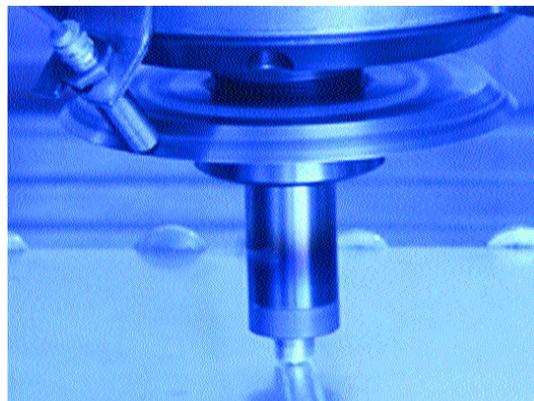


Geesthachter Schweißtage '06
– Festphase-Fügeverfahren –



Editors:
S. Sheikhi
J. dos Santos

Geesthachter Schweißtage '06
– Festphase-Fügeverfahren –

Editors:

Shahram Sheikhi

Jorge dos Santos

(Institut für Werkstofforschung)

Die Berichte der GKSS werden kostenlos abgegeben.
The delivery of the GKSS reports is free of charge.

Anforderungen/Requests:

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH
Bibliothek/Library
Postfach 11 60
D-21494 Geesthacht
Germany

Fax.: (49) 04152/871717

Als Manuskript vervielfältigt.
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.

ISSN 0344-9629

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH · Telefon (04152)87-0
Max-Planck-Straße 1 · D-21502 Geesthacht / Postfach 11 60 · D-21494 Geesthacht

Abstract

The importance of solid state joining processes becomes obvious for materials where huge efforts are required when fusion welding. Consequently this has led to a demand for further research work within this field of joining technologies.

The presentations given at the "Geesthachter Schweißtage '06" demonstrated the state of the art of solid state joining processes.

Welding of similar and dissimilar "modern" materials often requires a suitable joining process. This has been recognised through the contributions subdivided into four blocks. Within the scope of "Geesthachter Schweißtage '06" the basics of solid state joining methods as well as their application in the industry and their fields of research has been highlighted.

The contribution of Prof. Wilden „Neuartige „Lösungswege zum Fügen durch Ausnutzung von Größeneffekten“ clearly demonstrates the latest research work in the field of solid state joining processes.

Even though friction welding and diffusion bonding are well known and established techniques contributions such as

- High speed friction welding of metallic materials,
- Precision friction welding,
- Friction spot welding,
- Diffusion bonding of steel and titanium materials,
- Increasing the functionality of components by diffusion bonding,

emphasises the relevance of these solid state welding processes for today's industry and research topics.

Ultrasonic welding has been discussed as a method to weld different polymers with each other or with metallic materials.

Kurzfassung

Die Bedeutung von Fest-Phase-Fügeverfahren für die Industrie wird deutlich wenn Werkstoffe nicht bzw. mit erhöhtem Aufwand mittels Schmelzschweißprozessen gefügt werden können. Daraus ergibt sich ein Forschungsbedarf auf diesem Sektor. Mit den Vorträgen im Rahmen der Veranstaltung „Geesthachter Schweißtage '06“ konnte das Innovationspotential und die Aktualität von Fügeprozessen in fester Phase gezeigt werden.

Das Fügen artgleicher und artungleicher Werkstoffe bedarf angepasster bzw. geeigneter Fügeverfahren. Diesem wurde mit den in vier Blocks unterteilten Beiträgen Rechnung getragen. Im Rahmen dieser Veranstaltung wurden in den Beiträgen sowohl die Grundlagen der Fügeprozesse in fester Phase (Reib-, Rührreib-, Diffusions-, Magnetimpuls- und Ultraschallschweißen) als auch deren Anwendung bzw. aktuelle Forschungsaktivitäten wiedergegeben.

Die Aktualität der Fügeprozesse in fester Phase wurde insbesondere mit dem Beitrag von Herrn Prof. Wilden „Neuartige „Lösungswege zum Fügen durch Ausnutzung von Größeneffekten“ untermauert.

Sowohl Reib- als auch Diffusionsschweißen zu den lange bekannten Fügeprozessen zählen zeigen u.a. Beiträge wie

- Hochgeschwindigkeitsreibschweißen von metallischen Verbindungen,
- Präzisionsreibschweißen erschließt neue Anwendungsfelder,
- Reibpunktschweißen von Aluminiumlegierungen,
- Anwendungsbeispiele für das Diffusionsschweißen von Stahl- und Titanwerkstoffen
- Strategien zur Erhöhung der Bauteilfunktionalität durch Diffusionsschweißen

die Bedeutung der Prozesse für die heutige Industrie und Forschung.

Das Fügen von meist in Mischbauweise (wie z.B. aus Stahl, Aluminium, Magnesium und Polymere) geplanten Strukturen stellt eine Herausforderung für die Industrie dar. Mit dem Ultraschallprozess konnte ein Lösungswegweg für die Herstellung solcher Mischverbindungen gezeigt werden.

Manuscript received / Manuskripteingang in TDB: 5. November 2006

Geesthachter Schweißtage '06 - Festphase-Fügeverfahren -

Steigende Kraftstoffpreise und begrenzte Ressourcen bilden die Motivation für unsere Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Leichtbaustrukturen mit dem Ziel, damit einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung des Treibstoffverbrauches zu leisten.

Die damit verbundene Substitution konventioneller Werkstoffe bedarf entsprechend angepasster Fügetechnologien. Insbesondere das Fügen von Multi-Material Designs (bestehend z.B. aus Stahl, Aluminium, Magnesium und Polymeren) stellt eine besondere Herausforderung dar. Hierbei stoßen Schmelzschweißverfahren mit ihren komplexen Schmelz- und Erstarrungsphänomenen an ihre Grenzen, weshalb die unter Pressschweißen gruppierten Prozesse eine immer größere Bedeutung erhalten.

Das Institut für Werkstoffforschung bietet mit seinen Kompetenzen in den Gebieten der Fügeverfahren und der Bewertung von Leichtbaustrukturen ideale Voraussetzungen zur Lösung entsprechend anspruchsvoller Fragestellungen. Durch die Verbindung einer hervorragenden Ausstattung an komplexen Experimentiereinrichtungen und -technologien mit anspruchsvollen Grundlagenarbeiten im Bereich der Werkstoffmodellierung und -simulation genießen die Wissenschaftler des Instituts für Werkstoffforschung einen hervorragenden internationalen Ruf.

Die Gruppe Fügetechnologie des Institutes für Werkstoffforschung veranstaltet seit 1999 unter dem Motto „Wissenssteigerung durch Wissensaustausch“ Tagungen und Workshops mit dem Schwerpunkt Rührreibschweißen. Die Forschungsaktivitäten umfassen neben Rührreibschweißen auch Reibauftragschweißen, Friction Hydro Pillar Processing (FHPP) und Rotationsreibschweißen.

Im Rahmen der Geesthachter Schweißtage sollen den Teilnehmern vermittelt werden, wie und wo diese Prozesse bei welchen Anforderungen eingesetzt werden. Zusätzlich werden aktuelle Forschungsergebnisse vorgestellt. Die Vorträge werden von Vertretern aus Industrie und Forschung gegeben. Die „Geesthachter Schweißtage '06“ soll Interessenten den direkten Kontakt zu Anwendern aus der Industrie ermöglichen und möchte sich als Diskussionsforum zwischen Fachleuten verstehen.

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen einen intensiven und gleichermaßen konstruktiven Erfahrungsaustausch mit Fachkollegen aus Forschung und Industrie, verbunden mit einem angenehmen Aufenthalt an unserer Forschungseinrichtung.

Geesthacht, Oktober 2006

Prof. Dr.-Ing. Norbert Huber

Inhalt

		Seite
J. Wilden, J. P. Bergmann, S. Jahn	Neuartige Lösungswege zum Fügen durch Ausnutzung von Größeneffekten	1
S. Sheikhi, J. F. dos Santos	Rührreibschweißen von Aluminiumdruckguss	13
E. Uhlmann, K. Damavandi, A. Rautenstrauch	Hochdynamischer Aufprallvorgang beim Magnetimpulsschweißen	23
H. Horn, A. Kaupat, H. Junge, M. Schlegel	Reibschweißen von Titanaluminiden mit Ventilstahl unter Verwendung einer externen Vorwärmeinrichtung	35
H. Hentschel	Herstellung von metallischen Mischverbindungen mittels des rotatorischen Reibschweißens	41
W. Schnabel	Reibschweißen von Verankerungen im Brückenbau	47
H. Goldau, C. Behrend	Präzisionsreibschweißen erschließt neue Anwendungsfelder	55
F. Luidhardt	Hochgeschwindigkeitsreibschweißen von metallischen Verbindungen	63
G. A. Pinheiro, C. G. Pankiewicz, J. F. dos Santos, K.-U. Kainer	Rotationsreibschweißen von kriechfesten Magnesiumlegierungen	75
A. Ambroziak	Reibschweißen von Sondermetallen unter Flüssigkeitsschutz	89
M. Beyer, J. F. dos Santos	Reibauftragsschweißen metallischer Werkstoffe – Prozess und Anwendungen	99
W. Hauke	Reibschweißen von Gusseisen mit Kugelgraphit	109
H. Knoll, M. Beyer, J.-T. Isakovic	Reibpunktschweißen von Aluminiumlegierungen	119
B. Hennings	Die Ultraschalltechnologie im Automobilbau als Kunststoffverbindungstechnik	135
S. Amancio J. F. dos Santos	Beitrag zur Entwicklung eines neuen Fügeverfahrens für Kunststoff und Leichtbaulegierungen	145
D. Stroh	Ultraschallschweißen von metallischen Werkstoffen	151

J. Wilden, J. P. Bergmann, S. Jahn	Strategien zur Erhöhung der Bauteilfunktionalität durch Diffusionsschweißen	165
U. Dilthey, K. Woeste, J. Holk	Thermisches Fügen metallischer Werkstoffkombinationen mit dem Elektronenstrahl	179
W. Beck, H. Lajain	Anwendungsbeispiele für das Diffusionsschweißen von Stahl- und Titanwerkstoffen	187

Neuartige Lösungswege zum Fügen durch Ausnutzung von Größeneffekten

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. J. Wilden, Dr.-Ing. J. P. Bergmann und Dipl.-Ing. S. Jahn,
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Fertigungstechnik, Ilmenau

Kurzfassung

Die Nanotechnologie wird heute in vielen Industriebereichen als Innovationsmotor betrachtet. Die Effekte die ausgenutzt werden können letztlich darauf zurückgeführt werden, dass Oberflächeneffekte gegenüber Volumeneffekten mit abnehmender Strukturgröße die Eigenschaften dominieren. Ein für die Fügechnik interessanter Größeneffekt ist die Abnahme der Schmelz- und Sintertemperatur mit abnehmender Strukturgröße. So bieten sich Nanopartikel, nanostrukturierte Folien sowie nanostrukturierte Oberflächen für neuartige Füge Technologien an, wobei die übergeordnete Zielsetzung in der Entwicklung „kalter metallurgischer Füge Technologien“ liegt, um feinstrukturierte Werkstoffe ohne thermische Gefügebeeinflussung fügen zu können.

1. Einleitung

Größeneffekte sind in das Zentrum vielfältiger Forschungsaktivitäten gelangt. Die gesamte Nanotechnologie beruht darauf, dass die auftretenden Effekte, Funktionalitäten und Anwendungsoptionen allein aus der Nanoskaligkeit resultieren. Diese Effekte und Möglichkeiten sind überwiegend in dem Verhältnis Oberflächen- zu Volumenatomen und im quantenmechanischen Verhalten der Materiebausteine beim Unterschreiten einer kritischen Größenordnung begründet.

Größeneffekte werden seit vielen Jahren in der Werkstoffentwicklung genutzt, um beispielsweise bei metallischen Werkstoffen die Festigkeit ohne signifikante Abnahme der Duktilität zu steigern. Auf Grund der erhöhten Diffusionsaktivität in derartigen Werkstoffen, führen thermische Fügeprozesse zu Gefügeveränderungen und damit zu einer signifikanten Abnahme der Festigkeit. Diese im Prinzip alte Problematik der Schweiß- und Löttechnik beschränkt heute den das Anwendungspotenzial neuer Werkstoffe.

Als Lösung für diese Problematik müsste eine Füge Technologie entwickelt werden, mit der es gelingt, hochfeste metallurgische Verbindungen bei Temperaturen und Zeiten herzustellen, bei denen keine Gefügeveränderung in den zu fügenden Werkstoffen auftritt. Hier bieten

nanostrukturierte Zusatzwerkstoffe sowie nanostrukturierte Oberflächen den Schlüssel zur Lösung.

2. Größeneffekte

Das Ausnutzen von Größeneffekten beruht darauf, dass mit abnehmender Strukturgröße die physikalischen Eigenschaften von Werkstoffen zunehmend von der Oberflächenenergie und somit den Atomen bzw. Molekülen an der Oberfläche bestimmt werden. Dieses lässt sich mit dem folgenden Beispiel verdeutlichen. Ein Würfel der Kantenlänge von 1 μm enthält ca. 10^9 Moleküle, von denen ungefähr 0,6% an der Oberfläche sitzen. Verkleinert man den Würfel nun um zwei Größenordnungen auf 10 nm enthält er nur noch 1000 Moleküle, deren Oberflächenanteil allerdings auf über 50% gestiegen ist.

Hieraus ergeben sich 3 unterschiedliche Ansätze für die Nanostrukturierung von (Zusatz-) Werkstoffen:

1. Nanopartikel
2. Nanostrukturierte Schichten
3. Nanostrukturierte Oberflächen

die zwar auf den gleichen physikalischen Prinzipien beruhen, jedoch zu unterschiedlichen fúgetechnischen Konzepten genutzt werden können.

Im Folgenden werden zunächst die physikalischen Effekte für die genannten Ansätze diskutiert, bevor hierauf aufbauend fúgetechnische Konzepte abgeleitet werden.

Nanopartikel

Ein für das Fügen ebenfalls interessant Effekt bei Nanopartikeln ist die Verringerung der Schmelztemperatur bei Verringerung der Schmelzpartikelgröße und die Zunahme der Oberflächenenergie. Aus dem Ersten und Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik lässt sich unter Berücksichtigung der Oberflächenenergie ($\sigma \cdot dA/dm$) die Abhängigkeit der Schmelztemperaturverringerng

$$\Delta T = (T_s - T) = \frac{2\sigma \cdot T_s}{\rho \cdot L \cdot r} \sim \frac{1}{r}$$

σ	Spez. Oberflächenenergie	r	Radius schmelzender Partikel
dA/dm	Verhältnis Oberfläche/Masse	ρ	Partikeldichte
T_s	Schmelztemperatur	L	Latente Wärme

vom Partikelradius berechnen. Mit kleiner werdendem Radius steigt die Schmelztemperaturverringering [1]. In Bild 1 ist der Zusammenhang für verschiedene technisch interessante Elemente graphisch dargestellt.

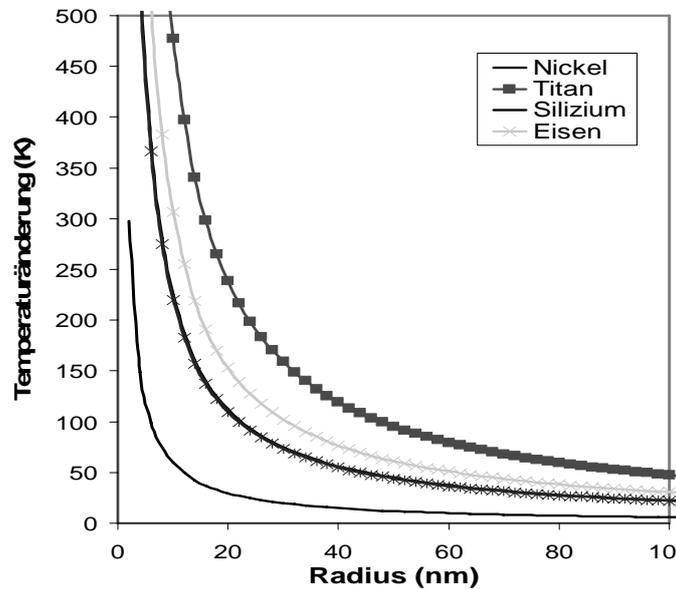


Bild 1: Absenkung der Schmelztemperatur als Funktion des Partikelradius für Ni, Ti, Si, Fe

Ausgenutzt wird dieser Effekt zum Beispiel beim Sintern von Körpern aus ultrafeinen Partikeln, da mit einer Verringerung der Schmelztemperatur auch eine Verringerung der Sintertemperatur einhergeht. Bei einer geringeren Sintertemperatur sinkt auch die Diffusionsgeschwindigkeit, wodurch das Kornwachstum im gesinterten Körper gehemmt wird und somit eine Verbesserung von mechanischen Eigenschaften wie Härte und Zähigkeit erreicht werden kann. Des Weiteren hängt die Schmelztemperatur und somit auch die Korngröße des gesinterten Körpers stark vom Druck ab. Aus einer Erhöhung des Drucks resultiert durch Gleiten der Korngrenzen und/oder Klettern von Versetzungen eine höhere Verdichtung der Pulverpackung ohne signifikantes Kornwachstum (Bild 2) [2, 3].

Nanostrukturierte Schichten

Im Bereich dünner Schichten kann analog zur Partikelgrößenreduktion durch Verringerung der Dicke ebenfalls eine Schmelzpunktniedrigung erreicht werden. Gegenüber ausgedehnten Körpern sind zwei Besonderheiten zu erwarten:

1. Auftreten starker Unterkühlung von Metallschmelzen;
2. Erniedrigung der Schmelztemperatur in Abhängigkeit von der Teilchengröße, die sich ihrerseits mit der Schichtdicke ändern wird.

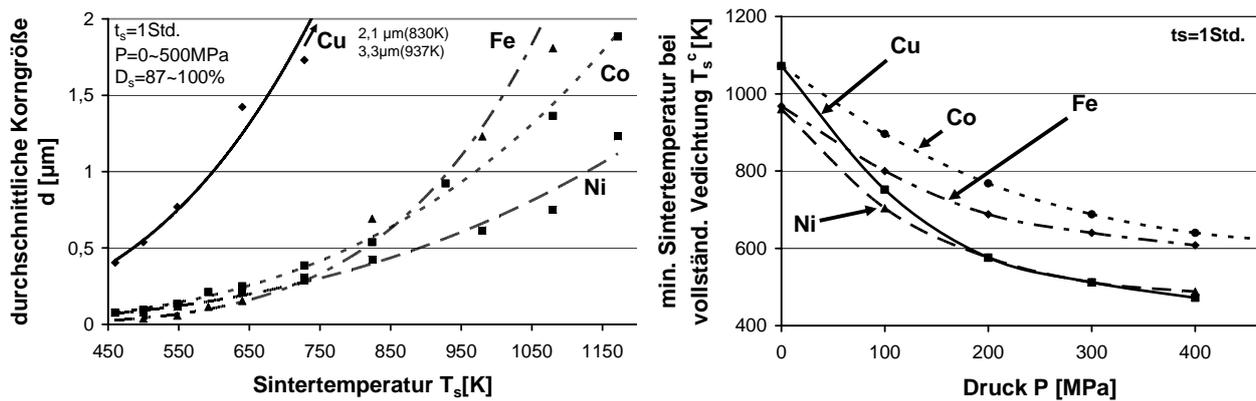


Bild 2: Abhängigkeit der Korngröße von der Sinteremperatur und Abhängigkeit der Sinteremperatur vom Druck für verschiedene Metalle (D_s -Sinterdichte, t_s -Sinterzeit) [2]

Untersuchungen zur Unterkühlung mit Bestimmung von Grenzflächenspannungen und der Einfluss von Fremdkeimen auf die Unterkühlung wurden von Turnbull und Wegener durchgeführt [4, 5]. Die Grenzflächenspannung bewirkt, dass es eine kritische Keimgröße gibt, unterhalb derer sich beim Wiederaufschmelzen eines festen Aggregats die freie Energie (Gibbs-Energie) des Systems erniedrigt (Bild 3). Wenn das Material nun von vornherein in Form kleiner getrennter Teilchen vorliegt, was bei dünnen Schichten häufig der Fall ist, so ist nach thermodynamischen Überlegungen eine starke Schmelzpunkterniedrigung für diese Teilchen zu erwarten. Da diese kleinen Teilchen wegen des durch ihre Isolierung in der Schicht behinderten Materialtransportes auch dann nicht auf die kritische Größe anwachsen können, wenn sie zufällig geordnete Bereiche bilden, bleiben sie stabil im flüssigen Zustand, bis sie selbst die kritische Keimgröße überschritten haben. Nach Frenkel [6] besteht zwischen Schmelztemperatur und Dicke der Schicht der exponentielle Zusammenhang

$$T_s(d) = T_s \cdot e^{-\frac{\sigma v}{Ld}}$$

T_s	Schmelztemperatur	d	Schichtdicke
σ	Oberflächenspannung	v	Molvolumen in festem Zustand
L	Schmelzwärme		

Nach dieser Gleichung sollte die Schmelzpunkterniedrigung wegen der Größe der Grenzflächenenergie für kleine Teilchen beträchtliche Werte annehmen. Auf Grund der stark idealisierten Voraussetzungen der Theorie ist eine quantitative Übereinstimmung mit dem Experiment nur bedingt zu erwarten [7]. Die experimentell bestimmte Schmelztemperatur als Funktion der Schichtdicke ist für Cu und Ag in Bild 3/links dargestellt.

