

Reaktive Multischichtsysteme

Maßgeschneiderte Wärmequellen für Kunststoffverbindungen

Erik Pflug, Jörg Bretschneider, Georg Dietrich, Martina Zimmermann, Andreas Leson

Einleitung

Der Bedarf an innovativen Leichtbauweisen treibt die Entwicklung von neuartigen Materialien und Materialkombinationen voran. Neben dem Trend, leichte Metalle wie Aluminium und Magnesium oder poröse Strukturen einzusetzen, wird vor allem in der Erweiterung des Einsatzbereiches von Kunststoffen ein großes Potenzial gesehen. Parallel zur Werkstoffentwicklung wachsen auch die Herausforderungen für die Füge­technologie, bei der neben Verbindungen aus gleichartigen Kunststoffen auch Kombinationen zwischen unterschiedlichen Kunststoffen oder von Kunststoffen mit Metallen gefügt werden müssen. Außerdem bestehen neben der Forderung nach ausreichend festen Verbindungen oft weitere Wünsche hinsichtlich der Verbindungseigenschaften, wie die Herstellung hermetischer Fügungen oder das Vermeiden ausgeprägter Werkstoffschädigungen [1,2].

Die konventionellen Fügeprozesse, wie Löten und Schweißen, erzeugen meist einen hohen Wärmeeintrag in das Bauteil. Dabei wird nicht nur der eigentliche Fügebereich erwärmt, sondern auch der angrenzende Bereich oder gar das komplette Bauteil. Dadurch können Veränderungen der Werkstoffmikrostruktur oder mechanische Spannungen entstehen, was zu unerwünschten Eigenschaftsdegradationen führt. Klebverbindungen können zudem alterungsanfällig sein und erfordern aufgrund teilweise notwendiger Vor- und Nachbehandlungen längere Prozesszeiten, was insgesamt zu höheren Kosten führt.

Das Fügen mit Reaktiven Multischichtsystemen (RMS) ist eine Möglichkeit, die Grenzen der herkömmlichen Verbindungstechnologien ganz oder zumindest teilweise zu überwinden.

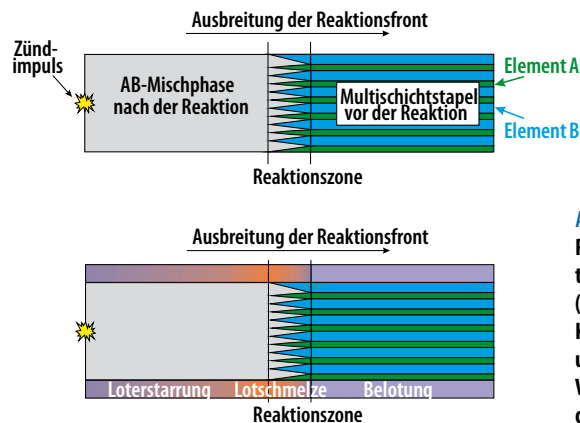


ABBILDUNG 1: Aufbau und Reaktionsschema eines reaktiven Multischichtsystems (RMS): Einfaches RMS für Kunststoffverbindungen (oben) und RMS mit Belotung für Verbindungen höherschmelzender Werkstoffe.

RMS sind eine direkt in die Füge­stelle eingebrachte zündbare Wärmequelle, die an den Anwendungsfall angepasst – „maßgeschneidert“ – werden kann, so dass schädigungsarme Verbindungen mit Fügeprozesszeiten im Millisekundenbereich herstellbar sind.

Reaktive Multischichtsysteme

RMS bestehen aus zwei chemischen Elementen, die exotherm miteinander reagieren können. Um kurze Reaktionszeiten zu erreichen, werden diese Elemente lagenweise abwechselnd in dünnen Schichten angeordnet, wobei

die Einzelschichtdicken im Nanometerbereich liegen. Ein solches Schichtsystem enthält typischerweise über eintausend Einzelschichten. Wird in dieses System durch einen Zündimpuls eine Aktivierungsenergie eingebracht, entsteht eine selbstfortschreitende exotherme Reaktion. Infolge dieser Reaktion reagiert das RMS innerhalb von Sekundenbruchteilen (typisch 1/100 s) durch und gibt einen Teil seiner Bindungsenthalpie hauptsächlich in Form von Wärme und zu einem kleineren Teil als Bewegungsenergie der Reaktionsprodukte ab. Die in den Einzelschichten vorliegenden Elemente wandeln sich

