Final Draft
of the original manuscript:

Amancio-Filho, S.; dos Santos, J.F.:

**Entwicklung des Reibnietens als neues Fügeverfahren fuer
Kunststoff und Leichtbaulegierungen –
Development of FricRiveting as a new joining technique for
polymer and lightweight alloys**

In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik (2008) Wiley

DOI: 10.1002/mawe.200800369

Das Reibnieten („FricRiveting“): Entwicklung eines neuen Fügeverfahrens für Kunststoff und Leichtbaulegierungen

FricRiveting („Reibnieten“): development of a new joining technique for Polymer and Lightweight Alloys

Sergio T. Amancio-Filho*, Jorge F. dos Santos

GKSS Forschungszentrum GmbH

Institut für Werkstoffforschung., Werkstoffmechanik

Max-Planck-Str. 1, D-21502 Geesthacht, Germany

* Tel.: +49 (0) 4152-872066, Fax: +49 (0) 4152-872033

Email: sergio.amancio@gkss.de

Zusammenfassung

Die steigenden Forderungen nach Umweltverträglichkeit, Kosteneinsparung, und hochleistungsfähigen Endprodukten hat Wissenschaftler und Ingenieure veranlasst neue Materialien und Technologien zu entwickeln. Daraus resultierten beispielsweise die Polymer-Metall Hybridstrukturen. Diese werden insbesondere in Transport- und moderner Bauindustrie angewandt. Geeignete herkömmliche Fügeverfahren dafür (Kleben und mechanische Fügeverfahren) sind üblicherweise entweder teuer, weisen limitierte Festigkeit und Anwendbarkeit auf oder sind nicht umweltfreundlich. Die im Rahmen dieser Arbeit behandelte neue Reibnieten ("FricRiveting") Methode für Polymer-Metall Mischverbindungen wurde hierfür als alternative, zuverlässige, umweltfreundliche, und potenziell kostengünstige Punktverbindungstechnik entwickelt, beschrieben und nachgewiesen. In der einfachsten Variante des Reibnietens dringt eine in Rotation versetzte zylinderförmige metallische Niete in die Oberfläche eines oder mehrerer Kunststoff-Grundwerkstoffe ein. Aufgrund der hohen Rotation bzw. des hohen Axialdruckes wird Reibungswärme erzeugt. Mit Erreichen einer vorprogrammierten Zeit

erhöht sich die Prozesstemperatur signifikant. Dadurch wird die Spitze der Niete plastifiziert; in diesem Moment wird die Rotation verzögert und der Axialdruck in die Fügepartner erhöht. Als Folge verformt sich die Nietenpitze entsprechend des Druckverhältnisses. Nach der Abkühlungsphase wird die verformte Nietespitze formschlüssig im Kunststoff verankert. Die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Theorien, und Mechanismen wurden bei Verbindungen von Polyetherimid (PEI) und Aluminium 2024-T351 (Al-Cu-Mg Legierung) nachgewiesen. Punkt- und Überlappverbindungen mit hohem Festigkeits-Wirkungsgrad unter Raumtemperatur (der Zugfestigkeit- Wirkungsgrad betrug bis zu ca. 97% der Nietefestigkeit und der Scherzugfestigkeit-Wirkungsgrad bis zu ca. 70% der Kunststofffestigkeit) wurden reibgenietet. Zum Schluss wurden die Gefügeänderung und mikrostrukturellen Eigenschaften dieser reibgenieteten Verbindungen beschrieben. Die im Laufe dieser Arbeit entstandenen wissenschaftlichen bzw. technischen Ergebnisse beweisen die Durchführbarkeit des Reibnietens. Als Ergebnis dieser Arbeit kann das Reibnieten als potenzielle zuverlässige, einfache, kostengünstige, und umweltfreundliche Fügechnik für Polymer-Metall Verbindungen vorgeschlagen werden.

Schlüsselwörter: Fügechnik, Nieten, Schweißen Polymer, Leichtbaulegierung, Hybridstrukturen, Reibung.