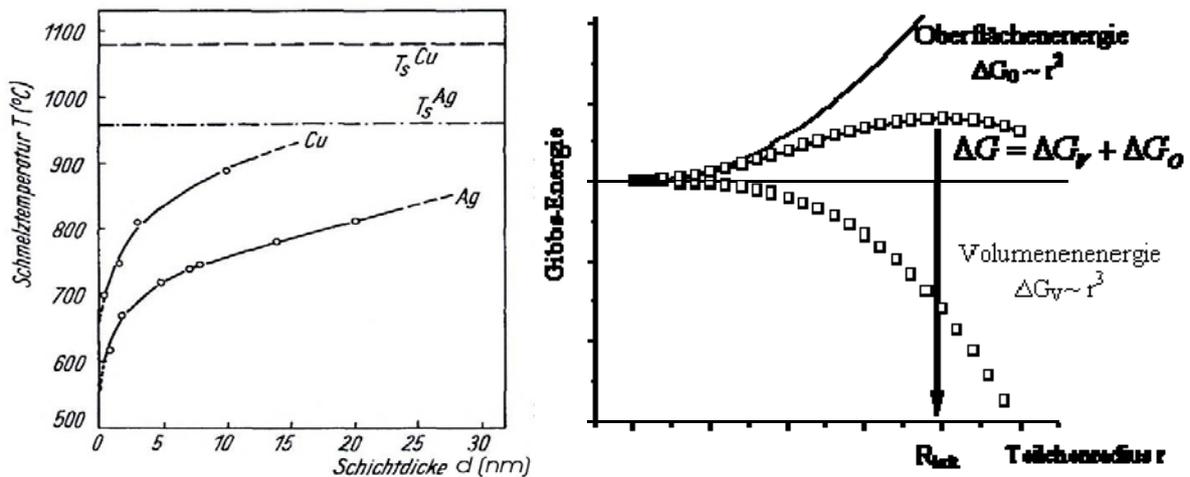


Bild 3: Schmelztemperaturabhängigkeit von der Schichtdicke [7], Abhängigkeit der freien Energie vom Teilchenradius

Nanostrukturierte Oberflächen

Analog zur Verringerung der Schmelztemperatur und damit einer Erhöhung der Diffusionsgeschwindigkeit bei abnehmendem Partikelradius bzw. abnehmender Schichtdicke nimmt auch lokal die Schmelztemperatur an einer nanoskaligen Oberflächentopographie ab.

3. Fügetechnische Konzepte unter Ausnutzung von Größeneffekten

Aufbauend auf den dargestellten Grundlagen zum Einfluss der Partikelgröße, Schichtdicke und Oberflächenstruktur auf die physikalischen Werkstoffeigenschaften werden im Folgenden hieraus ableitbare fügetechnische Konzepte diskutiert.

Ausnutzen des Partikelgrößeneffektes

Eine neue Fügetechnologie, bei der die Schmelzpunktabenkung durch Verringerung des Partikeldurchmessers ausgenutzt wird, könnte schematisch wie folgt ablaufen: Nanopartikel werden zwischen zwei zu fügende Bauteiloberflächen gebracht. Die Verbindung zwischen den Bauteilen erfolgt dann durch Erhöhen des Druckes auf die Nanopartikel in der Fügefläche und eine „mäßige“ Temperaturerhöhung. Zum Aufbringen der Partikel stellt der Einsatz metallorganischer Nanopartikel, bei denen die Umhüllung eines jeden Partikels mit einer Passivierungsschicht und einer organischen Hülle möglich ist, einen Lösungsansatz dar. Nach dem Aufsetzen des zweiten Fügepartners und Zusammenpressen der Bauteile kann die organische Hülle sowie die Passivierungsschicht verdampft werden, wobei die Nanopartikel durch Nanoadhäsion in ihrer vorgegeben Anordnung auf dem Substrat verbleiben (Bild 4) [8, 9].

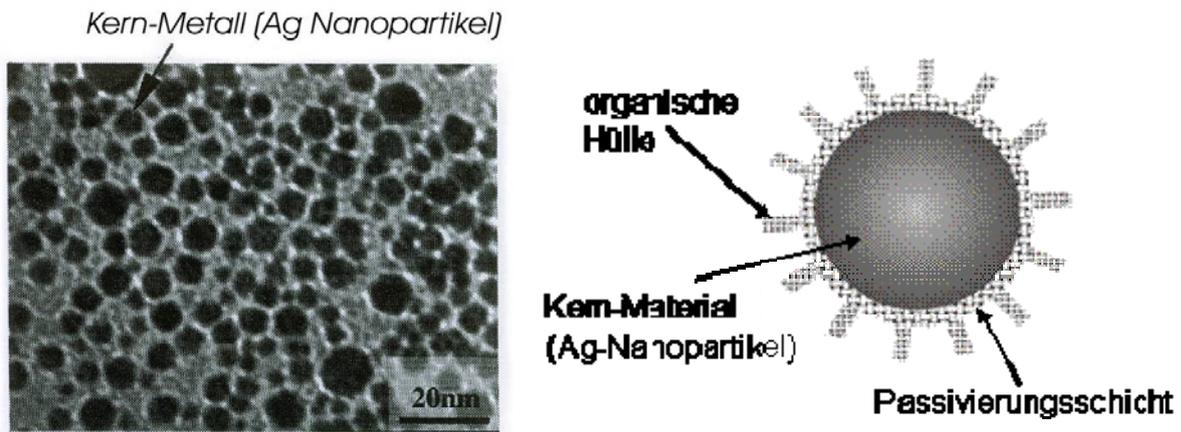


Bild 4: Organischer Binder versetzt mit Ag-Nanopartikeln [8]

Gefügt wurden beispielsweise zwei Kupferelemente mit einer Ag-Nanopartikel-Paste. Das Verdampfen des Binders erfolgte bei ca. 210°C, das eigentliche (Sinter-) Fügen erfolgte bei ca. 300°C. Es konnte bei Verwendung von Nanopartikeln im Vergleich zur Verwendung von „feinen“ Partikeln (Durchmesser um 100 nm) eine drastische Erhöhung der ertragbaren Scherkraft und damit eine höhere Festigkeit der Verbindung festgestellt werden (Bild 5).

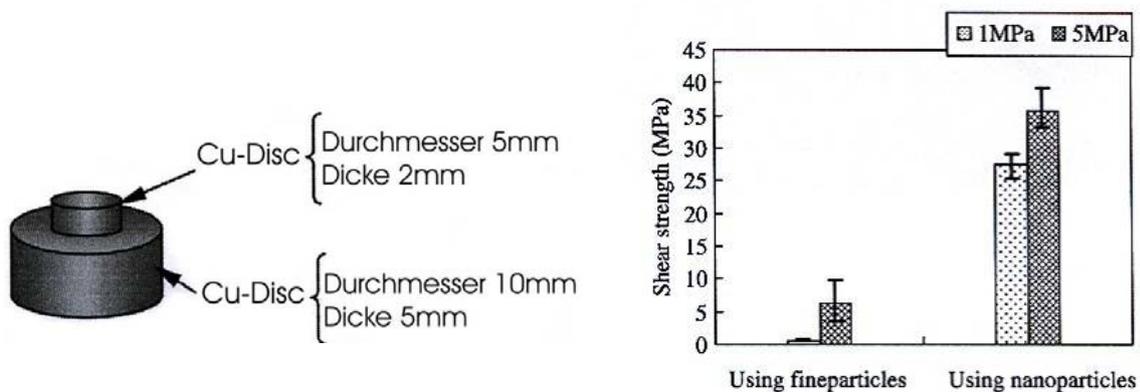


Bild 5: Mit „Ag-Nanopaste“ gefügte Kupferelemente und erreichte Scherspannung [8]

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass vermutlich chemische Reaktionen bei der Verdampfung des organischen Binders ein Entfernen der Oxidschicht des Kupfers zur Folge haben. Eine reine Kupferoberfläche erleichtert die Bindung mit den Ag-Partikeln, so dass dieser Effekt ebenfalls eine Erhöhung der Festigkeit mit sich bringt (Bild 6) [8].

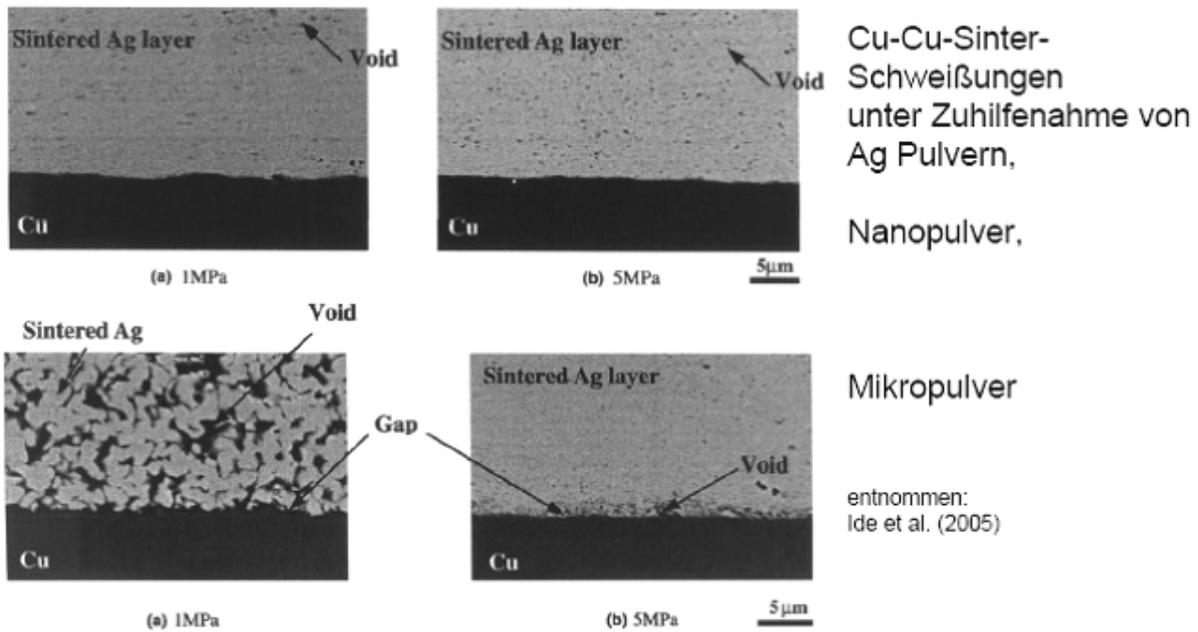


Bild 6: Gefüge mittels Ag-Pulvern „Sintergeschweißer“ Cu-Cu Verbindungen [8]

Ausnutzen des Schichtdickeneffektes

Technisch nutzbar ist die Schmelztemperaturniedrigung mit abnehmender Schichtdicke zum Fügen mit so genannten Nanofolien®. Nanofolien bestehen aus einem Multilagensystem, bei dem eine Vielzahl von 25 bis 90 nm dicken Schichten aus beispielsweise Ni und Ti (oder Al/Ti, Ni/Si, Nb/Si) alternierend aufgetragen sind (Bild 7). Die Folien werden zwischen zwei zu fügende Bauteile, die aus völlig unterschiedlichen Materialien bestehen können (z.B. SiC und Ti-6-4), gebracht. Durch die negative Bindungsenthalpie der in einer selbstfortschreitenden exothermen Reaktion entstehenden intermetallischen Al_xNi_y -Phasen wird die zum Fügen erforderliche Wärme direkt in der Fügezone erzeugt. Die exotherme Reaktion kann durch eine elektrische, mechanische, optische oder thermische Zündung gestartet werden. Infolge der Erwärmung werden zusätzlich aufgebraute Lotschichten zwischen Bauteil und Nanofolie aufgeschmolzen. Durch die Variation von Dicke und Zusammensetzung der Folien bzw. Schichten kann die Temperatur, die Geschwindigkeit und die absolute Energie des Fügeprozesses gesteuert werden. Auf Grund der hohen Prozessgeschwindigkeit und der niedrigen Wärmekapazität in der Fügezone bleiben die Bauteile „kalt“. Der Wärmeeinfluss und die im Bauteil entstehenden Eigenspannungen sind sehr gering. Weiterhin kann das Fügen ohne Flussmittel und bei Raumtemperatur stattfinden. Ein Problem für die breite Anwendung ist die aufwendige Herstellung der Nanofolien [10, 11, 12].

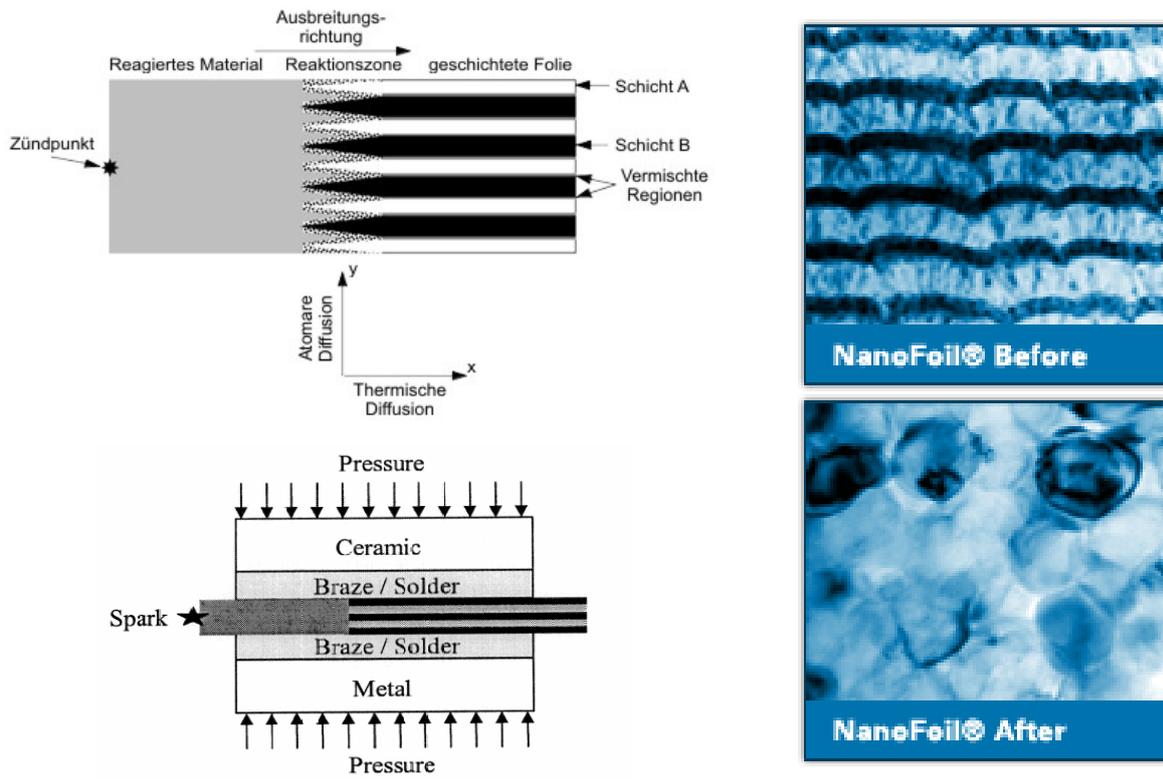


Bild 7: Fügen mit nanostrukturierten Folien [10]

Einfluss der Oberflächenstrukturierung

Aus dem Einfluss der Nanostrukturierung von Oberflächen auf die Schmelz-/Sinter-temperatur resultiert eine weitere Strategie zum Fügen. Unter Zuhilfenahme von Nanoeffekten ist das Verbinden von Bauteilen mit nanostrukturierten Oberflächen bei erhöhter Anpresskraft und leicht erhöhter Temperatur möglich. Zur Oberflächenbehandlung und zur Erzeugung einer Nanotopographie können beispielsweise Breitstrahlionenquellen (Ionenstrahlätzen) oder aber auch Excimer-Laser (Laserablation) eingesetzt werden. Der Beschuss von Oberflächen mit Ionen ruft vielfältige Effekte hervor. Diese Vielfältigkeit beruht vor allem auf einer sehr breiten nutzbaren Skala der kinetischen Energie der Ionen von einigen 10 Elektronenvolt (eV) bis zu einigen 100 Megaelektronenvolt (10^9 eV) sowie der nahezu unbegrenzten Auswahl an Beschussteilchen, von Atomionen (Wasserstoff bis Uran) über Molekülionen (z.B. H_2^+ und N_2^+) bis hin zu Clustern locker gebundener Atome (Bild 8). Neben der Übertragung von Energie und Impuls auf den Festkörper lassen sich diese Beschusstechniken darüber hinaus mit der Wirkung chemisch aktiver Spezies zur Eigenschaftsmodifizierung der Oberfläche oder des Volumens im Bereich der Eindringtiefe der Beschussionen zu einer noch größeren Anwendungsvielfalt kombinieren.

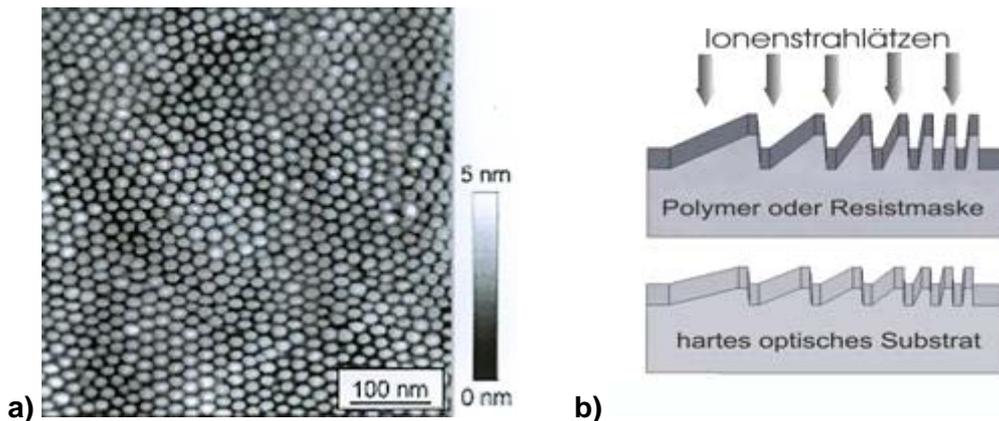


Bild 8: a) AFM-Aufnahme von Dots aus Selbstorganisationseffekten, hergestellt durch Ar^+ -Ionenbombardement bei fast streifendem Einfall und simultaner Probenrotation [13].
b) Prozessschema Ionenstrahlätzen nach [13]

Eine sich daraus ergebende und für den Bereich des Fügens interessante Technologie ist das so genannte Waferdirektbonds. Darunter versteht man das Verbinden von Festkörpern mit sehr glatten, chemisch sauberen und partikelfreien Oberflächen. Im ersten Schritt werden dafür die Bondflächen mit einer Breitstrahlionenquelle niedriger Ionenenergie gereinigt. Hier werden vorzugsweise Wasserstoffionen verwendet, die vor allem natürliche Oxide und Kohlenstoffbeläge entfernen und dabei die Kristallstruktur bzw. die Glattheit der Oberfläche nur minimal beeinflussen. Im zweiten Schritt werden die gereinigten Flächen ausgerichtet aufeinander gelegt. Durch leichten Druck vollzieht sich der Bondvorgang, dessen Bindungsstärke noch durch eine anschließende thermische Nachbehandlung erhöht werden kann. Durch die niedrigen Prozesstemperaturen und geringen Drücke können durch dieses Verfahren bereits prozessierte Wafer (z.B. epitaktische Schichtsysteme, Dotierungen und Strukturierungen) gefügt werden [13]. Im Gegensatz zum Beschuss mit Ionenstrahlen ist die Oberflächenstrukturierung mit Photonen aus einem Excimer-Laser durch die vorgegebene Energie und Wellenlänge weit weniger vielfältig. Dennoch ist es möglich, Oberflächen im Nanobereich so zu aktivieren, dass eine anschließende Diffusionsschweißung zu belastbaren Verbindungen ohne Verwendung konventioneller Aktivlote oder Kleber führt. Emmel et al. hat zum Beispiel nachgewiesen, dass es mit einem XeCl-Excimerlaser möglich ist, die Oberfläche einer SiC-Keramik so vor zu behandeln, dass ein Verbund mit AlMgSi1 durch anschließendes Diffusionsschweißen ermöglicht wird. Scherversuche belegten, dass die „aktivierte“ Schweißung eine deutlich höhere Festigkeit als beispielsweise eine Klebung erzielt (Bild 9) [14].