ZUSAMMENFASSUNG

Die Nutzung von Reaktiven Multischichtsystemen (RMS) als Wärmequelle für die Herstellung von Verbindungen thermoplastischer Kunststoffe gestattet es, Grenzen herkömmlicher Fügeverfahren, wie Kleben und Schweißen, ganz oder teilweise zu überwinden. Durch die innerhalb von Millisekunden direkt an der Füge­stelle ablaufende und an die Kunststoff­eigenschaften angepasste Energie­freisetzung werden unerwünschte Veränderungen der Werkstoffstruktur der

Fügepartner vermieden. Es werden Verbindungsfestigkeiten erreicht, die mit denen kommerziell eingesetzter Fügeverfahren vergleichbar sind und teilweise auch höher liegen, wobei ein besonderer Vorteil darin besteht, dass keine Oberflächenvorbehandlung erforderlich ist. RMS-Verbindungen von thermoplastischen Kunststoffen erreichen eine hohe Langzeitstabilität für die Kunststoffe, die selbst nur in geringem Maße alterungsanfällig sind.

nach der Reaktion in eine homogene Mischphase um. Wird das RMS direkt in die Fügezone einer herzustellenden Verbindung platziert und dort gezündet, können die zu verbindenden Werkstoffe direkt durch lokales Aufschmelzen gefügt werden. Für Werkstoffe mit hohen Schmelzpunkten (über 700 K) kann ein Lötprozess realisiert werden, bei dem das Lot entweder als zusätzliche Schicht auf dem RMS oder auf der Oberfläche der Fügepartner aufgebracht wird (Abb. 1). RMS können sowohl als freistehende Folie als auch als Schichtsystem direkt auf Bauteilen abgeschieden werden.

RMS bieten den Vorteil, dass ihre Eigenschaften sehr gezielt auf den Anwendungsfall anpassbar sind. Es können fugezoneninterne Wärmequellen geschaffen werden, welche die zum Fügen notwendige Energie in einem sehr kurzen Zeitraum, lokal und präzise steuerbar, freigeben. Durch die kurzen Prozesszeiten werden die Bauteile nur dort signifikant erwärmt, wo die Fügeverbindung hergestellt werden soll, und die Wärmeeinflusszone bleibt auf wenige Mikrometer beschränkt. Die

thermischen Belastungen der gefügten Werkstoffe und die Spannungen in der Fügezone können dadurch minimiert werden [3,4].

Die Anpassung der RMS-Eigenschaften erfolgt durch die Wahl des Elementsystems (Tab.1) und durch das Schichtdesign, bei dem über die Wahl der Schichtanzahl, der Periodendicke und des Verhältnisses der Elementgehalte die freigesetzte Wärmemenge und die Reaktionsgeschwindigkeit einstellbar sind.

Die am meisten untersuchten und eingesetzten RMS sind mittelenergetische Systeme mit Nickel und Aluminium als Reaktionspartner. Diese Systeme eignen sich insbesondere für die Herstellung von Kunststoffverbindungen und für Weichlotfugungen.

Fügeprozesse mit RMS

Zur Anwendung dieser innovativen Fügetechnologie wird das RMS als Folie zwischen zwei Bauteile eingelegt. Anschließend wird der komplette Fügeaufbau mit Druck beaufschlagt (Abb. 2). Durch die Initiierung der exothermen Reaktion des RMS, z.B. mittels eines elektrischen Zündfunken, wird die Bindungsenthalpie innerhalb weniger Millisekunden in Wärme umgewandelt, wodurch bei geeigneter Wahl des RMS-Typs eine feste Verbindung der Bauteile entsteht. Für thermoplastische Kunststoffe erfolgt ein direktes Aufschmelzen der Fügepartner, wodurch eine Verbindung der eingesetzten Materialien relativ leicht erreicht werden kann, ohne dass Vorbehandlungen durchgeführt oder Benetzungsschichten eingebracht werden müssen. Für höherschmelzende Werkstoffe sind Lotschichten und eventuell auch Benetzungsschichten notwendig, da ein direktes Aufschmelzen des Grundmaterials nicht möglich ist (Abb. 2). Die bei der Reaktion frei werdende Energie wird