Abstract

The increasing demand on environmental consciousness, cost savings and high performance end products has been guiding scientists and engineers to a constant development of new materials and technologies. This class of lightweight structures are specially used in industrial fields such as transportation and modern civil engineering. Currently available joining methods for polymer-metal structures (adhesive bonding and mechanical fastening) are usually application-specific, presenting high operational costs, limited mechanical performance or are not environmental friendly. A new Friction Riveting technique for polymeric-metallic joints was developed, demonstrated and characterized in this work, as an alternative, reliable, environmental compatible and economically viable spot joining process. In the simplest process variant a rotating cylindrical metallic rivet is inserted in one or more thermoplastic base plates. The high rotation speed and pressure increase friction and heat is generated. When the preset time is achieved the temperature highly increases and the rivet tip plasticizes. At this point rotation is decelerated and the axial pressure increased, so the plasticized rivet tip becomes deformed; after cooling it becomes anchored in the polymeric base plate. In this work case-study joints on commercially available polyetherimide (PEI) and aluminium 2024-T351 (Al-Cu-Mg alloy) were chosen for demonstrating proposed theories and mechanisms of FricRiveting. Sound friction riveted point-on-plate and single-rivet overlap joints with elevated joint efficiencies in terms of base materials strength were obtained (tensile joint efficiencies of about 97% of the rivet strength and shear joint efficiencies of about 70% of the polymer strength) through tensile and lap shear testing at room temperature. Finally, the microstructural changes and properties were described for this case-study joint. The feasibility of FricRiveting was demonstrated in this work by the presented technical and scientific results. From this work it can be suggested that FricRiveting has the potential to be

established as a reliable, simple, cost effective and environmental friendly joining technique for polymer-metal components.

1 Einführung

In der Transport- und Bauindustrie werden immer häufiger artungleiche Hybrid-Strukturen eingesetzt, die einerseits Kunststoffe und andererseits Metalle umfassen, wobei die Materialbestandteile kraftschlüssig miteinander verbunden sind. Auf diese Weise werden die Eigenschaften beider Materialien kombiniert, um so einen Makroverbundwerkstoff mit verbesserten Eigenschaften zu erhalten [1]. Um die Kunststoffe und Metalle miteinander zu verbinden, können zunächst mechanische Verbindungen und Klebeverbindungen eingesetzt werden [2]. Die mechanischen Verfahren, wie zum Beispiel Nieten und Clinchen, weisen die folgenden Nachteile auf: Zum einen treten in den Werkstücken hohe Spannungskonzentrationen auf. Zum anderen kann es zu einem späteren Lockern der Verbindung infolge von Kriechen, Feuchtigkeit und Relaxation kommen [3]. Klebeverbindungen weisen den Nachteil auf, dass die Festigkeit der Verbindung nur schwer abgeschätzt werden kann. Darüber hinaus, ist die Zugfestigkeit einer Klebnaht normalerweise geringer als ihre Scherzugfestigkeit [4].

Andere Probleme bei den Klebeverbindungen sind die langen Herstellungstaktzeiten wegen der notwendigen Oberflächenvorbehandlung und Aushärtezeit. Hinzu kommt die Umweltbelastung durch die Emission von aushärtendem Lösungsmittel. Neben diesen oben genannten Fügeverfahren sind noch einige Schweißverfahren und Hybrid-Verbindungstechniken (Kombinationen von einem Fügeverfahren und Kleben) bekannt [2]. Hierbei treten Nachteile auf, wie zum Beispiel hohen Energieverbrauch zur Verbindungsherstellung, Oberflächenvorbehandlung, sodass sie in sensiblen Bereichen häufig nicht eingesetzt werden können.

Das neue Reibnieten Fügeverfahren für Polymer-Metall Mischverbindungen wird im Rahmen dieser Arbeit als alternative, zuverlässige, umweltfreundliche, und potenziell kostengünstig Punktverbindungstechnik entwickelt, beschrieben und nachgewiesen. Deren Eigenschaften werden mit Hilfe der mechanischen und mikroskopischen

Untersuchung von Polyetherimide (PEI) / Aluminium AA2024-T351 Punkt- und Überlappverbindungen beschrieben.