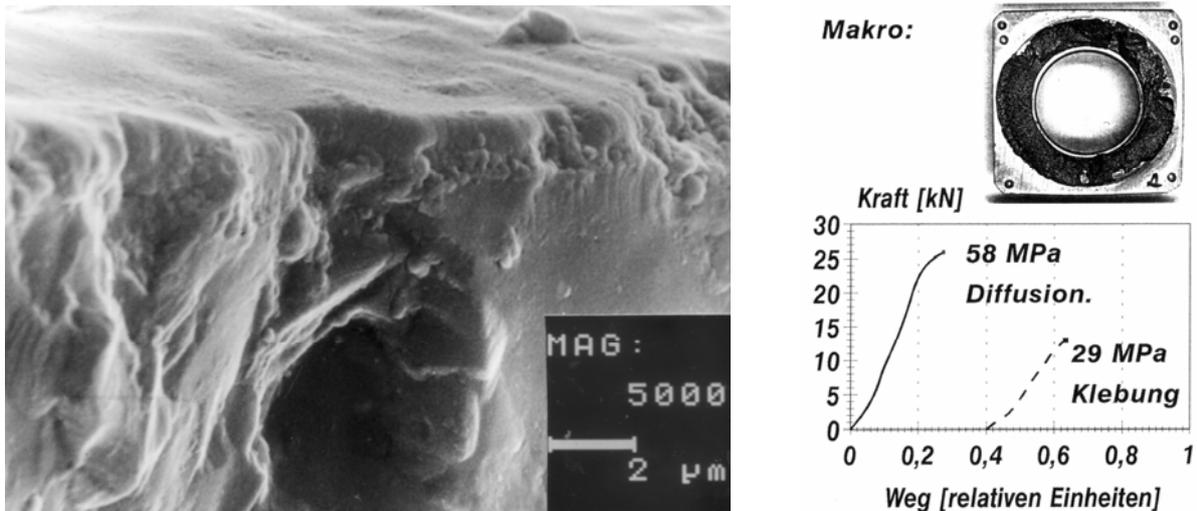


Bild 9: Bruchfläche von behandeltem SiC und Diffusionsfüugung von SiSiC und AlMgSi1 nach dem Scherversuch [14]

4. Zusammenfassung

Die Abnahme von Strukturgrößen wie Partikeldurchmesser, Schichtdicke oder Oberflächentopographie führt zu einer Abnahme der Schmelz- und Sintertemperatur. Aufbauend auf den grundlegenden physikalischen Zusammenhängen können neue Fügeverfahren entwickelt werden, bei denen die Zusatzwerkstoffe entweder in Form nanoskaliger Partikel oder nanostrukturierter Schichtsysteme vorliegen. Auch die Nanostrukturierung von Oberflächen entweder von deren Topographie oder Gefügestruktur kann für neue Fügeverfahren genutzt werden. Die vorgestellten Konzepte lassen die Vision einer „kalten metallurgischen Fügeverfahren“ als realisierbar erscheinen. Für deren Entwicklung stehen wir derzeit am Beginn der Grundlagenforschung und vereinzelt auch schon der Anwendungsentwicklung.

5. Danksagung

Die vorgestellten Fügeverfahren Konzepte entstanden im Rahmen einer aus dem Forschungsfonds des DVS geförderten Studie. Für diese Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

6. Literatur

- [1] Takagi, M.; Electron-diffraction Study of Liquid-Solid Transition of Thin Metal Films; J. of Phys. Soc. Jap., 9, No.8 (1954)
- [2] Hayashi, K.; Hiroyuki, E.; Pressure Sintering of Iron, Cobalt, Nickel and Copper Ultrafine Powders and the Crystal Grain Size and Hardness of the Compacts; Mat. Trans., JIM, 30, No.11 925-931 (1989)

- [3] Smith, T.R.; Vecchio, K.S.; Synthesis and mechanical Properties of nanoscale mechanically-milled NiAl; *Nanostructured Materials* 5, No.1, 11-23 (1995)
- [4] Turnbull, D.; Cech, R.E.; *J. appl. Phys.* 21, 804 und 1022 (1950)
- [5] Wegener, H.; *Z. Phys.* 139, 464 (1954)
- [6] Frenkel, J.I.; *Kinetische Theorie der Flüssigkeiten*, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin (1957)
- [7] Gladkirch, N.T.; Niedermayer, R.; Spiegel, K.; Nachweis großer Schmelzpunkterniedrigung bei dünnen Metallschichten, *phys. Stat. Sol.* 15, 181 (1966)
- [8] Ide, E.; Angata, S.; Hirose, A.; Kobayashi, K.F.; Metal-metal bonding process using Ag metallo-organic nanoparticles; *Acta Mat.* 53, 2385-2393 (2005)
- [9] Nagasawa, H.; Maruyama, M.; Komatsu, T.; Isoda, S.; Kobayashi, T.; Physical Characteristics of Stabilized Silver Nanoparticles Formed Using a New Thermal-Decomposition Method; *phys. stat. sol. (a)* 191, No.1, 67-76 (2002)
- [10] Duckham, A.; Brown, M.; Besnoin, E.; van Heerden, D.; Knio O.M.; Weihs, T.P.; Metallic Bonding of Ceramic Amor using Reactive Multilayer Foils; *Reactive NanoTechnologies*, Hunt Valley MD 21030; <http://www.rntfoil.com/>, (2004)
- [11] Wang, J.; Duckham, A.; Spey, S.J.; Besnoin, E.; Knio O.M.; Powers, M.; Whitener, M.; Weihs, T.P.; Room-temperature soldering with nanostructured foils; *Appl. Phys. Lett.* 83, No.19, 3987-3989 (2003)
- [12] Wang, J.; Duckham, A.; Spey, S.J.; Besnoin, E.; Knio O.M.; Weihs, T.P.; Joining of stainless-steel specimens with nanostructured Al/Ni foils; *J. of Appl. Phys.* 95, No.1, 248-256 (2004)
- [13] Schindler, A.; Hänsel, T.; Frost, F.; Fechner, R.; Razek, N.; Ionenstrahlvorbehandlung für die Nano-Oberflächentechnik, Tagungsband Workshop Reinigung in der Nano-Oberflächentechnik (2003)
- [14] Emmel, A.; Großmann, J.; Schubert, E.; Bergmann, H.W.; Erzeugung neuer Oberflächenzustände an SiC-Werkstoffen mit dem Excimerlaser: Mechanismus – Eigenschaften – Anwendung; *Laser und Optoelektronik* 26(6), 34-39 (1994)

Rührreibschweißen von Aluminium Druckguss

Dr.-Ing. Shahram Sheikhi, Dr. Jorge F. dos Santos, Institut für Werkstoffforschung ,GKSS-Forschungszentrum GmbH, Geesthacht

Kurzfassung

Das Rührreibschweißen (Friction Stir Welding – FSW) stellt einen innovativen Fertigungsprozess zum Fügen von Leichtmetallen insbesondere von Aluminiumlegierungen dar. Die Herstellung von Aluminiumverbindungen mit konventionellen Schmelzschweißverfahren erfüllt nicht immer und nicht bei jeder Legierung die von der Industrie gestellten Qualitätsanforderungen. Das Rührreibschweißen stellt eine Alternative zu den Schmelzschweißverfahren dar. Dies ist insbesondere auf die guten mechanischen Eigenschaften der Schweißnähte, die Reproduzierbarkeit und die Robustheit des Verfahrens zurückzuführen. Im Rahmen dieser Arbeit werden artungleiche Stumpfstoße gleicher Blechdicke mit den Legierungen AlMg₃, AlMgSi_{0,5} und GD AlSi₁₀Mg hergestellt. Die Blechdicke der eingesetzten Fügepartner beträgt 2 mm. Die Gefügeausbildung als Folge der eingebrachten Streckenenergie wird beschrieben. Die mechanischen Eigenschaften der Schweißnähte werden diskutiert.

1. Grundlagen

Beim FSW-Verfahren handelt es sich um ein speziell zum Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen geeignetes Fügeverfahren. Friction Stir Welding (FSW) wurde von TWI (The Welding Institute, Cambridge) entwickelt und 1991 patentiert [1].

Das Reibrührschweißen erfolgt bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes der Fügepartner. Die Werkstoffe schmelzen nicht, sondern werden lediglich plastifiziert und im Nahtbereich regelrecht ineinander verrührt. Da kein Schmelzbad entsteht, ist das Verfahren lageunabhängig. Das Reibrührschweißen zeichnet sich insbesondere durch reproduzierbare und gute Schweißnahteigenschaften aus. Die Vorteile gegenüber herkömmlichen Schweißverfahren resultieren zum einen aus dem geringen Wärmeeintrag sowie der einfachen Prozesskontrolle / -steuerung. Vorteile gegenüber den herkömmlichen Schmelzschweißverfahren sind weiterhin ein geringer Verzug, keine Poren- und Rissbildung und keine Entmischung der Legierungsbestandteile. Eine spezielle Behandlung der Fügeanten vor dem Schweißen ist nicht notwendig. Es sind weder Zusatzwerkstoffe noch Schutzgase erforderlich, auch muss kein speziell geschultes Personal eingesetzt werden, was zu sehr geringen Betriebskosten führt. Beim Reibrührschweißen wird ein

zylinderförmiges Werkzeug (siehe Abbildung1-a) eingesetzt. Das Werkzeug besteht aus einem Stift (Pin), welches in der Werkzeugschulter befestigt wird und nahezu verschleißfrei funktioniert.

Zum Schweißen wird gemäß Abbildung1-b das rotierende Werkzeug langsam in den Fügebereich eingebracht. Infolge der Rotationsbewegung des Werkzeuges sowie des aufgetragenen Druckes wird zwischen Schulter und Blechen Reibungswärme erzeugt, die zum Plastifizieren des Materials unter der Schulter führt. Nach ausreichender Plastifizierung wird das rotierende Werkzeug unter einer bestimmten Vorschubgeschwindigkeit (Schweißgeschwindigkeit) entlang des zu schweißenden Bereiches geführt.

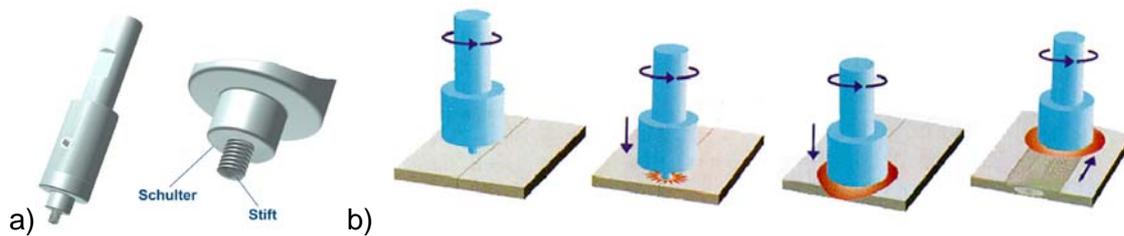


Abbildung 1: a) Werkzeug für das Reibrührschweißen; b) Prozessablauf beim Schweißen

Die Rotationsrichtung und die Translationsbewegung des Werkzeuges überlagern sich. Auf der einen Seite der Fügelinie sind die Bewegungsvektoren gleichgerichtet und auf der anderen Seite wirken sie entgegengesetzt zu einander. Die Seite mit gleicher Richtung der Rotations- und der Translationsbewegung wird mit Advancing-Seite bezeichnet. Die Retreating-Seite beschreibt die Seite mit entgegengesetzter Richtung der Rotations- und der Translationsbewegung.

Das charakteristische Bild einer mit FSW produzierten Naht ist in Abbildung 2 dargestellt.

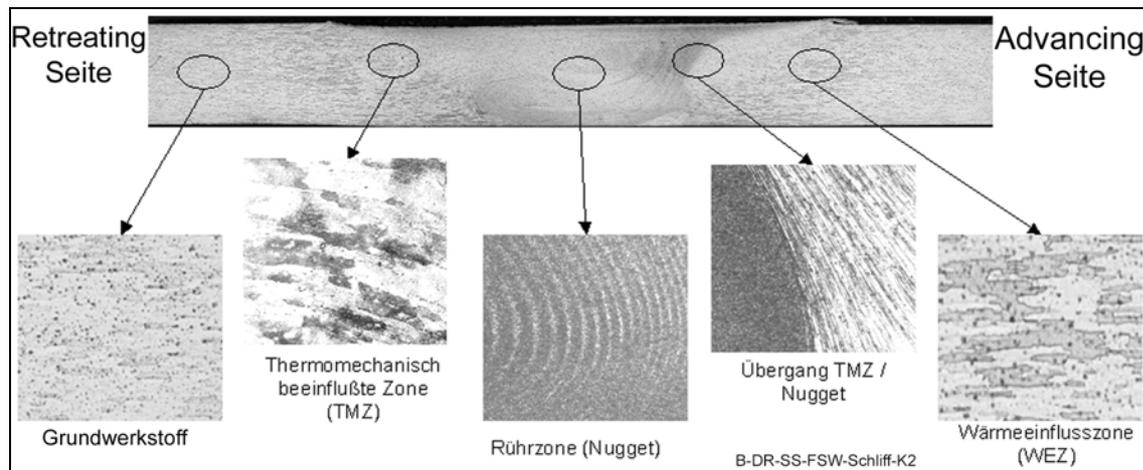


Abbildung 2: Gefüge der FSW-Naht

In der Mitte der Naht liegt der Nugget oder Rührzone mit einer zwiebelartigen Struktur. Dieser Bereich entsteht durch den hohen Verformungsgrad im Bereich des Stiftes sowie der Reibungstemperatur. Die Form des Nuggets ist abhängig von den Schweißparametern. Das Gefüge in diesem Bereich ist feinkörnig ca. \varnothing 2-5 μm [2]. Die zwiebelförmige Struktur entsteht dabei durch die Rotation und den Vorschub des Werkzeuges. Der thermomechanisch beeinflusste Bereich schließt sich am Rand des Nuggets an. Das Material ist in diesem Bereich aufgrund des Rühreffektes und des Temperaturfeldes thermisch beeinflusst und plastisch verformt [2]. Die Wärmeeinflusszone schließt an diesem Bereich an. Dieser Bereich ist nicht deformiert, erfährt jedoch aufgrund der Temperatureinwirkung eine Veränderung des Gefüges infolge von Ausscheidungen. Infolge der unterschiedlichen Bereiche in der Schweißnaht variieren die mechanischen Kennwerte quer zur Naht. So ist die Festigkeit im Bereich des Nuggets innerhalb der Schweißnaht am höchsten, in Einzelfällen (5xxx-Legierungen die nicht kalt verfestigt sind) kann eine höhere Festigkeit als im Grundwerkstoff erreicht werden. FSW zeichnet sich durch reproduzierbare und gute Schweißnahteigenschaften aus. Die Vorteile gegenüber herkömmlichen Schweißverfahren resultieren zum einen aus dem geringen Wärmeeintrag und zum anderen daraus, dass jegliche Aluminiumlegierungen mit diesem Verfahren geschweißt werden können.

Mit dem Rührreißschweißen sind sämtliche artgleiche und artungleiche Aluminiumlegierungen schweißbar. Diese können in verschiedenen Nahtkonfigurationen (wie z.B. Stumpfstoß, Stumpfstoß/Parallelstoß, Überlappstoß, Parallelstoß, T-Stöße und Kehlnaht) hergestellt werden [3].

2. Anlagentechnik

Bei GKSS erfolgt das Rührreißschweißen auf dem Robotersystem Tricept 805 mit einer im Haus entwickelten Schweißeinheit. Der Tricept 805 ist mit einer Siemens Sinumerik 840D CNC-Steuerung ausgerüstet. Der spezielle Aufbau des Roboters sorgt für eine ausreichende Steifigkeit, um die erforderlichen Prozesskräfte in nahezu beliebiger Orientierung im Arbeitsraum des Roboters aufbringen zu können. Gleichzeitig bietet die fünfsichtige Parallelkinematik die erforderliche Flexibilität für unterschiedliche Fügeaufgaben. Hierdurch werden die verschiedenen Orientierungen des Schweißwerkzeuges für die Herstellung von komplizierten Nahtkonfigurationen für Aufgaben aus Luftfahrzeug- und Automobilbau durch den Roboter realisiert.

3. Material

Im folgenden sind Beispiele für artungleiche Rührreibschweißnähte dargestellt. Die Schweißversuche wurden mit den folgenden Werkstoffen gemäß Tabelle 1 durchgeführt. Dabei wurden artungleiche Stumpfstöße gleicher Blechdicke mit den Legierungen AlMg3, AlMgSi0,5 / 6060-T4 und GD AlSi10Mg hergestellt. Die Blechdicke der eingesetzten Fügepartner beträgt 2 mm.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe

Legierung	Zusammensetzung in Gewichts- %									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
AlMg3 / 5754-O	0,189	0,301	0,053	0,251	2,66	0,056	---	0,033	0,033	Res t
AlMgSi0.5 / 6060-T4	0.3- 0.6	0.1- 0.3	0.1	0.1	0.35- 0.6	0.05	---	0.15	0.1	Res t
GD AlSi10Mg	9.0- 11.0	1.0	1.0	0.001- 0.4	0.00- 0.5	---	0.1	0.15	---	Res t

Die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Grundwerkstoffe variiert gemäß Tabelle 2 sehr.

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe

Mechanische Eigenschaften	Legierung		
	AlMg3 / 5754-O	AlMgSi0.5 / 6060-T4	GD AlSi10Mg
R _{p0,2} [MPa]	120	90	150
R _m [MPa]	220	185	288
A [%]	26	27	6
Vickershärte HV0,2	59	62	88
Biegewinkel [°]	160	160	30

Alle Schweißnähte wurden mit einem Werkzeug bestehend aus einem Ø 13 mm konkaven Schulter- und einem Ø 5 mm Stiftbereich hergestellt.

4. Ergebnisse

Die Entwicklung einer FSW-Verbindung mit abnehmender Streckenenergie bei einer Drehzahl von 2000 min^{-1} , ist am Beispiel AlMg3 - DGAISI10Mg in Abbildung 3 dargestellt. Bei dieser Werkstoffkombination wurde ein spröder Aluminiumdruckguss mit einer nicht aushärtbaren, gewalzten Aluminiumlegierungen gefügt. Bei kleinen Vorschüben und dementsprechend großer Wärmeeinbringung zeigt sich deutlich die Struktur des Nugget. Mit abnehmender Streckenenergie verschlechtert sich optisch die Durchmischung des Kernbereiches und führt zu Fehlern in der Schweißnaht. Die Streckenenergie q_s [J/mm] wird als Quotient des theoretischen Energiestroms q [W] und der Schweißgeschwindigkeit v_{Sch} [mm/s] ermittelt [4].

$$q_s = (4/3 \times \pi \times \mu \times F_z \times N \times r_{\text{Sch}}) / v_{\text{Sch}} \text{ [J/mm]} \quad \text{Gleichung 1}$$

Der Energiestrom q [W] ergibt sich aus dem Reibungskoeffizienten $\mu = 0,2$, der Schweißkraft F_z [N], der Drehzahl N [s^{-1}] und dem Schulterradius r_{Sch} [m]. Der Reibungskoeffizient verändert sich mit dem Plastifizierungsgrad bzw. mit der Erhöhung der Temperatur [5]. Die Erhöhung der Schweißparameter (Kraft und Drehzahl) führt zu einer Erhöhung des Energiestroms. Langsamere Schweißgeschwindigkeiten führen zu einer Erhöhung der Streckenenergie und umgekehrt. Es muss betont werden, dass die Gleichung 1 die Streckenenergie nicht richtig beschreiben kann, da die Wärmeentwicklung durch die Verformung des Gefüges nicht berücksichtigt wird.

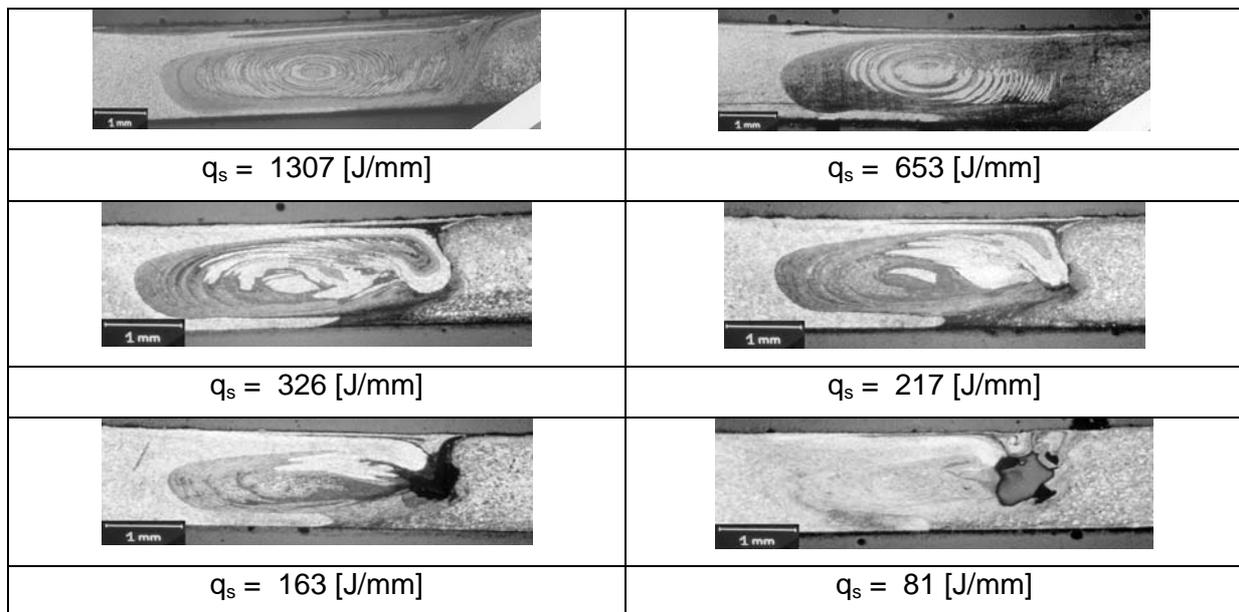


Abbildung 3: Entstehung von Bindefehler in Abhängigkeit von der Streckenenergie

Der Querschliff in Abbildung 4 stellt eine Stumpfstoßverbindung der Legierungen AlMg 3 und AlMgSi_{0,5} (von links nach rechts) dar. Durch die unterschiedliche Ätzung der Werkstoffe ist der Materialverbund in der Rührzone zu erkennen.

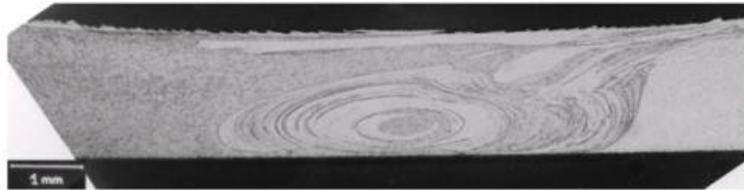


Abbildung 4: Makroschliff FSW-Schweißverbindung AlMg3 / AlMgSi_{0,5}

Die Schweißnaht einer rührreibgeschweißten Druckgusslegierung GDAISi10Mg mit der Legierung AlMgSi_{0,5} ist in Abbildung 5 und mit der Legierung AlMg3 in Abbildung 6 dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Materialpaarung in Abbildung 6 zu einer besseren Mischung der Fügepartner in der Rührzone führt.



