Abfall ist bei der Matrixlegierung EN AW-6056 weniger stark ausgeprägt.

Das anschließende Recken (Zustand R-2) führt anscheinend zur Verfestigung der Matrix und damit zu einem erneuten Anstieg der Grenzflächenscherfestigkeit bei allen Kombinationen, welcher bei 2099+Co am stärksten ausgeprägt ist.

Durch anschließendes Warmauslagern (Zustand R-3) steigt die Grenzflächenscherfestigkeit bei den Verbunden mit EN AW-6056-Matrix auf bis zu 167 MPa leicht an. Die Unterschiede zwischen den Zuständen R-3 und R-4 sind bei EN AW-6056-Verbunden minimal. Das Warmauslagern nach dem Recken (Zustand R-3) der Matrixlegierung EN AW-2099 führt in Abhängigkeit des Verstärkungselementwerkstoffes zu sehr unterschiedlichen Grenzflächenscherfestigkeitswerten. Im Gegensatz zu 2099+Co, bei welchem die Grenzflächenscherfestigkeit durch die Warmauslagerung erhöht wird, kommt es bei 2099+S zu einem erneuten Abfall. Auch die Zustände R-3 und R-4 sind bei der Matrixlegierung EN AW-2099 nicht zu vergleichen. Bei den Proben aus 2099+Co zeigte sich in Längsschliffen, dass es zur Bildung einer Diffusionsschicht zwischen Verstärkungselement und Matrixmaterial gekommen war. Die Zusammensetzung dieser Schicht wird noch untersucht.

Darüber hinaus lässt sich sagen, dass bei hohen Grenzflächenscherfestigkeiten im Rasterelektronenmikroskop immer auch Matrixmaterial am herausgedrückten Verstärkungselement gefunden werden konnte, wie in Bild 15 links (1) beispielhaft für 2099+Co im Zustand R-4 dargestellt. Weiter kann man erkennen, dass das Matrixmaterial aufgewölbt ist (2), was ebenfalls auf eine gute Anbindung hinweist. Bei den sehr niedrigen Grenzflächenscherfestigkeiten ist beides nicht der Fall (Bild 15 rechts, 2099+Co, Zustand R-4).

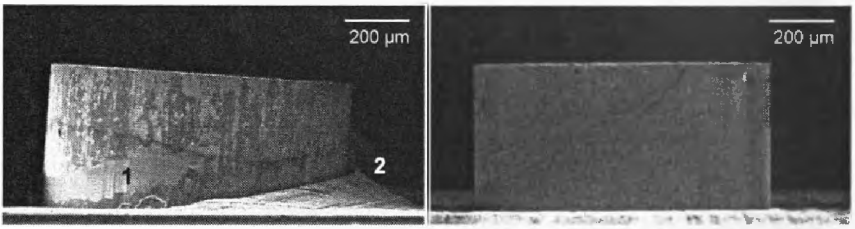


Bild 15: Push-Out-Probe mit (links, 2099+Co:R-3) und ohne (rechts, 2099+Co:R-4) Matrixmaterial am herausgedrückten Draht

Zusammenfassung und Ausblick

In Versuchspressungen wurde die prinzipielle Herstellbarkeit von Verbundstringern durch Strangpressen nachgewiesen. Aufgrund der hohen Festigkeit der beiden verwendeten Aluminiumknetlegierungen sind bei den vorhandenen Einrichtungen gewisse Restriktionen bezüglich des Profilquerschnittes und der Profillänge nötig. Durch

schrittweise Optimierung der Prozessparameter und der -bedingungen konnte eine sehr hohe Prozessstabilität erreicht werden.

Die Charakterisierung der Verbunde erfolgte mechanisch mittels Push-Out-Tests und quasistatischen Zugversuchen und metallographisch an Längs- und Querschliffen sowie mit dem Rasterelektronenmikroskop. Diese Untersuchungen zeigten, dass durch die Verstärkung der Profile ein deutlicher Anstieg der mechanischen Festigkeit im Zugversuch erreicht wird. Bei den untersuchten Werkstoffkombinationen lassen sich die erreichbaren Zugfestigkeiten durch das Kelly-Modell [Kel65] im Vorhinein konservativ abschätzen. Werden zusätzlich zur Berechnung der Verbundfestigkeiten die realen Dehnungen bei Bruch der Verstärkungselemente im Verbund berücksichtigt, zeigt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen den gemessenen Werten und dem Modell. Weiter konnte mittels metallographischer Schliffe gezeigt werden, dass die Einbettung der Verstärkungselemente in der Matrix zufriedenstellend ist. Die Push-Out-Tests zeigen, dass durch die Wärmebehandlung und das Recken die Grenzflächenscherfestigkeit erhöht werden kann. Diese Beobachtung gilt nicht für die Variante 2099+S, da hier nur geringere Festigkeiten in der Grenzfläche messbar waren.

Danksagung:

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten des Sonderforschungsbereichs SFB/TR 10, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird. Weiterer Dank gebührt den Projektpartnern aus der Industrie: Alcan, Alcoa, Aleris, Alu Menziken, EADS Innovation Works, Sandvik Materials Technology und VAC Vacuumschmelze.