2 Material, Vorgehensweise und Auswertung

2.1 Grundmaterialien

Extrudierte Polyetherimid Platten (13,4 mm und 5 mm Wandstärke, ULTEM 1000, GE Plastics) und Aluminium 2024-T351 (AlCu4Mg) Rundmaterial (5 mm Durchmesser) wurden in dieser Arbeit als Grundwerkstoff für die Herstellung der Fügeproben ausgewählt. Die mechanischen, physischen und thermischen Haupteigenschaften dieser Materialien sind in Tabelle 1 aufgeführt. Diese Aluminiumlegierung ist eine durch Ausscheidung aushärtbare Legierung, die für Anwendungen wie zum Beispiel bei Außenhautflugzeugpanellen angewandt wird [5]. Das amorphe thermoplaste Polyetherimid wird normalerweise in Flugzeugbaustrukturen und als Matrizie von Verbundwerkstoffen verwendet [6, 7]. Die in dieser Arbeit benutzten Probegeometrien sind in Abb. 1 schematisch zu sehen. Abb. 1A zeigt die Niete- und Kunststoffteile für Punktverbindungen und Abb. 1B die Überlappungen.

Tabelle 1. Mechanische, thermische, physische Haupteigenschaften verwendeter Grundmaterialien [5, 8, 9, 10, 11, 12].

Table 1. Main mechanical, thermal and physical properties of the selected base materials [5, 8, 9, 10, 11, 12].

Mechanical / Physical		Thermal		Processing	
Hardness [HV0,2]	137	CTE, linear at 20 °C	23,2	Annealing Temp. [°C]	256
Rm [Mpa]	425	[$\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$]		Sol. Heat Treating Temp. [°C]	495
R0,2 [Mpa]	324	Conductivity	130 - 150		
A%	8 - 20	[W/m-K]			
E [Gpa]	70	Melting Point [°C]	518 - 548		
Rm [Mpa]	105	CTE, linear at 20 °C	45	Tproc [°C]	335-375
A% @ Yielding	7-8	[$\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$]		Tmold [°C]	114-149
A%	10	Tg [°C]	215 - 220	Tdrying [°C]	135-149
E [Gpa]	3,4	HDT [°C]	190		
α_k [kJ/m ²]	3,5	Conductivity	0,22		
μ_{Fric}	0,18 - 0,42	[W/m-K]

Abb. 1. (A) Geometrie der Niete- und Kunststoffelemente für die Herstellung von Punktverbindungen. (B) Geometrie der Niete- und Kunststoffelemente für die Herstellung von Überlappungen.

Figure 1. (A) Rivet and polymer plate geometries used for fabricating spot joints. (B) Geometries of rivet and polymer plates for the fabrication of overlap joints.

2.2 Fügeapparaturen

Um die Reibnieten-Verbindungen zu produzieren wurde ein Hochgeschwindigkeits-Reibschweißkopf RSM 200 (Harms & Wende), ausgerüstet mit einem Kraftmessungstisch (Kistler AG) verwendet. Diese Apparatur ermöglicht eine zuverlässige Überwachung des Zeit-, Axialbewegung- und Kraftverlaufs während des Fügevorgangs. Abb. 2 stellt das Fügegerät vor.

Abb. 2. Fügegeräte für das Reibnieten von PEI / Aluminiumlegierung Grundmaterialien.

Figure 2. Equipment utilized to produce fricriveted PEI/Aluminium joints.

2.3 Fügeprogramme

Für die Herstellung der Punkt- und Überlappverbindungen wurden Parameterkombinationen in Vorversuchen ermittelt, um fehlerfreie Verbindungen zu

produzieren. Anhand qualitativer Oberflächeninspektion, Beurteilung von Querschliffen und Mikrohärteuntersuchung [13] wurden optimierte Parameteransätze für die vertiefte Untersuchung ausgewählt. Tabelle 2 präsentiert die untersuchten Fügeparameter für die Herstellung von Reibnieten-Verbindungen.

Tabelle 2. Sammlung der verwendeten Fügeparameter bei Reibnieten von PEI/Al 2024 Grundmaterialien.

Table 2. Joining parameters of produced spot and overlap Friction Riveting joints on PEI/Al 2024.