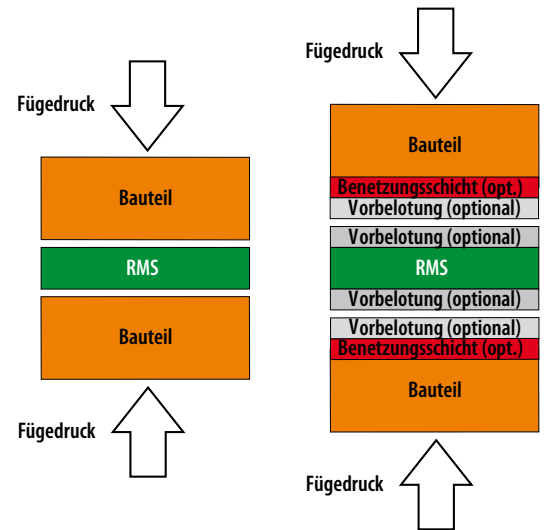


ABBILDUNG 2: Aufbau beim Fügeprozess mit einfachem RMS (links) und mit beloteten Oberflächen (rechts).

in diesem Fall zum Aufschmelzen des Lotes und damit zur Initiierung des Lötprozesses genutzt.

Die in der Tab. 1 angegebene maximal freiwerdende Bindungsenthalpie und die sich ergebende höchste adiabatische Reaktionstemperatur von Ni/Al-RMS gilt für ein stöchiometrisches Verhältnis von 50:50 at%.

In der Abb. 3 ist der Ablauf einer RMS-Reaktion für die Herstellung einer Polycarbonat-Verbindung mit einem Ni/Al-RMS anhand von Momentaufnahmen eines mittels Hochgeschwindigkeitskamera hergestellten Videos gezeigt. In der Bildfolge kann zum einen das „Durchreagieren“ des RMS von links nach rechts innerhalb von ca. 5 Millisekunden verfolgt werden; zum anderen ist erkennbar, dass die Reaktionsprodukte des RMS nicht an der Stelle verbleiben, an der die RMS-Folie vor der Reaktion lag. Die in die Fügestelle eingelegte Folie wird fragmentiert und Bruchstücke der Folie werden aus dem Fugebereich ausgetrieben. Während zu Beginn des Fügeprozesses (1,1 ms) ein Austreiben hauptsächlich entgegen der Bewegung der Reaktionsfront erfolgt, kommt es im mittleren

SUMMARY

Reactive Multilayer Systems as tailored heat sources for plastic bondings

The use of reactive multilayer systems (RMS) as a heat source for the manufacturing of thermoplastic material bondings makes it possible to completely or partially overcome the limitations of conventional joining techniques, such as gluing or welding. The release of energy, which takes place directly inside the joining zone within milliseconds can be well adapted to the properties of the plastics. Thus undesired changes in the material structure of the joining partners can be avoided. Bonding strengths which are higher than or comparable to those of commercially used joining methods can be achieved. Furthermore, a particular advantage of RMS joining is that no surface pretreatment is required. RMS bondings of thermoplastics achieve high long-term stability for plastics, which themselves are only slightly susceptible to aging.

RMS-Elementsystem	Freiwerdende Bindungsenthalpie (kJ/mol)	Adiabatische Reaktionstemperatur (°C)
Ti/Al	-36	1227
Ni/Al	-59	1639
Zr/Si	-72	2250
Pd/Al	-92	2380