Abbildung 5: Makroschliff FSW-Schweißverbindung GDAISi10Mg / AlMgSi_{0,5}

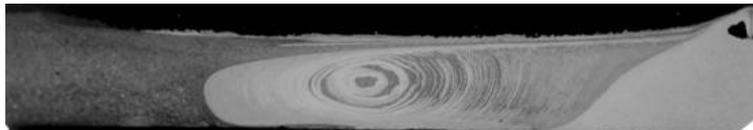


Abbildung 6: Makroschliff FSW-Schweißverbindung GDAISi10Mg / AlMg3

Aufgrund des Schweißvorganges entsteht eine sehr feinkörnige Struktur im Bereich der Rührzone der Nähte, dies kann am besten aus dem Vergleich der Mikrostruktur des Druckgusses im Grundwerkstoff und im Nugget verdeutlicht werden, siehe Abbildung 7.

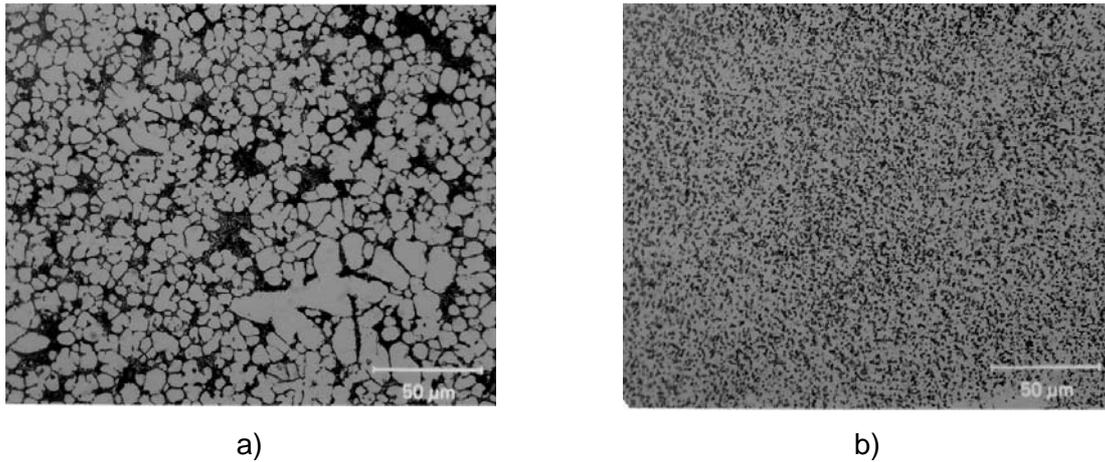


Abbildung 7: Gefüge der Druckgusslegierung im Grundwerkstoff (a) und in der Rührzone (b)

Die Korngröße im unbeeinflussten Grundwerkstoff beträgt 20 bis 30 µm. Aufgrund des Schweißverfahrens entsteht ein rekristallisiertes Gefüge mit einer Korngröße von etwa 5 µm. Dies führt zu einer Verbesserung der Duktilität der Druckgusslegierung. Darüber hinaus können Fehler im Druckguss wie z.B. Poren oder Risse im Bereich der Rührzone behoben werden [6].

Im Zugversuch versagten die Proben parallel zur Schweißnaht im Bereich des Fügepartners mit der geringeren Festigkeit. Die Lage des Bruches ist in Abbildung 8 abgebildet.

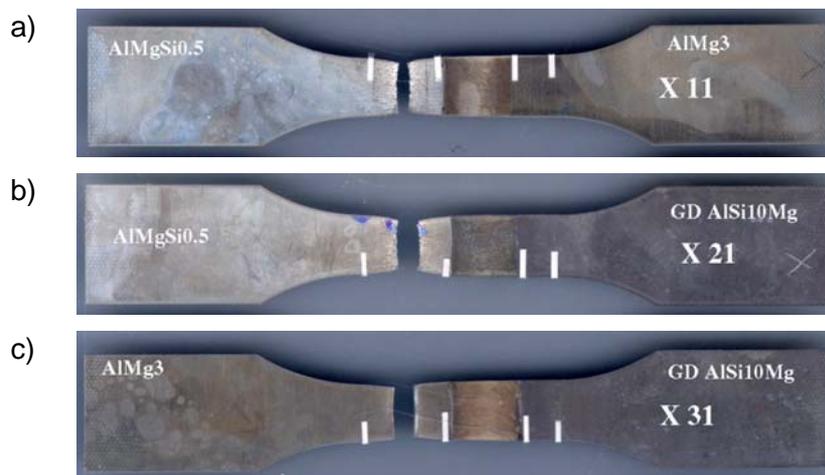


Abbildung 8: Bruchlage von geschweißten Zugproben

Der Verlauf des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes der AlMg3/GDAISi10Mg Verbindung ist, stellvertretend für die weiteren Verbindungen, in Abbildung 9 dargelegt. Die Verbindungen erreichen somit eine Zugfestigkeit von 225 MPa, welche dem Wert des Grundwerkstoffes

AlMg3 in etwa entspricht. Die verbleibenden Proben erreichen beide eine Bruchdehnung von 12 %. Mit ihren Materialeigenschaften, bewegen sie sich zwischen dem spröden Druckguss und dem duktilen Walzblech.

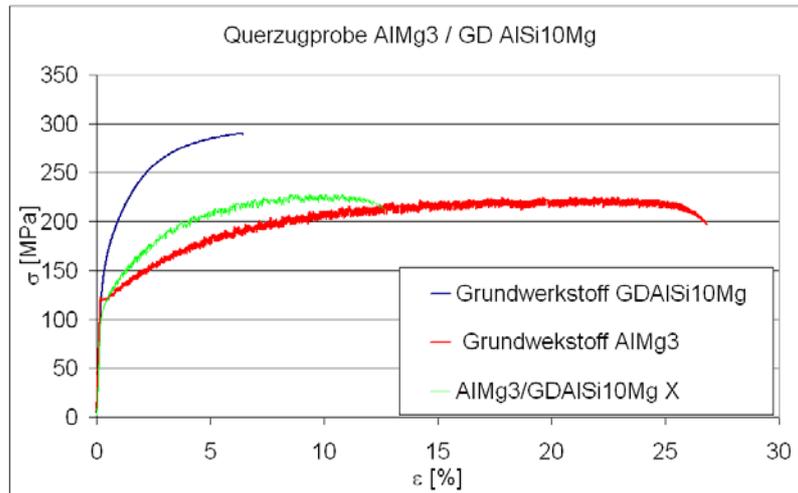


Abbildung 9: Spannungs-Dehnungskurven

Die Bruchdehnung A bezieht sich auf die Anfangslänge L_0 der Proben. Bei einer FSW-Verbindung setzt sich nun diese Länge nicht aus einem homogen Stück, sondern aus verschiedenen Zonen mit unterschiedlichen Legierungen und Eigenschaften zusammen. Daher konzentriert sich die Dehnung hauptsächlich auf einem Bereich innerhalb der Probe und führt zu einer relativ niedrigen Bruchdehnung.

Die in Tabelle 3 angegebenen Werte für $R_{P0,2}$, R_m , der Bruchdehnung A und des Biegewinkels stellen den Durchschnitt aus mindestens drei artgleichen Proben dar.

Tabelle 3: Mechanische Eigenschaften der FSW-Proben

Werkstoffkombinationen	$R_{P0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Biegewinkel [°]
AlMg3 / AlMgSi0.5	100	180	12	160
AlMgSi0.5/ GD AlSi10Mg	90	175	10	75
AlMg3 / GD AlSi10Mg	110	225	12	75

Die Zugfestigkeit der geschweißten Proben erreicht im Verhältnis zum jeweils schwächeren Fügepartner gemäß Tabelle 3 97 % für die erste Verbindung, 94 % für die zweite Verbindung und 100% für die dritte Verbindung. Die Duktilität der Schweißnähte kann durch den Biegewinkel ausgedrückt werden. Bei der Werkstoffkombination 1 wird der gleiche

Biegewinkel erreicht wie bei den eingesetzten Grundwerkstoffen. Die Werkstoffkombinationen 2 und 3 zeigen einen deutlichen höheren Biegewinkel im Vergleich zum Druckguss. Dies ist zum einen auf die gute Vermischung der Grundwerkstoffe und zum anderen auf die Reduzierung der Korngröße in der Rührzone zurückzuführen. Die Erhöhung der Duktilität durch ein feinkörniges Gefüge infolge des Rührreibschweißens wird in der Literatur [6, 7] mit unterschiedlichen Versuchen bewertet.

5. Zusammenfassung

Das Schweißen von Aluminiumlegierungen kann fehlerfrei realisiert werden. Eine Einschränkung hinsichtlich der Werkstoffkombination aus unterschiedlichen Aluminium Legierungen besteht nicht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einsatz des Verfahrens am Beispiel von artungleichen Mischverbindungen demonstriert und bewertet.

Es konnte gezeigt werden, dass der Materialfluss in der Rührzone sich abhängig von der Streckenenergie verhält. Die Abnahme der Streckenenergie resultierte aus der Bildung von Fehlstellen im Materialverbund der Rührzone, ein Hinweis auf die falsche Parameterkombination.

Mit der richtigen Parameterkombination wurden fehlerfreie artungleiche Stumpfstöße mit den Legierungen AlMg3, AlMgSi0,5 / 6060-T4 und GD AlSi10Mg hergestellt. Die Zugproben versagten im jeweils schwächeren Grundwerkstoff weit entfernt von der Naht. Aufgrund der feinen Mikrostruktur in den Schweißnähten konnte eine Verbesserung der Duktilität gegenüber der des Druckgusses festgestellt werden.

Die Betrachtung des Gefüges verdeutlicht, dass eine Kornfeinung insbesondere des Gusswerkstoffes stattgefunden hat. Somit besteht die Möglichkeit den Rührreibprozess zum einen zur gezielten lokalen Änderung des Gefüges und zum anderen als Reparaturverfahren für typische Unregelmäßigkeiten in Gussbauteilen (wie z.B. Oberflächennahen Risse, etc.) einzusetzen.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei den Herrn C. Schilling und M. Nüchtern für die Durchführung der Versuche ganz herzlich bedanken.

Literatur

1. W. M. Thomas, D. E. Nicholas, C. J. Needham:
Improvements relating to friction welding; Patent No. EP 0 615 480 B1; 1994
2. I. Ballerstein:
Feasibility study of friction stir welding of ship components; Diploma thesis; Technical University Hamburg-Harburg; 2000
3. P. L. Threadgill:
Friction stir welding –the state of the art-; TWI Research Report; 1999
4. O. T. Midling, G. Rorvik:
Effect of tool shoulder material on heat input during friction stir welding; 1st International Symposium on Friction Stir Welding 14-16 June 1999; California, USA; 1999
5. C. M. Chen, R. Kovacevic:
Finite element modeling of friction stir welding - thermal and thermomechanical analysis; International Journal of Machine Tools & Manufacture; 2003; Vol. 43, p. 1319-1326
6. W. M. Thomas, D. G. Staines, I. M. Norris, and E. R. Watts:
Friction Stir Welding – Process Developments; Twelfth International Conference on the Joining of Materials (JOM-12); Helsingor, Denmark; 20-23 March 2005
7. S. Sheikhi, J. F. dos Santos:
Eigenschaften von rührreibgeschweißten Aluminium-Mischverbindungen;
Schlüsseltechnologie Leichtmetallguss im Automobilbau, 17./18. November 2005 - Bad Nauheim

Hochdynamischer Aufprallvorgang beim Magnetimpulsschweißen

The High-dynamic Impact Process of Pulsed Magnetic Welding

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann, **M.Sc. Kambiz Damavandi**, Dipl.-Ing. Anja Rautenstrauch, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, TU Berlin

Kurzfassung

Beim Magnetimpulsschweißen wird ein Werkstück unter Anwendung von Wirkenergie derart beschleunigt, dass bei der anschließenden Kollision mit dem Fügepartner eine stoffschlüssige Verbindung auch ohne zusätzliche Wärmezufuhr realisiert wird. Die Wirkenergie entsteht durch ein zeitlich veränderliches Impulsmagnetfeld, das durch einen Stromstoß in einer hochstrombelasteten Spule erzeugt wird. Infolge der hohen Kollisionsgeschwindigkeit der Werkstücke entsteht eine charakteristische, wellenförmige Grenzlinie sowie thermisch aktivierte Diffusionsprozesse, die durch die hohen plastischen Oberflächendeformationen hervorgerufen werden. Das Verfahren ermöglicht stoffschlüssige Fügeverbindungen unterschiedlicher Werkstoffkombinationen.

1. Einleitung

Die zunehmende Verknappung von Rohstoffen und die damit verbundenen Preissteigerungen für fossile Energieträger werden dazu führen, dass Leichtbau-Konzepte bei der Konstruktion von Verkehrsmitteln eine immer größere Bedeutung gewinnen werden. In vielen Bereichen wird dies bedeuten, dass häufig verwendete Werkstoffe wie Stahl durch leichtere Werkstoffe substituiert werden müssen. Aluminium spielt hierbei als häufig verwendeter Leichtbauwerkstoff eine tragende Rolle. Das Fügen dieser Leichtbauwerkstoffe mit herkömmlichen Verfahren wie dem Schmelzschweißen wirft jedoch immer noch Probleme auf. Darüber hinaus sind manche Werkstoffkombinationen wie z.B. Stahl und Aluminium nicht zu realisieren, obwohl häufig gerade die Kombination verschiedener Materialien Gewichtseinsparungen ermöglichen würde.

Das impulsagnetische Schweißen stellt einen Lösungsansatz für diese Problematik dar.

2. Prinzip der impulsagnetischen Umformung

Das Hochgeschwindigkeitsumformverfahren beruht auf dem physikalischen Prinzip der Gegeninduktion. Das Werkstück wird dabei durch die Kraftwirkung gepulster Magnetfelder ohne mechanischen Kontakt zum Werkzeug umgeformt. Die zur Umformung erforderliche

Energie wird in Kondensatoren gespeichert und über Hochstromschalter der Werkzeugspule zugeführt, **Bild 1**.

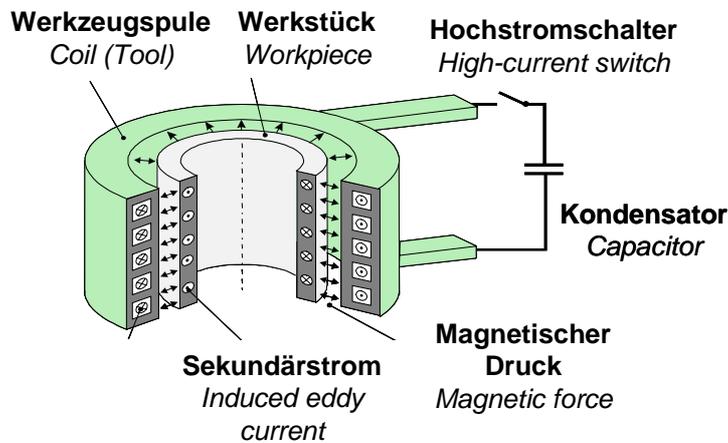


Bild 1: Prinzip der Impulsmagnetischen Umformung (hier: Kompression)

In Abhängigkeit der Anordnung von Werkzeugspule und Werkstück werden Kompression, Expansion und Flachumformung unterschieden, **Bild 2**.

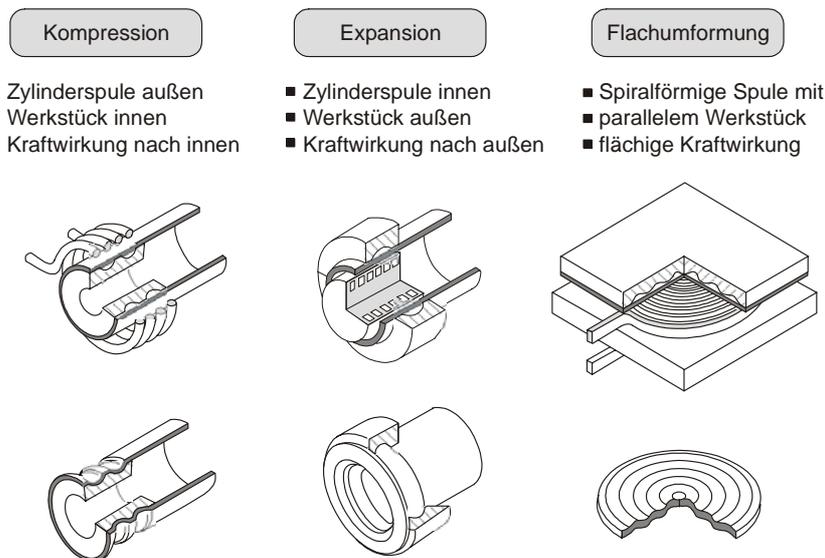
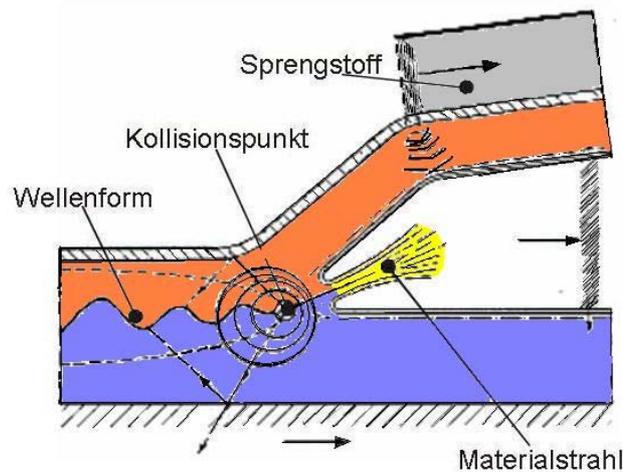


Bild 2: Anwendung der impulsmagnetischen Umformung

3. Arten des impulsmagnetischen Schweißens

Das aus der impulsmagnetischen Umformung entstandene impulsmagnetische Schweißen ist seit Ende der sechziger Jahre bekannt und gehört nach DIN 1910 Teil 2 der Gruppe der Schockschweißverfahren an. Beim Schockschweißen werden zwei Werkstücke ohne äußere Wärmezufuhr an den Stoßflächen stoffschlüssig miteinander verbunden. Dazu wird einer der Schweißpartner derart beschleunigt, dass bei der anschließenden Kollision der Werkstücke

die Oberflächenatome beider Schweißpartner auf Atomabstand zusammengepresst werden und eine metallische Bindung eingehen. Während des Schockschweißens sind beträchtliche Oberflächendeformationen in der Schweißzone zu beobachten, die das Aufreißen von Oxidschichten und thermisch aktivierte Diffusionsvorgänge hervorrufen. Die von der Oberfläche abplatzenden Oxid- und Schmutzpartikel werden mit dem sich bildenden und als Jet bezeichneten Strom aus der Schweißzone herausbefördert, **Bild 3**. Der Jet entsteht durch die Verdrängung der Luft im Fugespalt wobei Luftgeschwindigkeiten von bis zu 8.000 m/s entstehen.



Quelle: Hammerschmidt

Bild 3: Verfahrensablauf beim Sprengplattieren

Die notwendige Aufprallgeschwindigkeit beim Schockschweißen liegt in Abhängigkeit des zu schweißenden Werkstoffes oberhalb von 300 m/s, die durch eine entsprechende Energieeinleitung hervorgerufen wird. Geeignete Energiedichten zur Beschleunigung können beispielsweise durch Sprengstoff oder Impulsmagnetfelder bereitgestellt werden, wobei Impulsmagnetfelder im Gegensatz zu Sprengstoff gravierende Vorteile im Bereich des Handlings, der Automatisierbarkeit, der Kosten und der Reproduzierbarkeit aufweisen.

Wie bei der impulsmagnetischen Umformung wird das sich zeitlich ändernde Magnetfeld beim impulsmagnetischen Schweißen durch einen Stromstoß einer hochstrombelasteten Werkzeugspule erzeugt. Dazu werden Kondensatoren mit einer Spannung von bis zu 15 kV aufgeladen und schlagartig über eine Werkzeugspule entladen. Während der Entladung fließen in einem Zeitraum von 10 μ s bis 50 μ s Ströme mit einer Höhe von bis zu 700 kA [1, 4]. Das dadurch entstehende Impulsmagnetfeld induziert im zu beschleunigenden Werkstück einen Wirbelstrom, der aufgrund des Skin效ektes auf die Oberfläche des

Werkstücks beschränkt ist. Durch den Wirbelstrom entsteht zeitgleich ein zweites Magnetfeld, welches dem primären entgegengerichtet ist. Dabei treten magnetische Drücke von bis zu 300 N/mm^2 auf, wodurch der Fügepartner mit über $5 \cdot 10^7 \text{ m/s}^2$ beschleunigt wird und eine Geschwindigkeit von weit über 300 m/s erreicht. Grundvoraussetzung für das Magnetimpulsschweißen ist die gute elektrische Leitfähigkeit mindestens von einem der zu verschweißenden Fügepartner [5]. Somit sind beispielsweise Aluminium, Kupfer, Messing oder auch Magnesium gut für dieses Verfahren geeignet.