Sample	RS (rpm)	FT (ms)	FP (bar)
Spot joints			
1	15000	3000	11
2	17000	3000	11
3	19000	3000	11
4	21000	3000	11
5	21000	600	11
6	21000	1200	11
7	21000	4000	11
8	21000	3000	8
9	21000	3000	9
10	21000	3000	13
Overlap joints			
11	21000	3000	8
12	21000	3000	9
13	21000	3000	11
14	19000	3000	11
15	19500	3000	1
16	19000	3350	11
17	21000	3300	11
18	21000	3300	8
19	21000	3500	8

3 Eingesetzte Methoden und Verfahren

3.1 Visuelle Beurteilung

Als erster Schritt der qualitativen Verbindungsuntersuchung wird die visuelle Untersuchung der Verbindungsoberfläche vorgenommen. In dieser Phase werden der Aspekt des Materialauswurfs bezüglich Farbänderung untersucht und die Niete kontrolliert um zu sehen, ob die Verbindungszone fest oder beweglich ist. Starke Aufhellung oder Verdunklung des Materialauswurfs weist auf physisch-chemisch strukturelle Modifizierung der aufgeschmolzenen Kunststoffanteile, was zu Veränderung der Festigkeit führen kann [14]. Nicht optimale Fügeparameteransätze können unter andere zu Lockerung der Niete führen. Mit der visuellen Beurteilung können erste Einschätzungen der Verbindungsqualität erfolgen. Dadurch können nötigenfalls die Parameteransätze entsprechend angepasst werden.

3.2 Mikroskopische Analyse

Optische Auflichtmikroskopie wurde zum einen eingesetzt als Mittel zur Untersuchung von Makroschliffen für die Auswahl der optimierten Parameteransätze und zum anderen für die Bestimmung von Gefügeveränderungen infolge von Hitze und Verformung des plastifizierten Materials. Aus der Verbindungen wurden Querschnittproben geschnitten und kalt eingebettet. Damit konnte die Blickrichtung parallel zur Nietelänge erreicht werden, sodass die verformte Spitze der Niete vollständig betrachtet werden konnte. Die eingebetteten Proben wurden mit Hilfe herkömmlicher metallographischer Schleif- und Polierprozeduren vorbereitet, elektrolytisch mit Barkerlösung (200mL destilliertes Wasser, 5 mL Tetrafluoroborsäure 35%) geätzt und auf einem Polarisierungsmikroskope (Olympus PMG 3) untersucht.

3.3 Mechanische Prüfung

Der mechanische Zugversuch von Punktverbindungen wurde an einer 50kN Universalprüfmaschine Model Instron 1195 durchgeführt. Um die Zugfestigkeit der Verbindungen zu bestimmen wurden Nieten mit einer Geometrie einer Rundzugprobe nach DIN EN 10002 [15] und Kunststoffplatten mit 70 x 70 x 13,4 mm hergestellt. Zugproben wurden mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,5 mm/min in Raumtemperatur bis zum Bruch getestet. Scherzugproben von Überlappverbindungen wurden nach ASTM-D5961 [16] hergestellt und mit einer konstanten Geschwindigkeit von 2 mm/min an einer 200 kN Universalprüfmaschine der Fa. Zwick-Roell (Model 1484) in Raumtemperatur bis zum Bruch gezogen.

4 Beschreibung des Reibnieten Verfahrens

Das Reibnieten (aus dem englischen Begriff FricRiveting) ist ein neues Punktverbindungsverfahren, welches sowohl auf mechanischer Verbindung (Form- und Kraftschlüssigkeit) als auch auf Reibschweißtechnik beruht [17]. Ausgehend vom Stand der Technik liegt dem neuen Fügeverfahren daher die Aufgabe zugrunde, zuverlässige Verbindungen zwischen Metall- und Kunststoff-Werkstücken in einfacher Weise herzustellen.

Die Fügepartner (Grundmaterialien) werden mit Hilfe eines zylindrischen, metallischen Verbindungselements (Niete) verbunden. Als Grundmaterialien können polymere und/oder metallische Werkstoffe in verschiedenen Kombinationen verwendet werden. Die Grundmaterialien können verschiedene Formen und Oberflächen aufweisen und in mehreren Schichten angeordnet sein. Das Verbindungselement kann profiliert werden, dabei sind verschiedene Geometrien denkbar, wie beispielsweise auf Abb. 3 dargestellt. Mehrere Prozessvarianten sind ebenfalls möglich [17]. Allerdings wird hier nur das grundsätzliche Punktverbindungs-Prinzip beschrieben.