TABELLE 1: Eigenschaften verschiedener Reaktiver Multischichtsysteme

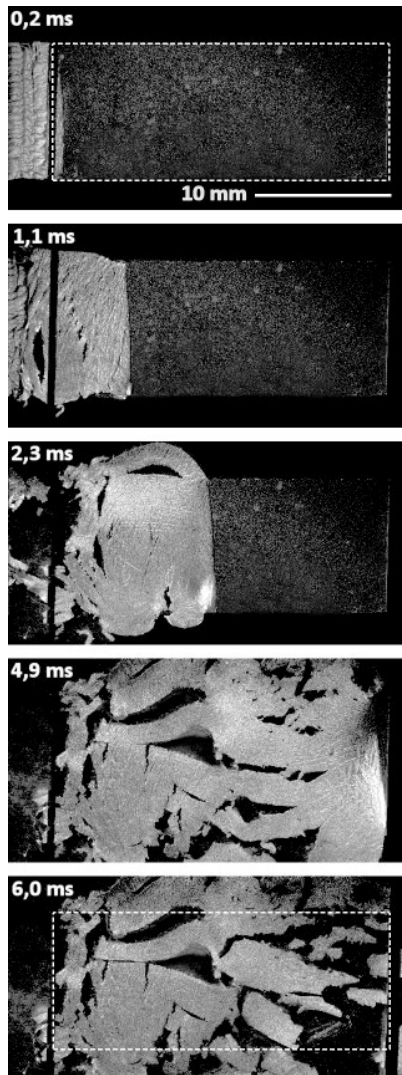


ABBILDUNG 3: Bildsequenz aus einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme der RMS-Reaktion beim Fügen von PC. Der 10 mm · 25 mm große Fügebereich ist auf dem ersten und letzten Bild markiert. Bei den hellgrau erscheinenden Stellen handelt es sich um die nach der Reaktion des RMS gebildete Mischphase. Als Startpunkt für die Zeitmessung wurde Auftreffen der Reaktionsfront im Fügebereich gewählt.

tionstemperatur verringert. So besitzt ein Ni/Al-RMS mit einem Verhältnis von 20:80 at% nur etwa die Hälfte der maximalen Energie und Reaktionstemperatur. Durch derartige Energieanpassungen kann die Reaktion des RMS gleichmäßiger als in dem in der Abb. 3 dargestellten Fall erfolgen und es können die gewünschten schädigungsarmen Verbindungen von thermoplastischen Kunststoffen hergestellt werden.

Verbinden von thermoplastischen Kunststoffen

Aufgrund ihres niedrigen Schmelzpunktes sind thermoplastische Kunststoffe durch die hier verwendete interne Wärmequelle direkt aufschmelzbar und bilden unter Druck und nach Wiedererstarren eine stoffschlüssige Verbindung [5]. Eine Entwicklung der RMS-Fügetechnologie für Kunststoffverbindungen wurde am Fraunhofer IWS Dresden zunächst für fünf faserverstärkte thermoplastische Kunststoffe durchgeführt, die in der Tab. 2 aufgelistet sind. Die Auswahl erfolgte so, dass sowohl amorphe als auch teilkristalline Kunststoffe betrachtet werden und ein möglichst breiter Bereich von Schmelztemperaturen abgedeckt wird. Eine derartige Technologieentwicklung beinhaltet neben der bereits erwähnten Auswahl und Anpassung des RMS-Typs Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Parameter, wie

z.B. des Fügedrucks und der Oberflächenrauigkeit, auf die erreichbaren Festigkeiten. Darüber hinaus wurde betrachtet, welchen Einfluss das Bauteil- bzw. Probandesign und die Fügestellengeometrie auf die Verbindungseigenschaften haben. Mikroskopische Untersuchungen der Fügestellen und Analysen zur Reaktionskinetik der RMS während der Energiefreisetzung zielen darauf, die Wirkmechanismen der Anbindung zu erkennen und daraus Schlussfolgerungen zu ziehen, auf deren Basis Entwicklungen von Fügeprozessen für weitere thermoplastische Kunststoffe und andere Werkstoffe möglich sind, ohne umfangreiche Parameterstudien durchzuführen.

Um Vergleiche mit anderen Fügeverfahren ziehen zu können, wurden die Festigkeiten der Kunststoff-RMS-Verbindungen mittels Zugscherversuch nach DIN EN 1465 ermittelt. In der Tab. 3 sind die ermittelten maximalen Festigkeiten der RMS-Fügungen für die betrachteten fünf thermoplastischen Kunststoffe zusammengestellt. Es handelt sich dabei um Werte, die nach Optimierung des Parametersatzes für RMS-Typ, Fügedruck und Oberflächenrauigkeit für Überlappproben mit Fügeflächen von (12 x 5) mm² ermittelt wurden.