Um die extrem hohen magnetischen Drücke zu erreichen, werden in der Praxis häufig Feldformer benutzt, wie **Bild 4** zeigt. Diese ermöglichen mit einfachen Mitteln eine Druckumverteilung und Konzentrierung auf kleinere Oberflächenbereiche. Darüber hinaus stellen die häufig sehr massiv gestalteten Feldformer bei den hohen Arbeitsdrücken eine mechanische Entlastung für die Werkzeugspulen dar, was zu einer deutlichen Verlängerung der Lebensdauer derer führt.

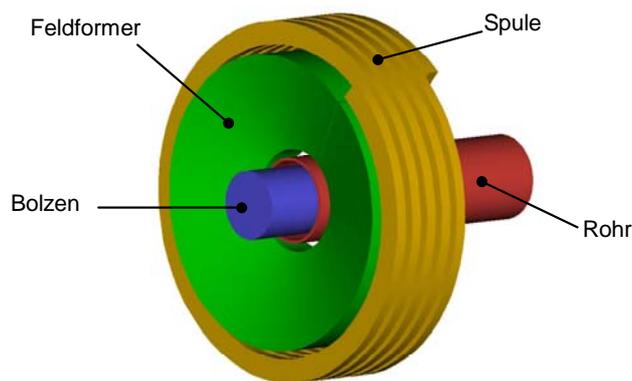


Bild 4: Prinzip des impuls-magnetischen Schweißens

Auch beim impuls-magnetischen Schweißen bildet sich wie beim Sprengplattieren eine charakteristische, wellenförmige Grenzlinie aus, die ein Kennzeichen für eine erfolgte Verschweißung ist. Dabei hat sich gezeigt, dass bestimmte Kollisionswinkel die Ausbildung der Wellenform begünstigen oder überhaupt erst hervorrufen. Somit sind für eine impuls-magnetisch geschweißte Fügeverbindung die Aufprallgeschwindigkeit und der Kollisionswinkel entscheidend, **Bild 5**.

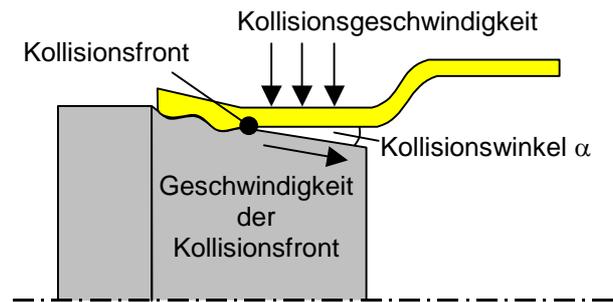


Bild 5: Kollision der Fügepartner

4. Einsatzgebiete und Werkstoffpaarungen

Obwohl das impuls-magnetische Schweißen schon seit nunmehr 35 Jahren bekannt ist, sind bisher nur sehr wenige Anwendungen, die in die Praxis umgesetzt wurden, in der Literatur beschrieben. So wurden im Bereich der Kernenergietechnik schon 1978 die Verschlüsse von Kernbrennstäben impuls-magnetisch verschweißt. Weitere Anwendungen liegen in der Luft- und Raumfahrttechnik sowie dem Automobilbau. Ein entscheidender Vorteil des impuls-magnetischen Schweißens besteht darin, dass der Schweißvorgang nahezu ohne thermische Beeinflussung der Werkstücke abläuft. So sind nachträgliche Wärmebehandlungen zur Herstellung des ursprünglichen Gefügestands nicht notwendig. Hierdurch wird auch die Verwendung von aushärtbaren Aluminiumlegierungen, wie sie im konstruktiven Leichtbau vermehrt zum Einsatz kommen ohne aufwendige Wärmenachbehandlungsverfahren ermöglicht.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Werkstoffe miteinander zu verschweißen. So sind aus der Literatur zum Sprengschweißen und impuls-magnetischen Schweißen unterschiedliche Werkstoffkombinationen bekannt, **Tabelle 1**. Das impuls-magnetische Schweißen ermöglicht u.a. das Fügen von Stahl und Aluminium. Hierdurch können z.B. Rahmenstrukturen im Automobilbau gefertigt werden, die die Vorteile beider Materialien miteinander kombinieren. In der Klimatechnik wird das impuls-magnetische Schweißen bereits erfolgreich angewendet, und hierbei für druckdichte Verbindungen von Leitungen aus unterschiedlichen Materialien eingesetzt, **Bild 6**. Entscheidend für die Schweißbarkeit der unterschiedlichen Metalle sind nicht die makroskopischen Werkstoffeigenschaften wie die Festigkeit oder der Schmelzpunkt, sondern deren Gitterstruktur.



Bild 6: Fügen von Leitungen aus unterschiedlichen Werkstoffen
Quelle: Pulsar Ltd., Yavne, Israel

Tabelle 1: Mögliche Werkstoffkombinationen beim Magnetimpulsschweißen nach [1, 2, 3]

Fügepartner a \ Fügepartner b	Aluminium	Kupfer	Messing	Magnesium	Stahl	Nickel	Titan
Aluminium	•	•	•	•	•	•	•
Kupfer	•	•	•	•	•	•	•
Messing	•	•	•				
Magnesium	•	•		•			
Stahl	•	•			•		
Nickel	•	•				•	•

Gute Ergebnisse lassen sich so z.B. mit Kupfer und Aluminium als Fügepartner erzielen, es entsteht eine stoffschlüssige Verbindung ohne Einschlüsse oder Gefügeveränderungen in der Nähe der Fügezone, **Bild 7**.



Bild 7: Durch impulsmagnetisches Schweißen hergestellte Fügeverbindung zwischen Kupfer und Aluminium, Quelle: Pulsar Ltd., Yavne, Israel

Beschränkt wird das impuls-magnetische Schweißen nur durch den Bedarf an Energie, der durch das Impulsmagnetfeld eingeleitet und dann in kinetische Energie umgewandelt wird. Bei Bauteilen mit größeren Durchmessern und Wandstärken steigt der Energiebedarf im Verhältnis zur Volumenänderung an. So können Rohre mit einem Durchmesser von bis zu 150 mm und Wandstärken bis zu 3 mm impuls-magnetisch verschweißt werden [3]. Weiterhin hat die Dichte des zu beschleunigenden Werkstücks einen entscheidenden Einfluss auf die benötigte Schweißenergie. Sie liegt bei konstanter Fügegeometrie bei Kupfer um den Faktor drei höher als bei Aluminium.

5. Experimentelle Ergebnisse

Die am IWF Berlin durchgeführten Versuche zeigen, dass es möglich ist, mit Hilfe des impuls-magnetischen Schweißens hochwertige Verschweißungen zu erzielen. Dabei wurden Aluminiumrohre der Legierung AlMgSi0,5 (AA 6063 T6) mit Bolzen der gleichen Legierung impuls-magnetisch verschweißt. Beim Verschweißen eines Hohlzylinders mit einem Bolzen bietet sich hierfür die Verwendung einer sickenförmigen Stufe an, **Bild 8**.

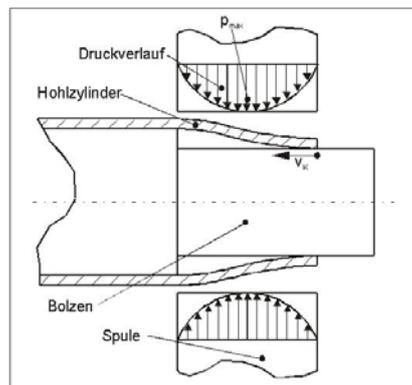


Bild 8: Verschweißung eines Hohlzylinders mit einem Bolzen

Der Werkstoff des Hohlzylinders kippt dabei über die Stufenkante ab und rollt zurück wodurch sich der Winkel zum Bolzen erhöht und die Kollisionsgeschwindigkeit zunimmt, bis der Werkstoff des Hohlzylinders durch die Stufe abgebremst wird. Bei anschließend durchgeführten Torsionsprüfungen trat durchgängig ein Versagen außerhalb der Fügezone auf. Die von der Schweißzone angefertigten Schliffbilder zeigten die auch von anderen Schockschweißverfahren her bekannte Wellenbildung, **Bild 9**. Die Wellenlänge und Amplitude hängen dabei von dem Aufprallwinkel, der Aufprallgeschwindigkeit und den Werkstoffeigenschaften ab.

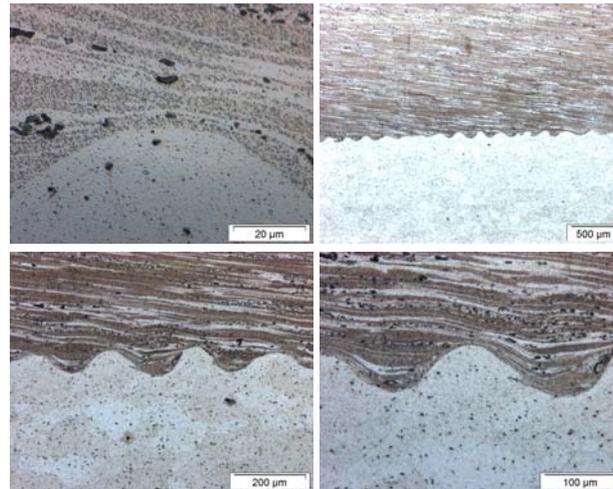


Bild 9: Schliffbilder von impulsmagnetischen Schweißungen des Werkstoffs AA 6063 T6, durchgeführt am IWF Berlin [6]

Durch die Schliffbilder werden die hohen plastischen Deformationen sichtbar, die während des impulsmagnetischen Schweißens entstehen. Wegen der innerhalb nur weniger Mikrosekunden entstehenden plastischen Verformungen (quasi adiabatischer Prozess) ist ein deutlicher Temperaturanstieg durch die Umwandlung von Umformarbeit in Wärme zu erwarten. Allerdings ist in den Schliffbildern eine scharfe Abgrenzung der beiden Werkstücke zu erkennen, wodurch ein Aufschmelzen der Schweißzone in diesem Fall auszuschließen ist.

In den durchgeführten Versuchen wurde die Stufenhöhe am Bolzen variiert, hierdurch konnten verschiedene Kollisionsgeschwindigkeiten realisiert werden. Neben laminaren Zuständen traten auch turbulente in der Kontaktzone auf, **Bild 10**.

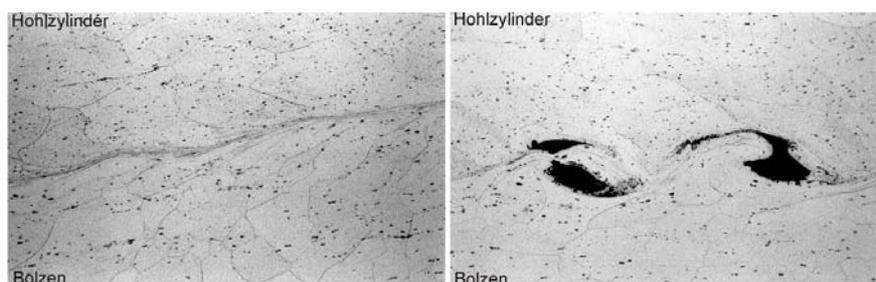


Bild 10: Laminare und turbulente Zustände in der Kontaktzone

6. FEM-Verfahrensanalyse

Zur Analyse des nur wenige Mikrosekunden andauernden Aufprallvorganges wurde der Prozess in dem FEM-System MSC.Marc modelliert. Dabei bildete sich bei bestimmten Aufprallgeschwindigkeiten und -winkeln auch in der Simulation die charakteristische wellenförmige Grenzlinie aus, **Bild 11** und **Bild 12**.

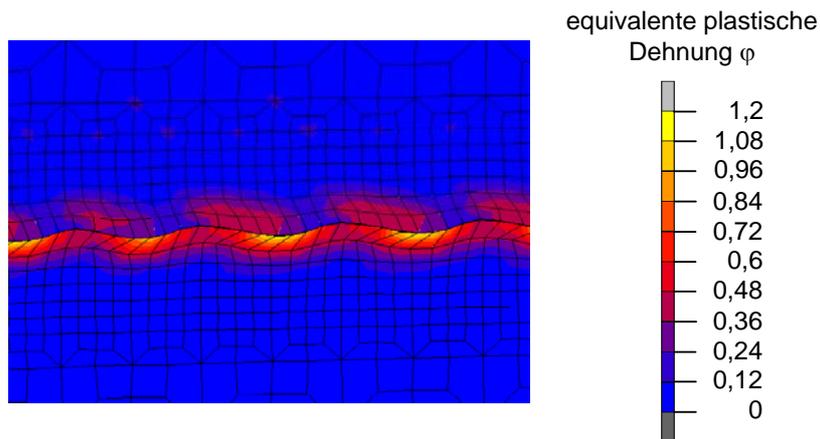


Bild 11: FEM-Simulation der äquivalenten plastischen Dehnung im Bereich der Schweißzone [7]

Somit ermöglicht die Finite-Elemente-Analyse eine grundlegend neue Herangehensweise zur Erforschung, Umsetzung und Optimierung des impuls magnetischen Schweißens unter der Voraussetzung, dass entsprechende Werkstoffkenn Daten für derartige dynamische Prozesse vorhanden sind. Zielsetzung der durchgeführten FEM-Simulationen ist die Optimierung der Prozessparameter zum impuls magnetischen Schweißen. Es ist bekannt, dass zum Erreichen von impuls magnetischen Verschweißungen hohe Aufprallgeschwindigkeiten von über 300 m/s notwendig sind. Weiterhin begünstigen bestimmte Kollisionswinkel das Magnetimpulsschweißen und rufen die charakteristische Wellenbildung in der Schweißzone hervor.

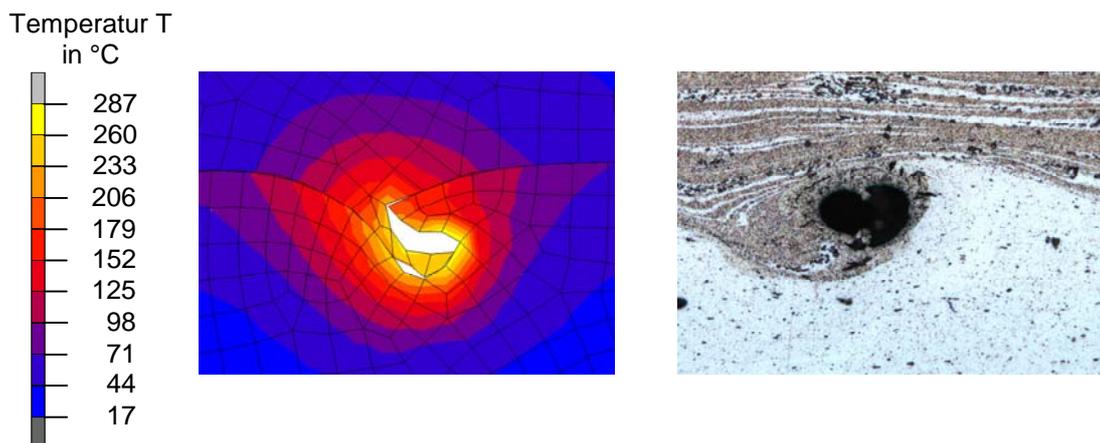


Bild 12: Wellenwurf in der FEM-Simulation im Vergleich zum Schlibbild [7]

Die Ergebnisse der FEM - Simulationen ermöglichen die Ermittlung der während des Aufpralls herrschenden Bedingungen. So können die hohen plastischen Oberflächendeformationen, die während des Aufpralls bei bestimmten Aufprallgeschwindigkeiten und -winkeln in der Schweißzone entstehen, in den Simulationen

bestimmt werden. Diese plastischen Oberflächendeformationen führen zum Aufreißen von Oxidschichten und ermöglichen somit das Zusammenbringen zweier metallisch reiner Oberflächen, die dann eine metallische Bindung eingehen. Durch die hohen plastischen Verformungen in der Schweißzone werden bei der Aluminiumlegierung AA6063 T6 Temperaturerhöhungen von 200° C bis 300° C in der Fügezone beobachtet, **Bild 13**. Die beobachteten Temperaturerhöhungen hängen von der Aufprallgeschwindigkeit und dem Kollisionswinkel ab. Die dadurch entstehenden thermisch aktivierten Diffusionsprozesse unterstützen den Schweißprozess.

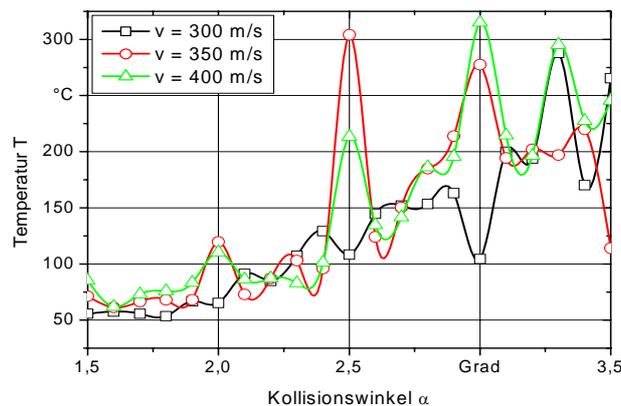


Bild 13: Temperaturen in der Schweißzone [7]

7. Ausblick

Insbesondere beim Fügen unterschiedlicher Metalle wie Aluminium mit Stahl oder Kupfer mit Messing besitzt das impuls-magnetische Schweißen erhebliche Vorteile im Vergleich zu den klassischen Schmelzschweißverfahren. Es besteht ein großes Interesse die gewonnenen Informationen über das impuls-magnetische Schweißen auf unterschiedliche Werkstoffe zu übertragen. Hierzu muss der Einfluss der unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften wie die der elektrischen Leitfähigkeit, der Dichte, der Festigkeit und des E-Moduls auf den Fügeprozess untersucht werden. Ein weiteres Ziel ist es, die Prozessparameter den unterschiedlichen Fügedurchmessern, speziell kleinen Durchmessern, anzupassen und so den Einsatzbereich des impuls-magnetischen Schweißens auf weitere Anwendungsgebiete zu übertragen.

Darüber hinaus soll die Möglichkeiten des impuls-magnetischen Schweißens zum Fügen von Profilen durch Expansion und das impuls-magnetische Schweißen von Blechen untersucht werden. Diese Verfahren würden ganz neue Möglichkeiten bieten, Rahmenstrukturen und Blechbauteile miteinander stoffschlüssig zu verbinden, und somit zusätzliche Einsparmöglichkeiten zu generieren.

Das Potenzial des Verfahrens ist also bei weiten noch nicht voll ausgeschöpft, und die zunehmende Rolle des Leichtbaus macht eine Weiterentwicklung und Optimierung erstrebenswert.

- [1] Hokari, H.; Sato, T.; Kawauchi, K.; Muto, A.: Magnetic impulse welding of aluminium tube and copper tube with various core material; *Welding International* 1998, 12, S. 619-626
- [2] Shribman, V.; Stern, A.; Livshitz Y.; Gafri O.: Magnetic pulse welding produces high strength aluminium welds; *Welding Journal*, April 2002
- [3] Kistersky, L.: Welding process turns out tubular joints fast; *American Machinist*, April 1996, Bd. 140, Heft 4 S. 41/42
- [4] Plum, M.: Electromagnetic Forming; *Metals Handbook*, Vol. 4, 9 th Edition, 1989
- [5] Uhlmann, E.; Hahn, R.: Optimierung der Fügegeometrie einer PKW-Antriebswelle für das Fügen durch impulsmagnetische Umformung; *Kolloquium Elektromagnetische Umformung*, Mai 2001
- [6] Uhlmann, E.; Hahn, R.; Schätzing, W.; Wollenberg, G.: Umformung von metallischen Werkstoffen durch Impulsmagnetfelder; Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 11841BG/1 im Rahmen der EFB, 31.01.2001
- [7] Uhlmann, E.; Mense, C.: Simulation des hochdynamischen Aufprallvorganges beim Magnetimpulsschweißen; *MSC.Marc® Technologietag München*, 2002

Reibschweißen von Titanaluminiden mit Ventilstahl unter Verwendung einer externen Vorwärmeinrichtung

Friction Welding of Titanaluminides to wear resistant Valve steels assist with an external pre-heating unit.

Prof. Dr.-Ing. H. Horn, Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik (IWS), Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, Dipl.-Ing. A. Kaupat, Dipl.-Ing. H. Junge, IWS-Service GmbH, Hamburg, Dr.-Ing. M. Schlegel, DaimlerChrysler AG

Kurzfassung

Um Titanaluminide als Ventilwerkstoff in Verbrennungsmotoren einsetzen zu können, ist es notwendig, diese nockenwellenseitig mit einem verschleißbeständigen Stahlwerkstoff zu verbinden. Auf Grund der sehr unterschiedlichen Warmfestigkeiten der beiden Werkstoffe ist eine konventionelle Reibschweißverbindung nicht zu realisieren. Durch die Einbindung einer induktiven Vorwärmeinrichtung in den Reibschweißprozess konnte die Reibaktivierung beider Werkstoffe erreicht und Reibschweißverbindungen mit hoher Festigkeit hergestellt werden, ohne dass sich die Schweißzeiten wesentlich verlängerten .

1. Einleitung

Werkstoffe auf der Basis Titan-Aluminium gehören zu der Werkstoffgruppe der „Intermetallischen Phasen“. Dabei handelt es sich um Materialien bei denen, in Abhängigkeit von den beteiligten Atomarten, sowohl metallische als auch kovalente Bindungstypen auftreten. Insofern stehen diese Werkstoffe zwischen den Metallen und den Keramiken. Ob das Verhalten nun mehr metallischen oder keramischen Charakter aufweist, hängt von dem Anteil der jeweiligen Bindungsart ab. Generell sind intermetallische Phasen bei Raumtemperatur sehr wenig verformungsfähig, bieten aber eine höhere Warmfestigkeit und ein besseres Kriechverhalten als die meisten metallischen Werkstoffe. Gegenüber den keramischen Werkstoffen zeichnen sie sich aber durch eine bessere Handhabbarkeit bei der Herstellung und durch eine, wenn auch begrenzte, Plastizität aus. Daher werden sie in zunehmendem Maße als Hochtemperaturwerkstoffe eingesetzt.