Abb. 3. Beispiel von abgedichteten Reibnieten-Nähten und Nietegeometrien: (A) Gewindeeinsatz im Kunststoffteil; (B) Überlappung verschiedener Polymeren; (C) Metall-Polymer Sandwichstrukturen, (D) Niete mit Gewindeprofilierung und (E) Niete mit Verankerungselementen.

Figure 3. Possible hermetic sealed joint configurations and rivet geometries: (A) metallic insert in polymeric components; (B) Overlap joints with different polymers; (C) Metal – polymer sandwich-structures; (D) Rivet with threaded profile and (E) Rivet with interference elements on its shaft.

In der folgenden Konfiguration wird ein metallischer Bolzen mit einem oder mehreren Kunststoffelementen verbunden. Der in Rotation versetzte Bolzen wird auf die Oberfläche des Kunststoff-Grundwerkstoffs gedrückt (Abb. 4A), welcher vor dem Fügeprozess auf einer Unterlage fixiert werden muss. Während der Anfangsphase dringt der Bolzen in das Grundmaterial ein und es bildet sich eine dünne Schicht aus aufgeschmolzen/aufgeweichten Kunststoffmaterial um den Bolzen (Abb. 4B).

Mit Erreichen einer vorprogrammierten Tiefe erhöht sich die Reibleistung signifikant bedingt durch die geringe thermische Leitfähigkeit des Kunststoffes. Obwohl der

metallische Bolzen die Wärme schnell abführt, wird doch mehr viskose Wärme erzeugt was zu einer steigenden Temperatur im Nietematerial führt. In Folge plastifiziert die Spitze der Niete. Zu gleicher Zeit wird der Axialdruck (Stauchdruck) erhöht und der plastifizierte Teil der Niete wölbt sich entsprechend der Temperatur und Druckverhältnisse auf. Die Bolzenspitze wird in Folge verformt und damit formschlüssig in den Werkstücken verankert (Abb. 4C). Die endgültige Verbindung ist in Abb. 4D dargestellt.

Abb. 4: Das Reibnieten Verfahren: (A) Die Fügepartner werden fixiert; (B) Die rotierende Niete dringt die Kunststoffplatte ein; (C) Die Drehgeschwindigkeit der Niete wird reduziert und der Axialdruck erhöht und (D) Die Verbindung kühlt ab und die Naht entsteht.

Figure 4. The FricRiveting joining technique: (A) Positioning and clamping of joining partners; (B) Insertion of the rotating rivet into the polymeric plate; (C) Deceleration of rotation and increase of axial pressure and (D) Cooling and joint consolidation.

Für Nietelegierungen mit höheren eutektischen Temperaturen und entsprechend reduzierten Plastifizierungsverhältnissen kann die Festigkeit der Verbindung durch eine Profilierung des Bolzens verbessert werden, welche nach der Abkühlung und somit Aushärtung des Kunststoffs zur Tragfähigkeit beiträgt. Die Position des aufgewölbten Bolzenendes kann in Bezug auf die Tiefe oder Zeit kontrolliert werden. Es ist möglich ohne Durchdringung der Gegenseite eine Verbindung herzustellen, was zur Verbesserung der

Verbindungsfestigkeit führt weil sich die mit einer Durchbohrung verbundenen Spannungskonzentration verringert.

Wegen der Temperatur- und Verformungsverhältnisse weist eine typische Reibnieten-Verbindung eine komplexe Mikrostruktur auf. Nicht nur im Polymerbereich, sondern auch im Metallbereich wird das Gefüge von physisch-chemischen beziehungsweise metallurgischen Vorgängen geprägt. Abb. 5 zeigt die schematische Mikrostrukturdarstellung einer reibgenieteten Punktverbindung. Auf dieser Figur sind fünf thermo-mechanisch veränderte Mikrogefügezonen zu erkennen. In der folgenden Sektion werden diese Zonen mittels einer Beispielverbindung analysiert. Die detaillierte Beschreibung einzelner Mikrogefügezonen einer reibgenieteten Verbindung wird im [18] berichtet.