Literatur:

[Cou90] COURTNEY, T. H.: *Mechanical Behavior of Materials*, McGraw-Hill, New York, 1990

[Gui14] GUILLET, L.; BERNARD, V.: Les Réservés en Cémentation et la Diffusion dans les Solides. Rev. Met. 11, 1914, S. 748-765

[Heu59] HEUMANN, T.; DITTRICH, S.: Über die Kinetik der Reaktion von festem und flüssigem Aluminium mit Eisen. Z. Metallkunde, 50 [10], 1959, S. 617-625

[Kel65] KELLY, A.; DAVIES, J.: The Principles of the Fibre Reinforcement of Metals. Metallurgical Reviews, 10 [37], S. 1-78, 1965

[Kim90] KIM, J.; LEE, S.-K.; JUN, E. J.: The bonding strength at the fibre/ matrix interface of metal matrix composites. In: J. M. Kennedy, H. H. Moeller, W. S. Johnson (eds.) Thermal and Mechanical Behaviour of Metal Matrix Composites, ASTM STP1080, S.183-192, 1990

[Kle04] KLEINER, M.; SCHOMÄCKER, M.; SCHIKORRA, M.; KLAUS, A.: Herstellung verbundverstärkter Aluminiumprofile für ultraleichte Tragwerke durch Strangpressen. Mat.-wiss. u. Werkstofftech. *35* [7], 2004, S. 431-439

[Kle06] KLEINER, M.; SCHOMÄCKER, M.; KLAUS, A.: Influencing Factors on The Manufacture of composite Extrusions. In: Annals of The German Academic Society For Production Engineering, WGP, Vol. XII/1, 2006

[Klo08] KLOPPENBORG, T.; HAMMERS, T.; SCHIKORRA, M.; KERSCHER, E.; TEKKAYA, E. A.; LÖHE, D.: Prototype Manufacturing of Extruded Aluminium Aircraft Stringer Profiles with Continuous Reinforcement. Advanced Materials Research Vol. 43, 2008, S. 167-174

[Mar84] MARSHALL, D. B.: An Indentation Method for Measuring Matrix-Fibre Frictional Stresses in Ceramic Composites. Journal of the American Ceramic Society 67, 1984, S. 259-260

[Ost98] OSTERMANN, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. Springer-Verlag Heidelberg, 1998

[Raj98] RAJAN, T. P. D.; PILLAI, R. M.; PAI B. C.: Reinforcement coating and interface in aluminium metal matrix composites. J. Mat. Sci. , 33, 1998, S. 3401-3503

[Sch07a] SCHOMÄCKER, M.: Verbundstrangpressen von Aluminiumprofilen mit endlosen metallischen Verstärkungselementen. Shaker Verlag, Reihe Dortmunder Umformtechnik, Dissertation, 2007, ISBN 978-3-8322-6039-2

[Sch07b] SCHOMÄCKER, M.;SCHIKORRA, M.; KLEINER, M.: Verbundstrangpressen. In: Integration von Umformen, Trennen und Fügen für die flexible Fertigung von leichten Tragwerkstrukturen – Ergebnisbericht der Phase I, Verlag: VDI Verlag/ Kleiner, Baier, Fleischer, Löhe, Weinert, Zäh, Schikorra (Hrsg.), 2007, S. 39-67, ISBN 987-3-18-366102-2

[Sco91] SCOTT, V. D., YANG, M.: Interface Studies in Cast Fibre Reinforced Materials. In: P. Vincenzini (ed.) Advanced Structural Inorganic Composites, Elsevier, Amsterdam, 1991, S.95-108

[Tha94] THAN, E.; LEONHARDT, G: Beschichtung keramischer Fasern. In: K.U.

Kainer (Hrsg.) Metallische Verbundwerkstoffe, DGM-Informationsgesellschaft, Oberursel, 1994, S.65-100

[Wei06a] WEIDENMANN, K. A.; KERSCHER, E.; SCHULZE, V.; LÖHE, D.: Mechanical properties of compound-extruded aluminium-matrix profiles under quasi-static loading conditions. Advanced Materials Research, 10, S. 233-34, 2006

[Wei06b] WEIDENMANN, K.A.; KERSCHER, E.; SCHULZE, V.; LÖHE, D.: Materials Science and Engineering A 424, S. 205-211, 2006

[Wei07] WEIDENMANN, K.; KERSCHER, E.; SCHULZE, V.; LÖHE, D.: Werkstoffsysteme für verstärkte Leichtbauprofile. In: Integration von Umformen, Trennen und Fügen für die flexible Fertigung von leichten Tragwerkstrukturen – Ergebnisbericht der Phase I, Verlag: VDI Verlag/ Kleiner, Baier, Fleischer, Löhe, Weinert, Zäh, Schikorra (Hrsg.), 2007,S. 69-105, ISBN 987-3-18-366102-2

[Yue98] YUE, C. Y.; LEE, L. L.; SANO, T.: Experimental push out testing and analysis of fibre reinforced composites: applicability and test considerations. Mat. Sci. Tech., 14, 1998, S.987-1000