Ihre geringe Dichte, verbunden mit Einsatztemperaturen bis etwa 900 °C, lässt sie auch als Ventilwerkstoffe für Verbrennungsmotoren geeignet erscheinen.

Dem stehen allerdings die schlechten Verschleißigenschaften des Titanaluminids im Kontaktbereich mit der Nocke entgegen, welches die dauerhafte Verbindung mit einem verschleißbeständigen Werkstoff notwendig macht. Als verschleißbeständiger und kostengünstiger Ventilstahl hat sich seit vielen Jahren der Stahl X45CrSi9-3 bewährt, der bei

konventionellen Bimetallauslassventilen durch Reibschweißen mit dem austenitischen Tellerwerkstoff verbunden wird. Daher bestand die Forderung, diesen Stahl durch Reibschweißen mit Titanaluminid zu verbinden. Die bisher durchgeführten Untersuchungen zum Reibschweißen erbrachten den Nachweis, dass sich dieser Werkstoff artgleich sehr gut Reibschweißen lässt.(1) Nicht artgleiche Verbindungen, vor allem mit umwandlungsfähigen Stahlwerkstoffen konnten bisher aber nur mit sehr geringen Verbindungsfestigkeiten erzielt werden (2,).

2. Reibschweißversuche

Die Ventil-Schweißversuche wurden praxisnah an Probestücken mit \varnothing 6,3 mm durchgeführt. Anfangs behinderte eine sehr schlechte und schwankende Qualität des TiAl die Ermittlung der optimalen Schweißparameter. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, ist Material von gleichbleibender Qualität Voraussetzung, welches bei Beginn der Schweißversuche nicht vorlag. Die Abbildungen 1- 4 geben die große Streubreite der Gefüge unterschiedlicher

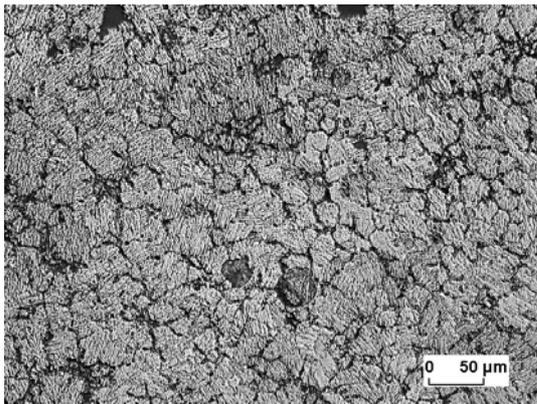


Abbildung 1: TiAl Anlieferungszustand 1

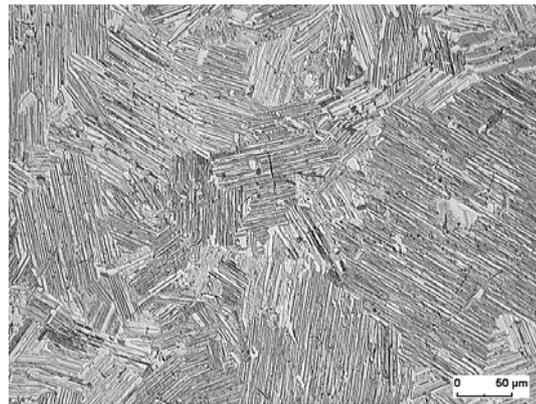


Abbildung 2: TiAl Anlieferungszustand 2

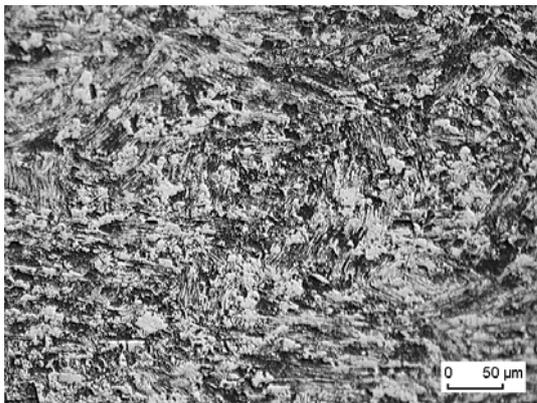


Abbildung 3: TiAl Anlieferungszustand 3

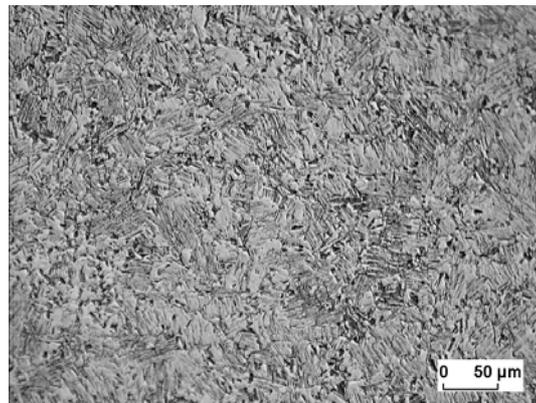


Abbildung 4: TiAl Anlieferungszustand 4

TiAl-Chargen wieder. Der ursprünglich zur Verfügung stehende Werkstoff wies teilweise eine starke Grobporigkeit, verbunden mit einem groben Korn auf. Dies führte dazu, dass mit gleichen Parametern durchgeführte Schweißungen stark streuende Ergebnisse zeigten. In einem ersten Schritt wurde daher der Versuchswerkstoff optimiert und die Reibschweißeignung an drei verschiedenen Werkstoffzuständen, nämlich grobkörniger, feinkörniger sowie zusätzlich gehippter Guss untersucht. An diesen Gefügeständen wurde eine Materialauswahl durchgeführt, um die notwendigen Randbedingungen für reproduzierbare Schweißungen zu schaffen.

Dabei zeigte sich, dass die zum Reibschweißen nötige Plastizität im TiAl-Werkstoff nicht erreicht wurde. Die verfahrenstypische Wulstbildung beschränkte sich nahezu ausschließlich auf den Fügepartner X45CrSi 9-3 (Abb. 5).

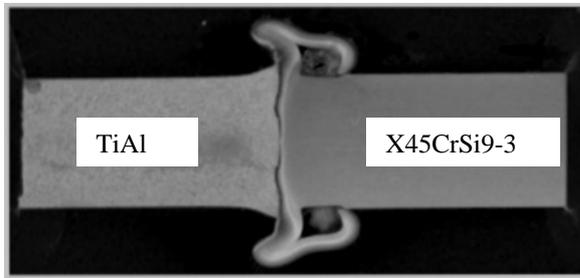


Abbildung 5: Reibschweißverbindung ohne Vorwärmung

Dementsprechend war auch die Reibaktivierung im TiAl entsprechend gering, was wiederum zu sehr geringen Verbindungsfestigkeiten führte. Dies führte zu der Überlegung, das TiAl vor dem eigentlichen Reibschweißprozess vorzuwärmen. Unter den speziellen verfahrenstechnischen Randbedingungen des Reibschweißverfahrens und unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit der Schweißung erwies sich lediglich die Möglichkeit des Vorwärmens durch eine Induktionsspule in der Reibschweißmaschine als eine praktikable Möglichkeit. Über die Grundzüge dieser Technik wird in (3) berichtet. Demzufolge wurde eine Induktionsspule in die Reibschweißmaschine integriert (Abb. 6).

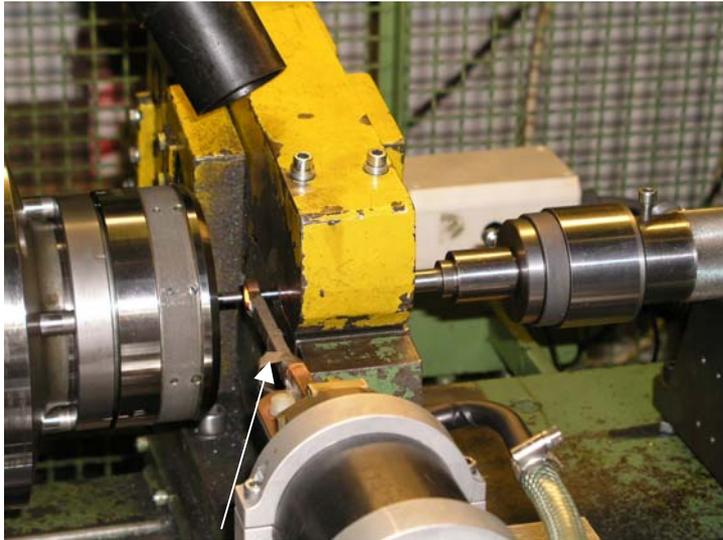


Abbildung 6: Reibschweißmaschine mit Induktionsspule (Pfeil)

Kurz vor Beginn des eigentlichen Reibschweißprozesses, also der Bauteilberührung, wurde das TiAl durch den Induktionsstrom erwärmt, so dass sich die beiden Fügepartner auf einem unterschiedlichen Temperaturniveau befanden. Danach erfolgte das Anreiben und der Stauchvorgang. Dabei war es notwendig, die Vorwärmzeit kurz zu halten, um eine Oxidation der Reibfläche des TiAl zu vermeiden. Die Abb. 7 zeigt, dass der Stauchwulst des Stahles

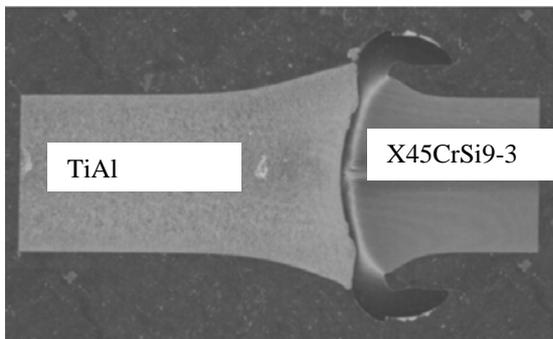


Abbildung 7: Reibschweißverbindung mit Vorwärmung geschweißt

gegenüber der nicht vorgewärmten Schweißverbindung bei gleicher Schweißzeit wesentlich geringer ausgebildet ist. Infolge der Vorwärmung der intermetallischen Phase kommt es in diesem Fall auch zu einer Aktivierung der Fügefläche. Die in die Reibschweißmaschine integrierte Induktionsspule lässt es auch zu, bei Bedarf den Abkühlvorgang nach dem Reibschweißen zu steuern. So kann einer möglichen, durch Abkühl- oder Umwandlungseigenstressungen verursachten, Rissbildung entgegengewirkt werden. Damit war es möglich, Reibschweißverbindungen herzustellen, deren Festigkeiten im Bereich der Grundwerkstofffestigkeit des TiAl lagen.

3. Untersuchungen

Die an den Schweißverbindungen durchgeführten Mikrostrukturuntersuchungen im Bereich der Fügeebene zeigten, dass sich zwischen TiAl und dem Stahl eine ca. 5-10 µm breite, haftvermittelnde Reaktionszone ausgebildet hat, die in der Abb. 8 in einer Rückstreuungsaufnahme wider gegeben ist.

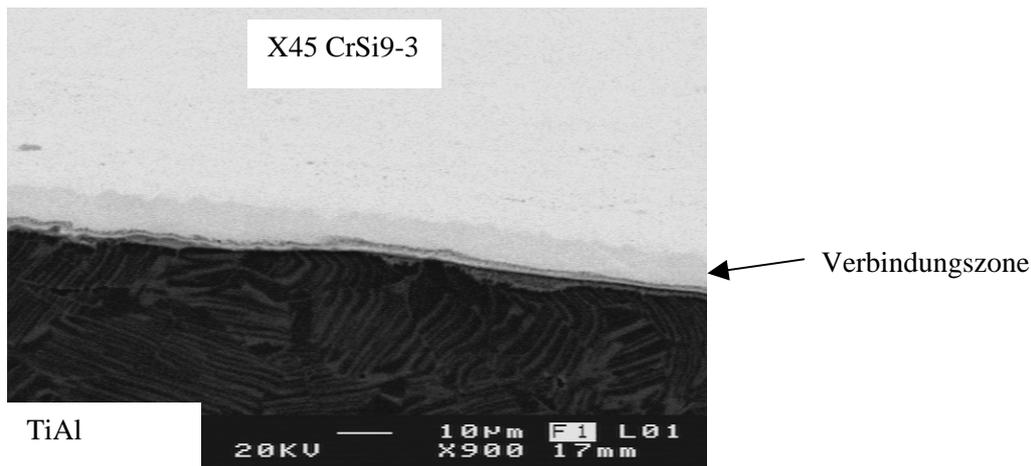


Abbildung 8: Rückstreuungsaufnahme der Fügeebene

Diese Zone, deren Charakterisierung bisher nicht eindeutig möglich war, weist eine Härte von nahezu 1000 HV auf. Bei Schweißungen ohne eine Vorwärmung fehlt diese Zone. Es ist daher davon auszugehen, dass es durch die Vorwärmung und den daran anschließenden Reibschweißvorgang zu einer Reaktion zwischen den Verbindungspartnern kommt, die Voraussetzung für eine hohe Festigkeiten der Schweißverbindung ist. Die hohe Härte dieser Zone lässt auf eine geringe Verformungsfähigkeit schließen. Bedingt durch die werkstofftypische geringe Verformungsfähigkeit des TiAl hat dies aber keine negativen Auswirkungen auf die Verbindungseigenschaften. Es ist allerdings darauf zu achten, dass die Ausdehnung dieser Zone auf wenige µm beschränkt bleibt, um die Rissbildungsgefahr während des Abkühlungsprozesses gering zu halten.

4. Literatur

- [1] Horn H.: Schweißen von Titanaluminium; VDI Berichte Nr. 917,1992 S. 369-372
- [2] Horn, H.: Investigation of Friction Welded Ti-Aluminides; Communications Eurojoin, 1991, p. 277-281.

- [3] SLV München: Reibschweißen mit zusätzlicher Wärmequelle; Bericht 5127/03
AIF Forschungsprojekt 12.936

Herstellung von metallischen Mischverbindungen mittels des rotatorischen Reibschweißens

Production of metallic alloys by means of rotational friction welding

Dipl. -Ing. H. Hentschel, Haag Industrietechnik GmbH, Bremen

Themen

1. Anwendungsziele
2. Vorteile des Reibschweißens (Allgemein)
3. Bandbreite der verschweißbaren Werkstoffe
4. Korrosion an Mischverbindungen
5. Anforderungen an die Werkstücke
6. Anforderungen an die Maschinenteknik
7. Qualitätssicherung
8. Perspektiven

1. Anwendungsziele durch den Einsatz von Mischverbindungen

- Reduzierung des Gewichts
- Reduzierung des elektrischen Widerstandes
- Erhöhung der Festigkeit
- Verschleißschutz
- Tribologische Eigenschaften
- Materialeinsparung
- Reduzierung der Fertigungskosten

2. Vorteile des Reibschweißens

- Kurze Prozesszeiten
- Kein Schweißverzug
- Geringer Wärmeeintrag
- Keine Zusatzwerkstoffe
- Keine Schutzgase
- Gute Reproduzierbarkeit der Schweißergebnisse
- Hoher Automatisierungsgrad

- Gute Parameterüberwachung
- Sehr hohe Qualität der Fügung (Festigkeiten)

3. Bandbreite der verschweißbaren Werkstoffe

Eisen- und Stahlwerkstoffe, Aluminium, Magnesium, Titan, Kupfer, Messing, Bronze, Sintermetalle, Keramik

Diese Werkstoffe können artgleich und zum Teil untereinander durch Reibschweißen miteinander verbunden werden.



Bild 1: Kabelhülse Kupfer / AlMg3

4. Korrosion an Mischverbindungen

Aufgrund der unterschiedlichen Spannungspotentiale kann es zu einer Kontaktkorrosion kommen. Der Einsatz von Mischverbindungen muss hinsichtlich des Korrosionsverhaltens geprüft werden.

Korrosionsprüfung an AlSi7Mg/St52-3 mit 3 wöchigen Salzsprühnebeltest, NaCl 50g/l,

Sichtprüfung

- Weißer Belag mit Salz und Korrosionsprodukten
- Korrosiver Angriff auf das Aluminium auf einer Breite von 4mm direkt neben der Schweißnaht

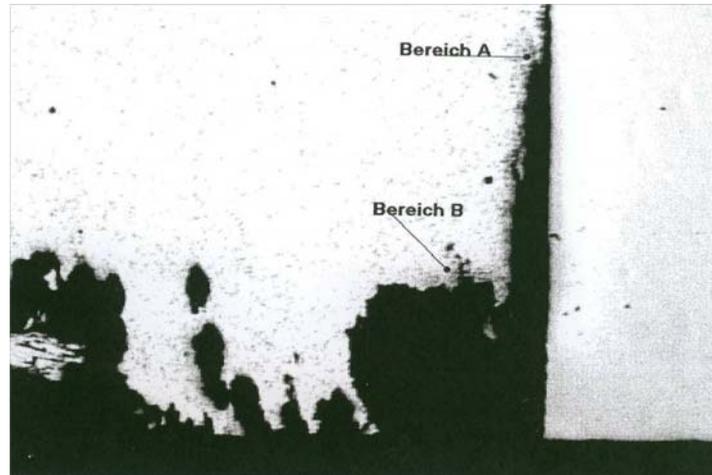


Bild 2: Geschädigter Bereich durch Korrosion

Metallographische Untersuchung

- Im Schweißnahtbereich ist das Aluminium bis zu einer Tiefe von 1mm spaltförmig geschädigt
- In der aluminiumseitigen WEZ haben sich Ausscheidungen aufgelöst und neu angeordnet

5. Anforderungen an die Werkstücke

- Eigenstabilität der Bauteile zur Aufnahme der Spann- u .Prozeßkräfte
- Sichere Lagerfixierung
- Sichere Drehmomentübertragung
- Planlauf < 5/100stel mm, Rundlauf je nach Qualität der Fügung
- Reinigung der Oberflächen, Oxidation, Verunreinigungen
- Beschichtungen müssen entfernt werden (Zink, Chromatierung, etc.)
- Spannbarkeit durch definierte Flächen müssen gewährleistet werden
- Vorzugsweise Rohrquerschnitt des warmfesteren Bauteils

6. Anforderung an die Maschinentechnik

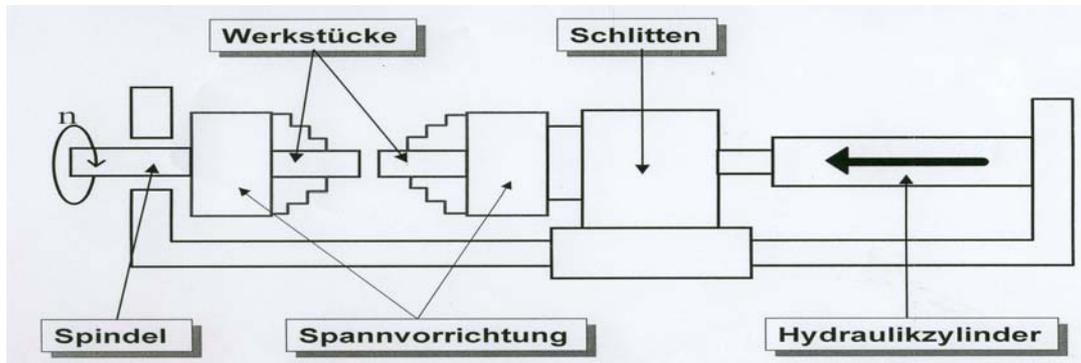


Bild 3: Skizze Maschinentechnik

- Hohes Drehmoment bei relativ kleinen Drehzahlen
- Steife Maschine, Schlittenführung
- Kurze Bremszeiten
- Hohe Dynamik der elektromechanischen Schaltelemente, Wegeventile etc.
- Temperaturregelung für das Hydrauliköl
- Steife präzise Spannsysteme

7. Aspekte zur Qualitätssicherung

Durch das kleine Parameterfeld bei Mischverbindungen wirken sich Störgrößen stark auf das Schweißergebnis aus.

7.1 Maßnahmen zur Reproduzierbarkeit der Schweißergebnisse

Fügeteile

- Die Fügeflächen müssen frei von Verunreinigungen sein
- Der Plan- und Höhengschlag muss durch geeignete Spannvorrichtungen im festgelegten Toleranzbereich liegen

Einflüsse durch die Maschinendynamik müssen berücksichtigt werden

- Öltemperatur der Hydraulik
- Kühlung der Spannvorrichtung bei dünnwandigen Blechen
- Regelverhalten der Bremse, Wegeventile etc. unter Temperatureinfluss

7.2 Parameterüberwachung

Nachfolgende Prozessparameter können aufgezeichnet und gespeichert werden, um eine Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten.

- Drehzahl
- Druck
- Weg
- Reibmoment

Über eine **Prozessvisualisierung** können die Messdaten graphisch dargestellt werden. Zur Bewertung der **Prozessfähigkeit (cp, cpk)** können der Reibweg oder auch das Reibmoment als bestimmende Größe herangezogen werden.

7.3 Sichtprüfung des Reibschweißwulstes

Durch eine Sichtprüfung können Rückschlüsse auf den Rundlauf, der Temperaturentwicklung und des Reibweges gezogen werden.

8. Perspektiven

Der verstärkte Einsatz von Leichtmetallen erfordert Mischbauweisen und geeignete Schweißtechnologien. Maßgeschneiderte Werkstoffkombinationen eröffnen neue Einsatzgebiete. Die Maschinentechnik liegt hinsichtlich des möglichen Anwendungsspektrums beim Reibschweißen zurück. Zur Zeit beschränken sich die Anwendungsmöglichkeiten auf stationäre Anlagen. Die Maschinenkosten sind als hoch anzusehen.