Beim Vergleich der verschiedenen Kunststoff-RMS-Fügungen zeigt sich, dass deren Festigkeiten der gleichen Tendenz folgen wie die Festigkeiten der Grundwerkstoffe. Für RMS-Verbindungen mit dem hochtemperaturbeständigen und hochfesten thermoplastischen Kunststoff Polyphenylensulfid (PPS) kann mit einer Zugscherfestigkeit von 32 MPa der höchste Wert der hier betrachteten Werkstoffe erzielt werden. Für das gering belastbare Polypropylen (PP) weist auch die RMS-Verbindung mit 14 MPa die geringste Zugscherfestigkeit auf.

Zeitabschnitt des Fügeprozesses (Bilder bei 2,3 ms und 4,9 ms) hauptsächlich zu einem Austreiben der Bruchstücke senkrecht zum Fortschreiten der Reaktionsfront. Nach vollständigem Durchlauf der Reaktion durch die RMS-Folie bewegt sich ein Teil der Reaktionsprodukte weiter in der Laufrichtung der Front aus dem Fügebereich heraus (6,0 ms). An den nach der Reaktion in der Bildfolge dunkel erscheinenden Stellen sind keine Reaktionsprodukte im Fügebereich mehr vorhanden und es kann an diesen Stellen zur Verbindung der Fügepartner kommen.

Ein „Maßschneidern“, also das Anpassen der Energiefreisetzung an die herzustellende Verbindung, z.B. von thermoplastischen Kunststoffen, kann durch eine Änderung des Verhältnisses von Nickel zu Aluminium erreicht werden. Durch die Veränderung zu einem aluminiumreicheren System werden die Energiefreisetzung und die Reak-

Thermoplastischer Kunststoff	Kurzzeichen	Schmelztemperatur [°C]	Glasübergangstemperatur [°C]
Polypropylen	PP	162	0
Polycarbonat	PC	220	148
Polyamid 6	PA6	220	60
Polybutylenterephthalat	PBT	223	47
Polyphenylensulfid	PPS	280	90

TABELLE 2: Untersuchte thermoplastische Kunststoffe

In der Abb. 4 ist ein Vergleich der erreichten Festigkeiten für RMS-Verbindungen zu den Fügeverfahren Kleben und Laserstrahlschweißen für unbehandelte Oberflächen von Fügepartnern aus Polyamid 6 dargestellt. Auf den ersten Blick überrascht die geringe Festigkeit der Klebverbindung, allerdings muss das Fehlen von Oberflächenvorbehandlungen in Betracht gezogen werden, die beim Kleben zum Erreichen höherer Festigkeiten erforderlich wären. Hier zeigt sich gerade ein entscheidender Vorteil der RMS-Fügetechnologie, bei der beim Einsatz für thermoplastische Kunststoffe auf Vorbehandlungen verzichtet werden kann. Unter diesen Bedingungen werden für RMS-Verbindungen wesentlich höhere Festigkeiten als beim Kleben und ähnlich hohe Festigkeiten wie beim Laserstrahlschweißen, für das ebenfalls keine Vorbehandlung erforderlich ist, erzielt [6].

Langzeitfestigkeit

Im Vergleich zu anderen Werkstoffen führen Alterungsmechanismen bei Kunststoffen und Kunststoffverbindungen zu besonders stark ausgeprägten Effekten. Diese Alterung – im Material irreversibel ablaufende chemische und physikalische Vorgänge – kann durch verschiedene Einflüsse zustande kommen, unter anderem durch erhöhte Temperaturen und Temperaturwechsel, atmosphärische Belastungen wie Feuchtigkeit und Strahlung oder durch das Einwirken von Medien. Im Ergebnis können Eigenschaftsveränderungen der Kunststoffe eintreten, wie z. B. eine Festigkeitsabnahme oder eine Versprödung. Um RMS-Verbindungen in industriellen Anwendungen einsetzen zu können, ist es erforderlich, das Alterungsverhalten von mit dieser Technologie hergestellten Kunststoff-Fügestellen zu kennen. Zu diesem Zweck wurde die Langzeitfestigkeit, die meist die wichtigste Kenngröße zur Charakterisierung von Eigenschaftsdegradationen ist, für die in der Tab. 2 aufgeführten Kunststoffe nach Temperaturwechseltests (TW), Feuchte-Wärmeauslagerungen (FW) und Salzsprühtests (SST) ermittelt. Bei diesen Tests handelt es sich um zeitgeraffte Versuche, die unter Bedingungen durchgeführt werden, die im

Vergleich zu den üblichen Umweltbelastungen verschärft sind.