Abb. 5. Mikrostrukturelle Zonen beim Reibnieten: (A) Auf der Niete sind eine Metall wärmebeeinflusste Zone (MWBZ), eine Metall thermo-mechanisch beeinflusste Zone (MTMBZ) und die Verankerungszone (VZ) zu sehen; Im Kunststoff sind eine Wärmebeeinflusste Zone (KWBZ) und eine thermo-mechanisch beeinflusste Zone (KTMBZ) zu beobachten. Darüber hinaus entsteht ein Materialauswurf aus dem geschmolzenen Polymer. (B) Makroschliff einer PEI / Al 2024 Fügeverbindung.

Figure 5. Microstructural zones of a typical FricRiveting joint: (A) Schematic representation of the heat affected zone (MHAZ), the thermo-mechanically affected zone (MTMAZ) and the anchoring zone (AZ) on the metallic rivet; in the polymer volume there are a heat

affected zone (PHAZ) and a thermo-mechanically affected zone (PTMAZ). Moreover a flash is formed due to expelled molten polymer. (B) A optical macrograph of a PEI/Al 2024 joint.

5 Reibgenieteten PEI / AA2024-T351 Verbindungen

Punkt- und Überlappverbindungen mit hoher Festigkeit unter Raumtemperatur wurden reibgenietet. Die hohe Formschlüssigkeit der Bolzenspitze ist für die hervorragende Verbindungszugfestigkeit von etwa 10,0 kN und Verbindungsscherzugfestigkeit von etwa 75 MPa verantwortlich, welche dem Wert der Aluminium Grundlegierung (siehe Abb. 6A, Nr. 1) bzw. etwa 70% von der Festigkeit der Kunststoffplatte entspricht (siehe Abb. 6B, Nr. 1). Dieses kann als hervorragendes Ergebnis betrachtet werden, denn dieser PEI Kunststoff ist einerseits etwa 2-fach schwächer als die AA2024-T351 Aluminiumlegierung (siehe Tabelle 1) und andererseits sehr kerbempfindlich [19]. Das Versagen der Zugproben fand unter duktilen Bruchverhältnissen auf der freien Länge der Niete statt, außerhalb des Polymer-Metall Übergangsbereichs der Verbindung (siehe Abb. 6A, Nr. 2 und 3). Bei den Scherzugproben, versagte die Verbindung endgültig auf den Kunststoffplatten unter spröden Bruchverhältnissen (siehe Abb. 6B, Nr.2)

(A)

(B)

Abb. 6. (A) Nr.1 stellt die durchschnittliche Zugfestigkeit dar – Dehnung Kurve für fünf getestete Zugproben aus PEI /Al 2024 im Vergleich mit der Nietefestigkeit; Nr. 2 zeigt die Oberansicht einer gebrochenen Zugprobe; Nr. 3 stellt die duktile Bruchoberfläche auf der Niete außerhalb der Naht für die Probe auf Nr. 2 dar. (B) Nr. 1 zeigt die durchschnittliche Scherzugfestigkeit-Dehnung Kurve für drei getestete Scherzugproben aus PEI /Al 2024 im Vergleich mit der Festigkeit des unbehandelten Kunststoffes; Nr. 2 präsentiert die spröde Bruchoberfläche auf der unteren Kunststoffplatte einer getesteten Scherzugprobe.

Figure 6. (A) The average Tensile strength vs. Strain curve for 5 PEI/ Al 2024 samples is shown in Nr. 1; The overview of tested tensile sample showing the final failure taking place in the rivet portion outside the joint area is presented in Nr. 2, while in Nr.3 the fractured rivet of the sample in Nr.2 displays ductile fracture ("cup and cone" ductile fracture). (B) The average Shear tensile strength vs. Elongation curve for 3 PEI /Al 2024 samples is presented in Nr. 1; Nr. 2 shows the final failure occurring in the lower polymer plate in a brittle manner.