Reibschweißen von Verankerungen im Bauwesen

Dipl.-Ing. Winfried Schnabel, Dipl.-Ing. Winfried Schnabel GmbH, Rosbach

1. Einführung

Reibschweißen wird im Bauwesen hauptsächlich zur Herstellung von Verankerungen im Beton eingesetzt. Verankerungen werden benötigt, wenn schwere Lasten auf Betonbauteile verschraubt werden müssen.

Im allgemeinen Bauwesen werden Bauteile an den Beton mit Produkten der Dübeltechnik befestigt: Hierzu zählt sowohl der einfache Dübel im Haushalt als auch die Dübel zur Befestigung von Glasfassaden der modernen Hochhäuser.

Sobald die Lasten aber größere Dimensionen annehmen, bietet die Dübeltechnik nur problembehaftete Möglichkeiten zur Befestigung einmal, weil beim Dübel Achs- und Randabstände berücksichtigt werden müssen und weil vor allem bei dichter Bewehrung und bei größeren Dimensionen das Bohren zum Problem führen kann. Hier bietet sich der Bereich der Ankertechnik an. Die Ankertechnik wird verwendet zur Verankerung von Lärmschutzwand-Pfosten (siehe Bild 1), Lichtmasten-Masten etc., hauptsächlich im Verkehrswegebau.

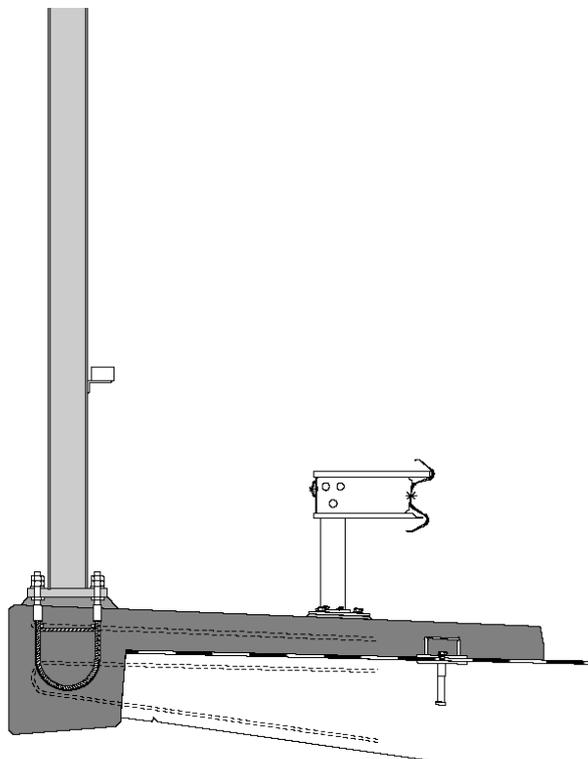


Bild 1: Verankerung eines Lärmschutzwandpfostens in einer Brückenkappe

2. Bauvorschriften

Um das deutsche Bauwesen zu verstehen, werden zuerst einmal die rechtlichen Hintergründe beschrieben.

Grundlage für eine Ausführung sind die DIN-Normenwerke. In diesen wird die Anwendung und die Bemessung für Baumaterialien geregelt. Die beiden bekanntesten Normen für einen Bauingenieur sind die Normen DIN 1045 für Stahl- und Spannbeton sowie die Norm DIN 18800 für Stahlbau. In DIN 18800 werden z.B. die Bemessungs- und Anwendungsrichtlinien für allgemeine Baustähle, Feinkornbaustähle und ähnliche geregelt. Diese Regelung ist allerdings kein Rundumschlag für alle Stähle dieser Gruppierungen, sondern eine ganz genaue Definition bestimmter Stahlsorten. Für jede Stahlsorte, die nicht in dieser Norm aufgezählt ist, ist diese Norm nicht anzuwenden. Ist diese Stahlsorte auch in keiner anderen Norm geregelt, fällt sie in den bauaufsichtlich nicht geregelten Bereich und gilt baurechtlich als Sicherheitsrisiko.

Dieses Gedankenmodell gilt auch für Materialien wie Kunststoffprodukte, Bauschäume, Sondergewinde, Sonderschweißverfahren etc.

Alle Produkte, die nicht in einer Norm geregelt sind, also außerhalb des bauaufsichtlich geregelten Bereiches liegen, bedürfen einer Zustimmung im Einzelfall. Diese kann nach spezifischen Prüfaufwand durch eine Baubehörde erteilt werden. Diese Zustimmung gilt dann auch nur für den Einzelfall und führt nicht zu einem allgemein zugelassenem Bauprodukt.

Um mit neuen Produkten oder neuen Materialien im Bauwesen in den bauaufsichtlich geregelten Bereich zu gelangen gibt es die Möglichkeit der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen. Dafür muss zuerst ein Antrag bei dem *Deutschen Institut für Bautechnik* (DIBT) in Berlin auf Zulassung gestellt werden. Das DIBT erstellt eine Richtlinie zur Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, sowie einen Prüfungskatalog. Nach erfolgreicher Prüfung erteilt es dann eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, die Normencharakter hat. Somit ist das Produkt wieder im bauaufsichtlich geregelten Bereich.

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen sind meist mit einem hohen Prüfkostenaufwand und hohen Kosten für den Verwaltungsakt verbunden. Die Gültigkeit beträgt in der Regel 5 Jahre und kann danach für eine verringerte Verwaltungsgebühr um weitere 5 Jahre verlängert werden. Sollte sich in der Zwischenzeit der Stand der Technik geändert haben, so müssen gegebenenfalls weitere Prüfungen nachgereicht werden.

Dieses Vorgehen soll hier beispielhaft an rostfreiem Edelstahl dargestellt werden. Die Bemessung von Edelstahl würde vom Gedankenmodell am ehesten der Stahlbaurichtlinie DIN 18800 entsprechen, welche bekanntlich die Anwendung von Baustählen regelt. Jedoch sind diese Stähle nicht in dieser Norm enthalten. Aus diesem Grunde haben sich verschiedene Edelstahlhersteller zu einer Interessengemeinschaft zusammengeschlossen, die eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die Verwendung von nichtrostendem Edelstahl erwirkt hat. In dieser bauaufsichtlichen Zulassung wird geregelt, dass auf diese Edelstahlarten die DIN 18800 Gültigkeit hat. Überall wo die Zulassung von der DIN 18800 abweicht sind Sonderregelungen getroffen worden. Zum Beispiel wurde somit der 0,2% Dehngrenze von Edeltählen Rechnung getragen, Baustähle hingegen vollelastisches Verhalten bis zur Fließgrenze aufweisen. Außerdem sind in der Zulassung für Edeltähle auch Verarbeitungsrichtlinien geregelt, wie zum Beispiel die Schweißverfahren.

Da nicht alle nichtrostenden Edeltähle Einzug in die Zulassung erhalten haben, ist die Anwendung eines nicht aufgeführten Edeltahles problematisch, ebenso wie die Anwendung eines nicht aufgezählten Schweißverfahrens.

Als weiteres regelndes Element gibt es im Verkehrswegebau noch zwei Besonderheiten. Der Verkehrswegebau ist zu unterscheiden unter Straßenbau und Schienenwegebau. Jede dieser beiden Sparten hat wieder eigene regelnde Behörden.

Im Straßenbau gibt es verschiedene Stellen, die Zentrale Technische Vorschriften (ZTV), Richtlinien, Richtzeichnungen, allgemeine Rundschreiben und ähnliches für seine Gewerke im Auftrag des Bundes-Verkehrsministeriums herausgibt. Für Brücken z.B. werden alle zwei Jahre Richtzeichnungen herausgegeben, die die einzelnen Details an Brücken regeln.

Im Schienenwegebau gibt es aus der Geschichte heraus eine Besonderheit. Da die Bahnbaubehörden aus den Straßenbauverwaltungen hervorgegangen sind, hatten sie automatisch Bauaufsichtscharakter. Aus diesen Bahnbaubehörden entstand dann das Bundesbahnzentralamt, das sich mit diesen Prüfaufgaben, Richtlinien usw. beschäftigte.

Als jedoch die Bundesbahn eine Aktiengesellschaft wurde, hat sie als DB AG und Privatunternehmen das staatliche Recht auf Bauaufsicht verloren und es wurde eine eigene regelnde Behörde, das Eisenbahnbundesamt (EBA), ähnlich dem DIBT in Berlin, gegründet. Das EBA hält sich im Wesentlichen an die bauaufsichtlichen Zulassungen des DIBT, kann jedoch auch eigene Zulassungen für Baumaterialien und Bauprodukte in ihrem Bereich erteilen oder bestehende Zulassungen verschärfen. Dies macht insofern Sinn, dass an Gleisanlagen andere Anforderungen an Bauprodukte gestellt werden, als im allgemeinen

Bau. Jedoch führt diese Regelung auch wieder zu erhöhten Verwaltungsaufwand und Kosten bei der Einführung neuer Produkte.

3. Geschichte der Anwendung des Reibschweißens im Bauwesen

Anfang der 80er Jahre war das Reibschweißen im Bauwesen gänzlich unbekannt und wurde zumindest bauaufsichtlich geregelt noch nicht eingesetzt.

Zu dieser Zeit steckte der Lärmschutz aufgrund des geringeren Verkehrsaufkommens noch in den Kinderschuhen und nahm noch eine untergeordnete Rolle ein. Nur auf wenigen neugebauten Brücken wurden Lärmschutzwände geplant und errichtet. Die Verankerung dieser Lärmschutzwände wurde zu dieser Zeit recht stiefmütterlich angefasst und mit untauglichen Mitteln ausgeführt. Eine technisch saubere Lösung existierte damals noch nicht. So wurden feuerverzinkte Gewinderohrkonstruktionen einbetoniert, in die dann wieder Edelstahlverbindungselemente eingeschraubt wurden. Diese Kombinationen können jedoch bei Vorhandensein eines Elektrolyten zur Kontaktkorrosion führen, welcher in idealer Form durch Streusalze in wässriger Lösung auf Straßen vor allem im Winter vorkommt. Die Verankerungen jedoch aus Edelstahl herzustellen, davon wurde Abstand genommen, da diese aufgrund des verwendeten Materialgewichtes zu kostenintensiv gewesen wären.

Eine Besonderheit von Beton ist, dass die alkalischen Verhältnisse im Beton so sind, dass eine Korrosion nicht stattfinden kann. Lediglich am äußeren Rand, der sogenannten Betondeckung existiert ein anderer pH-Wert, der eine Korrosion möglich macht. Die Dicke dieser korrosionsgefährdeten Randschicht wächst jährlich durch die Carbonatisierung und Angriffe durch Umwelteinflüsse, vor allem Salze, an. Dies ist der Hintergrund, dass Betonstahl bei Stahlbetonbauteilen eine Betondeckung haben muss, damit der an sich rostende Betonstahl im Beton vor Korrosion geschützt ist.

Diese Besonderheit legt den Schluss nahe, eine kostengünstige Verankerung zu entwickeln, die in der randnahen Schicht und im Verschraubungsbereich aus Edelstahl, und in der korrosionsgeschützten Schicht aus einem kostengünstigen Baumaterial besteht, welches die Kräfte in den Beton rückverankert.

Als zweckmäßigstes Material hat sich der Betonstahl erwiesen, der einerseits recht preiswert ist, andererseits in der DIN 1045 geregelt ist, so dass die Kraftübertragung in den Beton statisch berechnet werden kann. Betonstahl ist ein Rundstahl mit hoher Streckgrenze und Rippen auf der Oberfläche, welche eine Krafteinleitung zwischen Beton und Stahl über Schubverbundkräfte ermöglicht (siehe Bild 2). Die einzige Schwierigkeit stellte sich dar, ein

vor allem sicheres gleichmäßiges, reproduzierbares und trotzdem kostengünstiges Fügeverfahren zwischen den beiden Materialien zu finden, damit eine Schwarz-Weiß-Verbindung sicher beherrscht werden kann.



Bild 2: Betonstahl mit seinen typischen Rippen

4. Der Weg bis zur Einführung

Herkömmlich geregelte Schweißverfahren in den DIN-Normen und Zulassungen waren Schmelzschweißverfahren wie das Metallschutzgas-Schweißen (MAG). Das MAG-Schweißverfahren stellte für eine solche Aufgabe kein geeignetes Schweißverfahren dar, da Besonderheiten für eine Schwarz-Weiß-Verbindung zu beachten sind und auch die Schweißnahtvorbereitung nicht ganz unproblematisch ist. Außerdem führt bei Einhaltung der Norm DIN 4099 Schweißen von Betonstählen das MAG-Schweißen bei einer Kehlnaht zu einem erheblich größeren erforderlichen Edelstahldurchmesser bei dieser Konstruktion.

Nach Abwägung aller Problematiken auch in metallurgischer Hinsicht fiel die Wahl schließlich auf das Reibschweißverfahren, welches lediglich den Nachteil besaß, dass es bauaufsichtlich nicht geregelt war, somit also im bauaufsichtlichen Bereich nicht einsetzbar war.

Betonstahl ist wie bereits erwähnt ein durch Normen geregeltes Bauprodukt, Edelstahl ein zugelassenes Bauprodukt.

Der Ansatz war also das Reibschweißen bauaufsichtlich in der Zulassung für Edelstahl als erlaubtes Fügeverfahren zum Fügen zwischen Edelstahl und anderen Stählen unterzubringen. Da die Zulassung wie bereits erwähnt in der Hand einer Interessengemeinschaft der Edelstahlproduzenten liegt, musste ein Partner ausfindig gemacht werden, der daran Interesse hat, das Reibschweißen als erlaubtes Fügeverfahren in die Zulassung zu übernehmen. Dieses stellte sich als aufwändiger als gedacht dar, da noch zusätzlich die Schwierigkeit hinzukam, dass das Reibschweißen im Bauwesen ein recht unbekanntes Schweißverfahren ist, welchem man skeptisch gegenüber stand.

Hierzu wurden 1985 etliche metallografische Untersuchungen durchgeführt, Schlibbilder erstellt, Zug- und Biegeversuche durchgeführt sowie Härteversuche.

5. Dauerschwingprobleme

Da Verankerungen auch bei Schienenwegesystemen benötigt werden, rief dies ziemlich bald das Bundesbahnzentralamt auf die Tagesordnung. Da Hochgeschwindigkeitszüge wie der ICE enorme Staudrücke vor sich herschieben und hinter sich einen Sog erzeugen, entstehen beim passieren von Lärmschutzwänden Schwingungen auf die Lärmschutzwand, welche an die Verankerungen weitergegeben werden. Aus diesem Grunde forderte die Deutsche Bundesbahn Dauerschwingnachweise für die Verankerung von Lärmschutzwandankern. Hierzu mussten Schwellversuche durchgeführt werden, die eine Oberspannung von 220 N/mm^2 und eine Unterspannung von 100 N/mm^2 bei zwei Millionen Lastwechseln nachweisen sollten. Als Besonderheiten sind hierbei anzumerken, dass rostfreier Edelstahl nur für vorwiegend ruhende Lasten zugelassen ist und die Oberspannung die $0,2\%$ Dehngrenze bereits überschreitet.

Diese Versuche wurden 1986 an der SLV-München ausgeführt. Die Reibschweißverbindung erwies sich somit als dauerschwinggeeignet für Schwelllasten und kann unter Berücksichtigung bestimmter Konstruktionsregeln als Verankerung für Lärmschutzwände der DB verwendet werden (siehe Bild 3). Das Bundesbahnzentralamt erteilte somit aufgrund seiner Zulassungsbefugnis eine Zustimmung zur Ausführung dieser Verankerungen.



Bild 3: Verankerung für eine Lärmschutzwand im Bereich der Deutschen Bahn AG

Nachdem der Antrag zur Erweiterung der Zulassung für rostfreien Edelstahl um das Reibschweißverfahren zeitnah gestellt wurde dauerte es weitere fünf Jahre bis 1991 das Reibschweißen mit fünf Zeilen in die Zulassung aufgenommen wurde. Ab diesem Zeitpunkt war das Reibschweißen im geregelten Bereich. In der Wartezeit dazwischen blieb immer nur die Möglichkeit der Zustimmung im Einzelfall oder des illegalen Einbaus.

6. Reibschweißen im Bauwesen heute

Heute ist das Reibschweißen auch im Bauwesen ein anerkanntes Schweißverfahren. So hat es mittlerweile Einzug gehalten in die DIN 1045 (Stahl- und Spannbeton-Norm), die DIN 18800 (Stahlbaunorm), sowie in die DIN 4099 (Schweißen von Betonstahl) und zwar vom Betonstahldurchmesser unbegrenzt.

Trotz dieser allgemeinen Anerkennung genießt das Reibschweißverfahren leider im Bauwesen nur eine geringe Popularität, so dass sehr kritische Fragen wie in den 80er Jahren heute immer noch auf der Tagesordnung stehen. Ein häufiger Fehler ist, dass für Reibschweißen einfach die gleichen geringen Spannungen angenommen werden wie zum Beispiel beim wesentlich schlechtere MAG-Schweißen.

Die Regelung in den Normen sieht immer noch wie die 1991 erschienene Zulassung vor, dass ein reibschweißender Betrieb einen Eignungsnachweis für Stahlbauten besitzen muss, sowie von gutachterlicher Seite fremdüberwacht sein muss.

Bislang ist das Hauptanwendungsgebiet für Reibschweißen im Bauwesen nach wie vor die Verankerungstechnik. Lärmschutzwandverankerungen haben dabei die größte Bedeutung (siehe Bild 6). Hier werden Verankerungen mit Gewindegrößen M 12 bis M48 verschweißt. Ein weiteres Anwendungsgebiet sind Telleranker, eine Verankerung die bei gleichzeitiger Zugübertragung eine wasserabdichtende Funktion haben. Diese werden eingesetzt, wenn Kräfte jenseits einer Abdichtung eingeleitet werden sollen. Im Brückenbau ist dies zwischen Kappe und Überbau der Brücke.

Außerdem werden Verankerungen für Masten bis Größe M56 im Reibschweißverfahren ausgeführt (siehe Bild 4/5). In den Richtzeichnungen für Lärmschutzwände LS 1 und LS 2 ist nun für die Verbindung zwischen Nichtrostenden Stählen und Betonstählen das Reibschweißverfahren als einzig zugelassenes Verfahren für den Brückenbau gefordert.



Bild 4: Reibgeschweißte Mastverankerung



Bild 5: Kreisförmige Mastverankerung



Bild 6: Sonderverankerung für Lärmschutzwände mit 14 Gewindeanschlüssen M30 reibgeschweißt

Präzisionsreibschweißen erschließt neue Anwendungsfelder

Prof. H. Goldau, Hochschule Magdeburg, Stendal

Dipl.-Ing. Ch. Behrend, H&B OMEGA Europa GmbH

1. Ausgangssituation und Bedarf bei den Unternehmen

Die permanente Forderung nach Steigerung der Produktivität in der produzierenden Industrie stellt hohe Anforderungen an zukünftige Fertigungssysteme. Die Ausgangssituation hinsichtlich Fertigungscharakteristika, die durch sinkende Großserien und komplexer werdende Produkte bei einer zunehmenden Zahl von Produktwechseln geprägt ist, erfordert die Flexibilisierung bestehender Maschinenkonzepte.

Die deutschen Werkzeugmaschinenhersteller müssen sich, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu behaupten und auszubauen, einerseits wachsenden Anforderungen hinsichtlich Qualität, Dynamik, Prozessführung und hoher Verfügbarkeit/ Prozesssicherheit stellen, andererseits wachsenden Anforderungen zur Flexibilität und Integration von Bearbeitungsschritten gerecht werden.

Für einzelne klein- und mittelständische Unternehmen des Werkzeugmaschinenbaus sind die genannten Aufgaben nicht allein zu bewältigen. Aus diesem Grund hat sich in Sachsen-Anhalt die Unternehmenskooperation „PIZ IF ROTA – Produktinnovationszentrum Integrierte Fertigungszelle für Rotationsbearbeitung“ zusammengefunden. Ziel der Unternehmenskooperation ist es, durch die Zusammenarbeit von Maschinenherstellern und -betreibern, Technologielieferanten und Forschungseinrichtungen die Kräfte und Kompetenzen zu bündeln und die Forschungs- und Entwicklungsarbeit gemeinsam durchzuführen. Die Unternehmenskooperation steht allen interessierten Unternehmen auch außerhalb der Region Sachsen-Anhalt offen.

Ausgehend von den Anforderungen der produzierenden Industrie ergeben sich Entwicklungsziele für die Unternehmen der Werkzeugmaschinenindustrie und die Forschungsinstitutionen im Bereich Produktionstechnik. Ein wichtiger Schlüssel zur Erreichung der definierten Entwicklungsziele ist die Verfahrensintegration.

Im Bereich der Rotationsbearbeitung sind Verfahren wie Reibschweißen, Ablängen und Zentrieren, HPC-Bearbeitungen sowie Schleifen und Finishen wichtige Technologien, um die traditionelle Bearbeitung auf Drehmaschinen zu einer Komplettbearbeitung zu ergänzen.

Darüber hinaus ist mit Blick auf die Entwicklung eines „Intelligenten Fertigungssystems“ zunächst die Integration von Sensorik und Aktorik zu bearbeiten. Darauf aufbauend ist die Erweiterung der Steuerung um „Intelligente Bausteine“ für Prozessführung, -kontrolle und Prozesssteuerung notwendig. Eine wichtige Rolle übernimmt dabei die Erweiterung der

Steuerung von einer reinen NC-Weg-Regelung auf eine NC-Kraft-Weg-Regelung. Schon im Bearbeitungsprozess sollten relevante Qualitätsparameter erfassbar und regulierbar sein. Ferner ist zum Werkstückhandling und Be- bzw. Entladen des Fertigungssystems Automatisierungstechnik notwendig und ebenfalls zu integrieren.