In der Abb. 5 ist für RMS-Verbindungen von PA6, PC und PPS die relative Änderung der Festigkeit gezeigt, die bei den genannten Tests zur Langzeitstabilität zu verzeichnen ist. Vergleichend ist der Festigkeitsverlust der Kunststoff-Grundwerkstoffe dargestellt. Für die hier betrachteten Kunststoffe lassen sich die Alterungseffekte in drei Klassen einteilen. In einer ersten Klasse, in der Abb. 5 mit dem Vertreter PA6, wird eine erhebliche Abnahme der Festigkeit beobachtet, vor allem bei den Tests in feuchter Umgebung (FW und SST). Dieser Festigkeitsverlust der RMS-Verbindung wird wesentlich durch die ausgeprägte thermooxidative Alterung von PA6 bedingt. Es handelt sich damit um eine durch die Alterung des Grundwerkstoffs bedingte Eigenschaftsdegradation. Ähnlich verhält sich auch PBT, bei dem Änderungen der Polymerstruktur durch Hydrolyse stattfinden. Bei einer zweiten Klasse von Kunststoffen (PC in Abb. 5, ähnlich auch PP) entsteht bei den Tests zur Langzeitstabilität der RMS-Verbindungen ein Festigkeitsverlust von 20–30%. Dieser ist offensichtlich nicht durch eine Alterung des Kunststoffes bedingt, sondern es handelt sich um einen Fügestelleneffekt. Die dritte und hinsichtlich der Langzeitstabilität für industrielle Anwendungen am besten geeignete Klasse (PPS in Abb. 5) zeichnet sich dadurch aus, dass die hohe Beständigkeit des Grundwerkstoffs bei Temperaturwechseltests und bei Feuchte-Wärme-Auslagerungen auch für RMS-Verbindungen erhalten bleibt. Bei dem hier untersuchten PPS kommt es allerdings im Salzsprühtest zu einem Festigkeitsverlust.

Anbindungsmechanismen

Die Frage nach den Anbindungsmechanismen, die für die Festigkeit der Fügeverbindung verantwortlich sind, ist einerseits für ein grundlegendes Verständnis des RMS-Fügeprozesses zu stellen. Andererseits würde es eine Beantwortung dieser Frage gestatten, gewünschte Effekte, z. B. Festigkeitssteigerungen, durch gezielte Parameteränderungen zu erreichen.

Wesentliche Hinweise zu den festigkeitsbestimmenden Mechanismen

Thermoplastischer Kunststoff	Zugscherfestigkeit [MPa]
Polypropylen (PP)	14
Polycarbonat (PC)	26
Polyamid 6 (PA6)	25
Polybutylenterephthalat (PBT)	20
Polyphenylensulfid (PPS)	32

TABELLE 3: Zugscherfestigkeiten für RMS-Kunststoffverbindungen

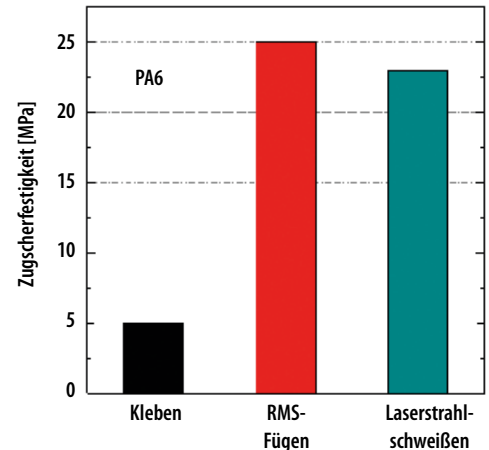


ABBILDUNG 4: Vergleich der erreichten Festigkeiten von Fügeverbindungen ohne Oberflächenvorbehandlung an der Fügestelle am Beispiel von PA6.

können aus mikroskopischen Untersuchungen der RMS-Kunststoffverbindungen gewonnen werden. Im Ergebnis der Charakterisierung von Fügestellen aller fünf untersuchten ther-