Die typische Mikrostruktur einer PEI/Aluminium 2024 Punktverbindung ist auf Abb. 7 dargestellt. Erkennbar ist im Abb. 7A die so genannte Verankerungszone, die aus dem verformten Anteil der Nietespitze besteht. Die verformte Nietespitze bedingt durch hohe Prozesstemperaturen (gemessen zwischen 300 und 500 °C, wie im [20] berichtet) und Axialkräfte, die zu Plastifizierung der Niete beitragen, trägt fast allein die gesamte mechanische Belastung. Neben diesen geometrischen Eigenschaften, trägt die im Polymer-Metall Übergangsbereich entstandene Adhäsionskraft zu der hervorragenden Verbindungsfestigkeit bei. Darüber hinaus beinhaltet die Verankerungszone eine thermo-mechanisch beeinflusste Zone (MTMBZ), die teilweise von dynamisch-erholtem Gefüge (siehe Abb.7B) und aus dynamisch-rekristallisierten Körnern (siehe Abb. 7C) besteht. Die geschmolzenen Polymeranteile um die Niete wurden leicht thermisch geändert, wobei Mikroporen entstehen. Dieses thermisch-degradierte Polymer ist allerdings für die gesamte Festigkeit nicht von Bedeutung [14], weil die Abnahme des Molekulargewichtes durch Kettenabbau nicht hinreichend relevant ist um die gesamte Festigkeit der Verbindung zu beeinflussen. Diese mikrostrukturelle Verbindungseigenschaften können zusätzlich mit Hilfe der Härteuntersuchung nachgewiesen werden, wobei das dynamisch erholte/rekristallisierte metallische Material eine Abnahme der Härte und das polymerische Material eine Zunahme aufweisen, wie in [20] berichtet.

Abb. 7. (A) Makroschliff der reibgenieteten PEI/Al 2024 Verbindung von Abb. 5. (B) Dynamisch erholte Mikrostruktur (Deformationsbänder) auf der Niete. (C) Teilweise dynamisch rekristallisierte Nietegefüge (Verfeinerung der Körner) bedingt durch das extreme Temperatur-Verformung Verhältnis beim Reibnieten.

Figure 7. (A) Cross Section macrograph of the PEI/Al 2024 fricriveted joint of Figure 5. (B) Presence of dynamically recovered (deformation bands) metal microstructure. (C) Partially dynamically recrystallized grains in the deformed rivet resultant from the imposed temperature-deformation regime.

6. Schlussfolgerungen

Dargestellt und beschrieben worden ist ein Verfahren zum Verbinden von Polymer-Metall Strukturen, das Reibnieten ("FricRiveting"). Die Aufgabe, ein Verfahren bereitzustellen, das eine zuverlässige Verbindung von metallischen Werkstücken

einerseits und Kunststoff-Werkstücken andererseits ermöglicht, wurde gelöst, indem hohe Zug- (im Bereich der Nietezugfestigkeit) und Scherzugfestigkeit (etwa 70% der Kunststofffestigkeit) nachgewiesen wurden. Diese hervorragende mechanische Leistung ist auf die Verknüpfung der Nieteverankerungsleistung an der Fügestelle mit den Adhäsionskräften im Polymer-Metall Übergangsbereich zurückzuführen. Außerdem verursacht das hohe Temperatur-Verformung Verhältnis Gefügeänderungen in der metallischen Niete. Eine durch dynamische Erholung und Rekristallisierung geänderte Mikrogefügezone (die Metall thermo-mechanisch beeinflusste Zone) ist in der Verankerungszone zu erkennen. Auf dem aufgeschmolzenen Kunststoffbereich an der Polymer-Metall Übergangszone finden zwar Kettenabbauvorgänge statt bedingt durch die hohen Prozesstemperaturen, aber die gesamte Verbindungsfestigkeit wird nicht beeinträchtigt. Dies ist einerseits so, weil die Menge von degradiertem Kunststoff zu niedrig ist um eine relevante Abnahme des Molekulargewichts und der sich daraus ergebenden Festigkeitsreduzierung zu verursachen, andererseits kompensiert die hohe Verankerungskraft der Niete die durch die degradierte Kunststoffzone entstandene Festigkeitabnahme, sodass die Verbindung höhere Festigkeit unter statischen Belastung aufweist.

Reibnieten hat das Potenzial sich zukünftig in mehreren Industriebranchen als eine schnelle, kostengünstige und leistungsfähige Verbindungstechnik durchzusetzen. Bei dem Reibnieten-Verfahren werden die positiven Verbindungseigenschaften von Nieten und Hybridverbindungsmethoden für Metalle, Kunst- und Verbundkunststoffe genutzt. Mit dem Verfahren sollen die positiven Eigenschaften dieser Konzepte, wie mechanische Zuverlässigkeit, Korrosions- und Alterungsbeständigkeit, Gewichtersparnis und Verringerung der Produktionskosten miteinander kombiniert werden.

Das Reibnieten Verfahren könnte, aufgrund seiner punktförmigen Verbindungskonfiguration, das Nieten sowie das Hybrid Niet-Kleben von Komposit- und Multi-Material-Strukturen ohne wesentliche konstruktive Anpassungen ersetzen. Die erforderliche Ausstattung mit Geräten ist einfach gehalten. Herkömmliche Reibschweiß-

oder Industriebohrmaschinen können für die Methode benutzt werden. Die Probenaufspannung kann entsprechend der für das Reibschweißen und Fräsen sein. Zusätzliches Werkzeug wird nicht benötigt. Der Fügezyklus wird im Vergleich zu herkömmlichen Verbindungen verkürzt und vereinfacht. Dies kann angenommen werden, weil weitere Vorbereitungsschritte wie Oberflächenbehandlung, und das Einbringen eines Einsatzes in die Fügestelle wegfallen und so die Aushärtezeit verkürzt.

Der durch die Geometrieangepassung und den engen Kontakt zwischen Kunststoff und Metall erzeugte Abdichtungscharakter der Verbindung kann die Widerstandsfähigkeit gegen Korrosion und Alterung und damit die Lebensdauer der Verbindung erhöhen. Die Möglichkeit einfache Technik für die Erzeugung von Verbindungen zu benutzen, verbunden mit Schnelligkeit, Einfachheit und Umweltverträglichkeit macht das Reibnieten Verfahren zu einer interessanten Alternative für das Fügen von Polymer-Metall Teilen.

7 Literaturverzeichnis

1. J. L. Hecht, *Polym. Compos.* **1986**, 7, 186.
2. R. W. Messler Jr., *Assem. Autom.*, **2000**, 20, 118.
3. R. O. Parmley, *Standard Handbook of Fastening and Joining*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, **1996**.
4. L. –H. Lee, *Fundamentals of Adhesion*, Plenum Press, New York, **1991**.
5. J. R. Davis, *ASM Specialty Handbook, Aluminum and aluminum alloys*, 3rd ed., ASM International, **1996**.
6. G. Gardiner, *High Perform. Composit.* **2006**, March, 50.
7. A. Gavine, *Aerosp. Test. Int.* **2005**, March, 39.
8. L. F. Mondolfo, *Aluminum Alloys: Structure and Properties*, Butterworths, London, **1976**.
9. J. E. Hatch, *Aluminum Properties and Physical Metallurgy*, American Society for Metals, Metals Park, **1984**.

10. P. Catsman, *Kunststoffe* **2005**, 10, 143.
11. C. A. Dostal, *Engineered Materials Handbook: Volume 2, Engineered Plastics*, ASM International, Metals Park, **1998**.
12. H. Domininghaus, *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, Springer Verlag, Berlin, **1998**.
13. S. T. Amancio-Filho, *Ph.D. Thesis*, TU Hamburg-Harburg, Germany, **2007**.
14. S. T. Amancio-Filho, J. Roeder, S. P. Nunes, J. F. dos Santos, F. Beckmann, *Polym. Degrad. Stabil.* **2008**, doi:10.1016/j.polymdegradstab.2008.05.019.
15. *DIN EN 10002 Tensile testing of metallic materials, method of test at ambient temperature*, Deutsches Institut für Normung e.V., Germany, **1999**.
16. *ASTM D 5961/D 5961 M-05 Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates*, ASTM International, USA, **2005**.
17. S. T. Amancio-Filho, M. Beyer, J. F. dos Santos, *DE 10 2005 056 606 A1 Verfahren zum Verbinden eines metallischen Bolzens mit einem Kunststoff-Werkstück*, Deutsches Patent- und Markenamt, Munich, **2007**.
18. S. T. Amancio-Filho, J. F. dos Santos, presented at *MS&T 08*, Pittsburgh, USA, Oktober 4 – 10, **2008**, pp. 1-12.
19. J. A. Brydson, *Plastic materials 7th ed.*, Butterworth Heinemann, USA, **1999**.
20. S. T. Amancio-Filho, J. F. dos Santos, presented at *ANTEC 2008*, Milwaukee, USA, Oktober 4 – 8, **2008**, pp. 841-845.