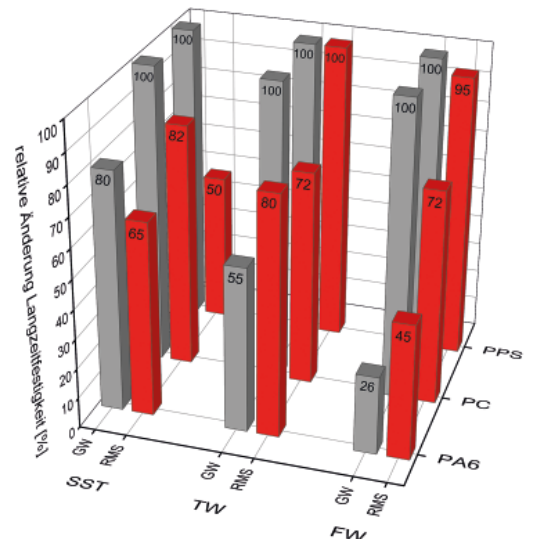


ABBILDUNG 5: Relative Änderung der Festigkeit von RMS-Verbindungen von PA6, PC und PPS; jeweils im Vergleich zum Grundwerkstoff (GW). Ergebnisse für Salzsprühtest SST (1000 h nach VDA 621-415); Temperaturwechseltests TW (-40 °C bis 125 °C; 330 Zyklen für 1000 h) und Feuchte-Wärme-Auslagerungen FW (85 °C bei 85 % Luftfeuchtigkeit für 1500 h).

moplastischen Kunststoffe lässt sich auf die Wirkung von zwei Anbindungsmechanismen schließen. Zum einen wirkt das bereits beschriebene Verschmelzen der Fügepartner an Stellen, an denen sich nach der Reaktion keine RMS-Reste mehr an der Fügestelle befinden und an denen die lokal erreichte Temperatur und der Fügedruck in einem solchen Bereich waren, dass ein Anschmelzen und Wiedererstarren der Fügeflächen erfolgt. In der Abb. 6 oben ist eine Stelle abgebildet, an der dies für über die Hälfte des dargestellten Bereichs erfolgt ist. Eine Erhöhung der Festigkeit der Verbindung wäre über eine Verstärkung dieses Anbindungsmechanismus zu erreichen, wenn es gelingt, einen größeren Anteil an RMS-Resten aus der Fügestelle auszutreiben.

Zum zweiten wird ein Teil der Festigkeit der Fügeverbindung über mechanische Verklammerungen an der Grenzfläche zwischen den RMS-Resten und den angeschmolzenen Oberflächen der Fügepartner erzielt. In der Abb. 6 unten ist zu erkennen, dass die Oberflächen der RMS-Reste Risse aufweisen, in denen unter dem Fügedruck Kunststoffschmelze eingedrungen ist. Vor allen bei Scherbelastungen trägt die darüber erreichte mechanische Verklammerung wesentlich zur Festigkeit der Verbindung bei. Für einen großen

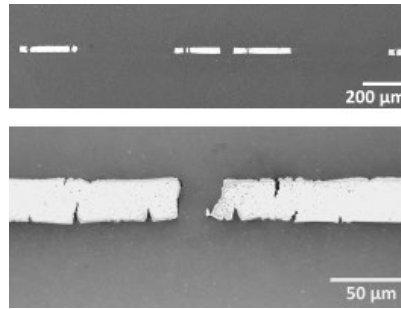


ABBILDUNG 6: Schnitt durch eine RMS-Verbindung von PA6; materialgraphisch präparierter Schliff, lichtmikroskopische Aufnahmen: RMS-Reaktionsprodukte (hell) im Fügebereich der Kunststoffverbindung. Übersicht mit breiten Bereichen verschmolzenen Kunststoffs (oben) und Detail der Anbindung von RMS-Resten an den Kunststoff (unten).

Beitrag dieses Prozesses zur Gesamtfestigkeit müssen der RMS-Typ und der Fügedruck so gewählt werden, dass ein weitverzweigtes Aufreißen der Oberflächen der RMS-Reste eintritt.

Ausblick

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass durch die Nutzung von RMS als direkt in die Fügestelle eingebrachte interne Wärmequelle feste und langzeitstabile Verbindungen thermoplastischer Kunststoffe hergestellt werden können. Gegenüber etablierten Verfahren, wie Kleben und Schweißen, werden

Prozessschritte eingespart sowie unerwünschte Eigenschaftsänderungen der Fügepartner vermieden, und dennoch höhere oder zumindest vergleichbar hohe Festigkeiten erzielt.

Neben der hier beschriebenen Anpassung der RMS-Verbindungstechnologie für das Kunststofffügen, ist die Anwendbarkeit des Verfahrens für Verbindungen von Keramiken, Glas und Silizium am Fraunhofer IWS Dresden bereits demonstriert worden. Von besonderem Interesse für industrielle Anwendungen ist die Herstellung von Verbindungen zwischen Metallen und Kunststoffen. Mit der RMS-Technologie sind beim gegenwärtigen Entwicklungsstand feste Metall-Kunststoff-Fügestellen herstellbar, wenn auf die Metalloberfläche ein Haftvermittler aufgebracht wird. Aktuelle Arbeiten zielen darauf ab, ohne diese Vorbehandlung auszukommen. Entscheidende Fortschritte werden vom Einsatz beloteter RMS und strukturierter Metalloberflächen erwartet.

Förderhinweis

Teile dieser Arbeiten wurden durch das IGF-Vorhaben 19069 BG, sowie 19035 BR/1 der Forschungsvereinigung des Deutschen Verbandes für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V. (DVS) über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- [1] DVS-Berichte Band 294: Forschungsbedarf zum Fügen von Kunststoffen im Leichtbau und im Bereich der erneuerbaren Energien, DVS Media GmbH, Düsseldorf (2012)
- [2] Fachzeitschrift im Fokus: Fügen von Kunststoffen im DVS, DVS Media GmbH, Düsseldorf
- [3] G. Dietrich, M. Rühl, S. Braun, A. Leson: Fraunhofer IWS Dresden, Hochpräzise Fügungen mittels reaktiven Nanometermultischichten, *Vakuum in Forschung und Praxis* 24 (2012) 1, 9-15
- [4] Fraunhofer IWS Dresden, AiF-Verbundprojekt REMTEC: Entwicklung und Herstellung von neuartigen reaktiven Multilayersystemen (RMS) für die Mikroverbindungstechnik durch PVD (2011-2014)
- [5] E. Pflug et. al.: Fabrication of Nanoparticle-Containing Films and Nano Layers for Alloying and Joining, *Adv. Eng. Mat.* 16 (2014)10
- [6] K. Van Der Straeten, C. Engelmann: Fraunhofer ILT Aachen, Laserbasierte Fügeverfahren, *Lightweight Design* (2015)

AUTOREN

Dipl.-Ing. Erik Pflug

Studium Maschinenbau an der TU Dresden, seit 2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden im Bereich PVD- und Nanotechnologie



Dr. Jörg Bretschneider

Studium Physik mit Promotion zur Versetzungsbewegung in kfz. Metallen, seit 2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IWS mit Schwerpunkt Werkstoffcharakterisierung

Dipl.-Ing. Georg Dietrich

Studium Maschinenbau an der TU Dresden, seit 2007 am Fraunhofer Institut für Werkstoff- und

Strahltechnik Dresden als Gruppenleiter im Geschäftsfeld PVD- und Nanotechnologie tätig

Prof. Dr.-Ing. Martina Zimmermann

Studium Maschinenbau an der Universität Siegen mit Promotion zu Schwingfestigkeit geschweißter Al-Konstruktionen, seit 2012 Professur an der TU Dresden und Abteilungsleitung am Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden

Prof. Dr. rer. nat. Andreas Leson

Studium der Physik an der Universität Münster und Promotion zu magnetischen Eigenschaften Seltener Erd-Verbindungen, seit 1997 am Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden mit Leitung des Geschäftsfeldes PVD- und sowie Honorarprofessur an der TU Dresden

Erik Pflug, Fraunhofer IWS, Winterbergstr. 28, D-01277 Dresden, E-Mail: erik.pflug@iws.fraunhofer.de, Tel.: +49 (0) 83391-3524, Fax: +49 (0) 83391-3314, www.iws.fraunhofer.de