Für die Entwicklung und Erprobung spielt die „Virtuelle Werkzeugmaschine“ eine wichtige Rolle. Prozessmodellierungen und –simulationen können schon optimale Prozess- und Bearbeitungsvarianten vorhersagen. Dabei gilt es modellhaft das System „Werkzeugmaschine-Spannmittel-Werkstück-Werkzeug“ vorzuempfinden. Die Entwicklungsarbeiten lassen sich so zügiger und treffsicherer realisieren, der Gesamtaufwand der Entwicklung wird reduziert.

In einem realisierten Projekt wurde eine neuartige hochsensible adaptive hochdynamische Steuerung für kraftgeregelte Bearbeitungsprozesse entwickelt. Zu den kraftgeregelten Bearbeitungsprozessen zählen die Verfahren Reibschweißen und Finishen. Das neuartige Maschinen- und Steuerungskonzept gestattet die Weiterentwicklung des Rotationsreibschweißens zu einem Präzisionsfügeverfahren.

2. Definition des Begriffs Präzisionsreibschweißen

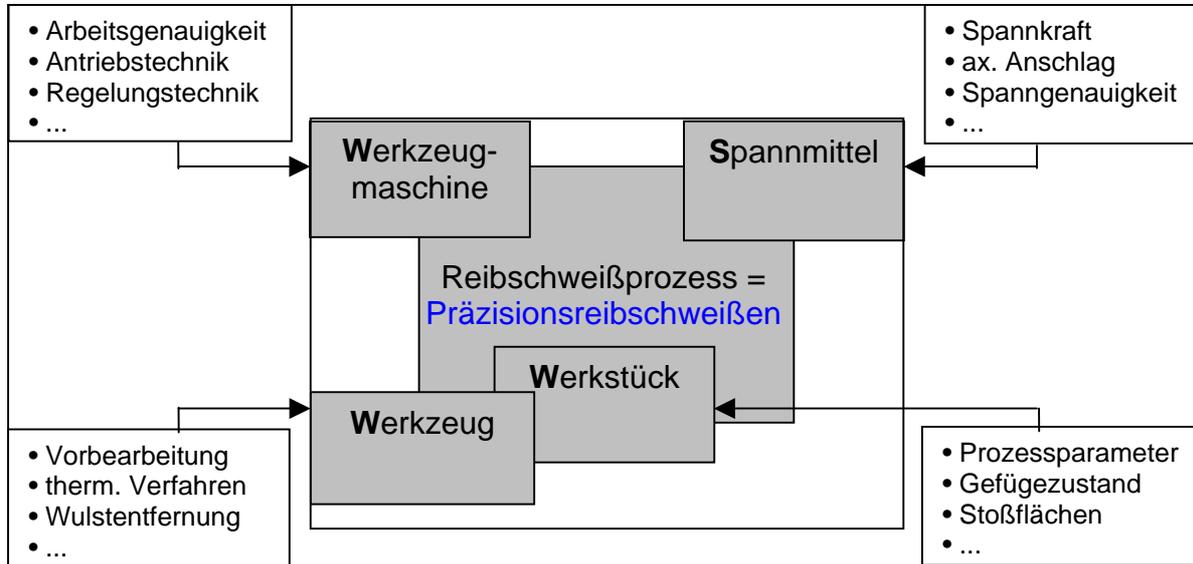
Reibschweißen - ein Pressschweißverfahren zur Herstellung hochwertiger Verbindungen an vorwiegend rotationssymmetrischen Verbindungsquerschnitten.

Präzisionsreibschweißen - ein Pressschweißverfahren mit einer hohen Fertigungsgenauigkeit zur Herstellung von hochpräzisen Bauteilen, unter Einhaltung von geforderten Qualitäten. In internationaler Literatur beschreibt dieser Begriff bisher das Reibschweißen in einem Durchmesserbereich von 2...6 mm. Unterhalb 2 mm wird oft der Begriff Mikroreibschweißen verwendet. Präzisionsreibschweißen ist aber weit aus mehr als nur das Reibschweißen in einem bestimmten Durchmesserspektrum, deshalb ist dieser Begriff etwas irrtümlich gewählt. Vielmehr handelt es sich um ein Verfahren, dass nur unter Einhaltung verschiedenster Faktoren ermöglicht werden kann.

Das Präzisionsreibschweißen findet zunehmend überall da Anwendung, wo Bauteile eine hohe Form- und Maßhaltigkeit besitzen müssen. Auf Grund ihres Einsatzes sind die Bauteile hohen Drehzahlen ausgesetzt, müssen lagegenau zueinander sein oder die Teile müssen längengenaue Verbindungen realisieren, die enge Toleranzvorgaben zu erfüllen haben. Die wachsenden Anforderungen aus der Industrie setzen neue Maßstäbe in der Fertigung. Höchste Anforderungen an Genauigkeit und an definierte Werkstoffeigenschaften eines Bauteiles stehen im Blickpunkt des Präzisionsreibschweißens. Praktische Anwendungsfälle

liegen z.B. in der Werkzeugindustrie, Motorentechnik und Antriebstechnik. Es gilt jedoch, zusätzlich neue Anwendungen zu erschließen.

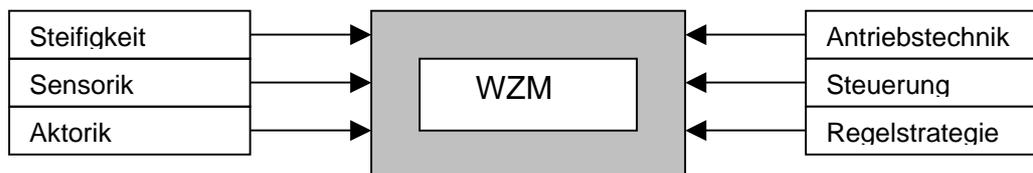
Mit Hilfe des Modells Werkzeugmaschine-Spannmittel-Werkstück-Werkzeug, kurz **WSWW**, wird der Begriff Präzisionsreibschweißen näher beschrieben.



Der Hauptbestandteil beim Reibschweißen stützt sich im Wesentlichen auf das Modell **WSW**. Unmittelbar am Reibschweißprozess beteiligen sich nur die Fertigungsmittel Werkzeugmaschine, Spannmittel und Werkstück. Trotzdem ist das Werkzeug beim Reibschweißprozess ein wichtiger Bestandteil zum Fertigen präzisionsgerechter Bauteile. Speziell die Vorbereitung der Fügezonen wird durch die Verfahrens- und Werkzeugwahl beeinflusst.

Präzisionsmaschine

Eine spezielle Maschine, die Multivalente Vertikale Reibschweißmaschine MVR 200 wurde zum Präzisionsreibschweißen entwickelt.



Die Maschine (Bild 1) arbeitet nach dem AFC Adaptive Force Control Prinzip. Das Prinzip beinhaltet eine kraftgeregelte Prozessführung. Diese ermöglicht, dass die Prozesskräfte im Echtzeitbetrieb in einer hochdynamischen CNC Steuerung Siemens 840D verarbeitet werden. Das AFC – Prinzip ist beim Reibschweißen für einen breiten Kraftbereich umsetzbar. Durch diese hoch sensible Einflussnahme auf den Prozess ermöglicht die Maschine eine hohe Wiederholgenauigkeit der Parameter. Die Drehspindel ist als Direktantrieb ausgelegt und ermöglicht ein äußerst hoch präzises drehwinkelgenaues Positionieren. Die Kinematik garantiert durch die servo-elektrische, kraftgeregelte und wegzeit-gesteuerte Vorschubeinheit ein mikrometergenaues Positionieren der Linearachse.

Somit werden hochpräzise Längenverkürzungen erreicht. Eine Werkzeugschlitteneinheit ermöglicht eine Vor- und Nachbearbeitung der Bauteile. Der nach dem Reibschweißen entstandene Wulst wird durch einen Drehvorgang direkt auf der Maschine abgearbeitet.

Weiterhin kann auf dieser Maschine durch den Einsatz eines Kreuzschiebetisches das Reibrührschweißverfahren ermöglicht werden.

Leistungsdaten der Maschine:

Max. Drehzahl :	4000 min ⁻¹
Max. Stauchkraft:	200 kN
Max. Vorschubgeschw.:	10 m/min
Bremszeit der Spindel:	300 ms
Max. Bauteillänge:	720 mm
Max. Durchmesser	
Vollquerschnitt:	45 mm
Rohr (bei s=5 mm):	95 mm
Breite:	ca. 2000 mm
Tiefe:	ca. 3200 mm
Höhe:	ca. 3800 mm
Gesamtgewicht:	ca. 20 t



Bild 1: Multivalente Vertikale Reibschweißmaschine MVR 200

Die Steifigkeit der Werkzeugmaschine hat einen direkten Einfluss auf die Arbeitsgenauigkeit und so auf die Präzision einer Reibschweißung. Das Maschinengestell der MVR 200 wurde für die auftretenden Prozessbedingungen virtuell untersucht und es wurde durch FEM Berechnungen optimiert.

Die Auswahl des **Spannmittels** wird durch die Geometrie der Bauteile bestimmt. Die Spannmittel beeinflussen direkt die Qualität der Reibschweißverbindung. Gerade beim Präzisionsreibschweißen, es sollen jetzt Fertigteile miteinander verbunden werden, muss ein sicheres und genaues Spannen, ohne die Oberfläche zu beschädigen, realisiert werden.

Präzisionsbauteil

Die Entwicklung des Reibschweißens zu einem Präzisionsfügeverfahren gestattet es, Bauteile neu zu gestalten und gibt somit wesentliche Impulse zur Realisierung von neuen rationellen Prozessketten. Jetzt gelingt es, durch neue Möglichkeiten Bearbeitungsprozesse zu realisieren und sehr effektive Prozessketten zu gestalten. Ein sicherer Bearbeitungsprozess vom Rohteil zum Fertigteil mit den Optimierungsgrößen Qualität, Zeit und Kosten steht dabei im Mittelpunkt der Betrachtungen (Bild 2).

In den weiteren Ausführungen sollen Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen des weiterentwickelten Verfahrens Reibschweißen aufgezeigt werden und neue Anwendungsfelder zugeordnet werden.



Bild 2: Werkstück -Technologie als komplette Prozesskette

3. Anwendungen

Ein Beispiel zur Anwendung des Präzisionsreibschweißens ist die Fertigung einer Getriebehohlwelle. In Zusammenarbeit mit der H@B Omega GmbH, der Benteler Stahl/Rohr GmbH und dem Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik wurde eine Technologie zur rationellen Herstellung einer Getriebehohlwelle erstellt und erste Prototypen hergestellt.

Die Ausgangssituation bestimmt der Stand der Technik. Das Gewicht von Wellen im Fahrzeuggetriebe (Antriebs-, Vorgelege- und Abtriebswelle) summiert sich auf bis zu 15 kg. Bei der Verwendung von Hohlwellen sind bis zu 30% Materialeinsparmöglichkeiten vorhanden, da sich die Beanspruchung auf oberflächennahe Bereiche konzentriert.

Bisherige Technologieansätze zur Herstellung von Hohlwellen

- Fließpressen und Reibschweißen,
- Radial-Axial-Umformen (Stauchkneten),
- Stauchen / Tieflochbohren / Reduzieren ,

lösen verschiedene Problematiken wie Genauigkeiten, Wuchtgüte , Prozessstabilität nicht zufrieden stellend.

Der Technologieansatz zur Herstellung der Getriebewelle **HYPERLIGHT (Hybride Prozesskettenverfahren** für den **Leichtbau integrierter Getriebe-Hohlteile)** gestattet erstmals eine lokale Optimierung der Wellenabschnitte. Konstruktiv können die Formen

beanspruchungsgerecht mit hoher Designfreiheit gestaltet werden. Unterschiedlichste Umformtechniken für die Rohrabschnitte oder für die Zahnräder können eingesetzt werden. Werkstoffseitig können die Materialien auf lokalen Belastungen abgestimmt werden. Technisch-technologisch kann der konstruktive Leichtbau mit dem kostenoptimalen Fertigungsverfahren umgesetzt werden. In einer der letzten Bearbeitungsfolgen werden die Wellenabschnitte mit Hilfe des Präzisionsreibschweißens zu einer Gesamtwellen verbunden.

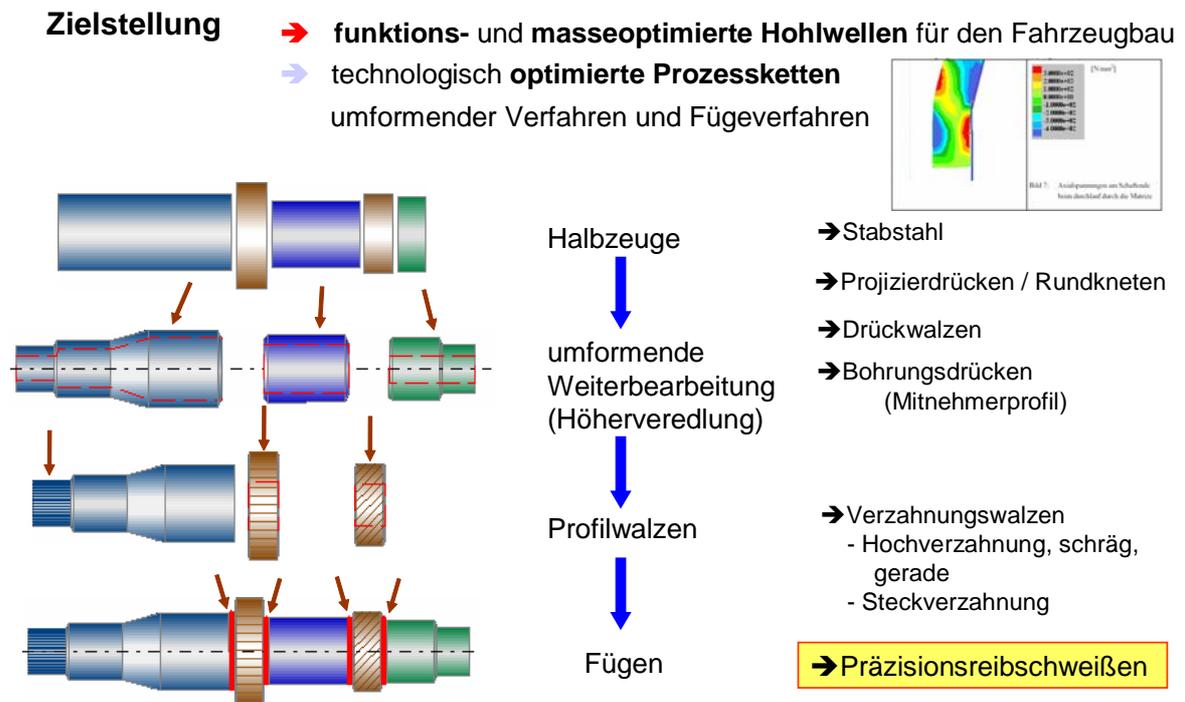


Bild 3: Schritte der Fertigung einer Getriebewelle

Bei diesem neuen Bauteil Getriebewelle kommen die Vorteile des Präzisionsreibschweißens zur Anwendung (Bild 4).

Die durchgeführten Versuchsreihen zeigten, dass eine mikrometeregenaue Positionierung der Vorschubachse axiale Toleranzen kleiner 10µm zulassen. Der direkte Spindeltrieb gewährleistet die sichere winkelsekundengenaue Positionierung der Spindelachse. Die Prozesssteuerung ermöglicht eine konstante Prozessführung und eine direkte In-Prozess-Qualitätsüberwachung.

Ein Kundennutzen ergibt sich aus den Vorteilen:

- leichtbauoptimierte Auslegung der Getriebewelle
 - Auswahl des Werkstoffes und zugehörige Wärmebehandlung für einen Wellenabschnitt anhand des konkreten Lastfalls
 - beanspruchungsgerechte Gestaltung mit gezielter Ausnutzung der fertigungstechnischen Möglichkeiten
- Kosten- und Zeitreduktion durch spezialisierte Fertigung der Wellenabschnitte

- Verminderung des Ausschusses durch separates Einsatzhärten der Zahnräder
- Senkung der Kosten für die Herstellung der Verzahnung durch umformtechnische Herstellung
- Hohe Kosteneffizienz durch den Einsatz von hochfesten Lufthärtewerkstoffen
- Kurze und sichere Prozesskette.

Mikrometergenaue Positionierung der Vorschubachse erlaubt höchste Präzision und Reproduzierbarkeit beim Verkürzen der Bauteile

alt: Abw. im Bereich mehrer 10tel Millimeter

Winkelsekundengenaue Positionierung der Spindelachse erlaubt Reibschweißen unrunder Bauteile mit höchster Präzision

alt: in Abh. vom Teiledurchm. 0,5...2 (3)° mgl.

Sensible Prozessregelung im Echtzeitbetrieb (derzeit im 1ms-Takt)

realisiert die Prozessüberwachung und gestattet eine In-Prozess-Qualitätsüberwachung

Das Reibschweißen kann mit diesem System erstmals zum **Präzisionsfügen von Fertigteilen** eingesetzt werden.

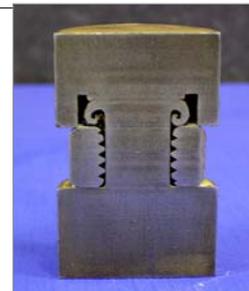
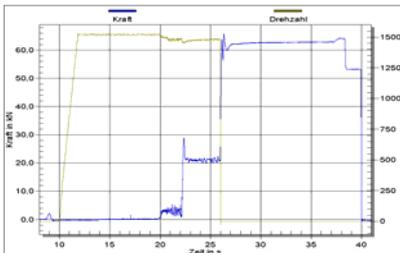
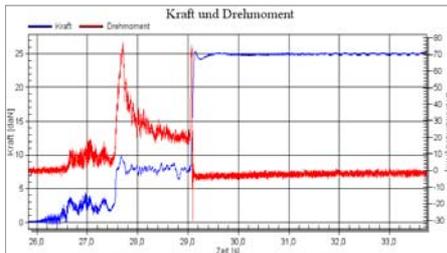
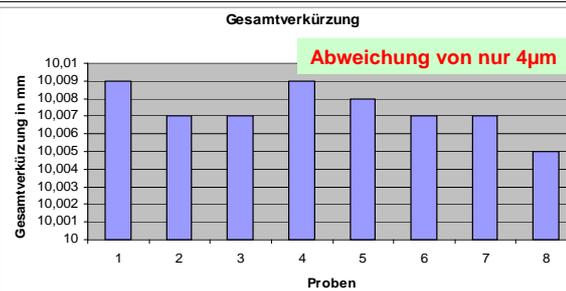


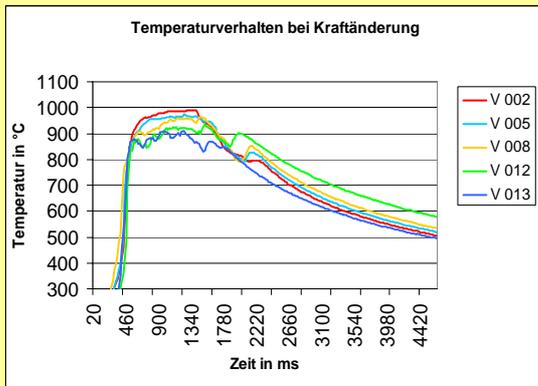
Bild 4: Genauigkeiten beim Präzisionsreibschweißen

4. Zusammenfassung

Neue Maschinenkonzepte gestatten die Weiterentwicklung der Reibschweißens zu einem Präzisionsfügeverfahren. Die Anwendungen für das Rotationsreibschweißen erweitern sich. Hochgenau lassen sich Fertigteile fügen. Durch die optimierte Werkstoffauswahl und durch eine angepasste Prozessführung werden der Bereich der Fügezone gezielt beeinflusst.

Das Reibschweißen ist ein Teilprozess in der Fertigungsfolge zur Herstellung eines Produktes. Innovative Fertigungsabläufe verlangen eine ganzheitliche Technologielösung.

Modellbildung – Neue Anwendungen? Welche technischen und technologischen Voraussetzungen?



Prozessgrößen:

Drehmoment; Vorschubweg, -geschwindigkeit, -beschleunigung; Temperatur, Zeit, Werkstoffeigenschaften; Geometrie - bedingungen; ...?

Stellgrößen:

Axialkraft; Zeit;

Reibgeschwindigkeit (n)

(Geometrie, Werkstoff, Oberflächenstruktur)

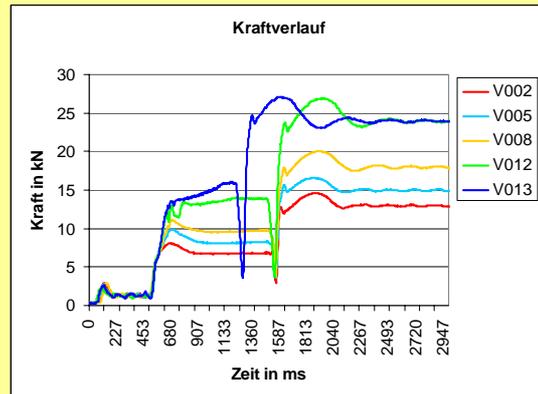


Bild 5: Prozessmodell Präzisionsreibschweißen

Die Weiterentwicklung der Maschinen- und Prozesstechnik verlangt die Überarbeitung der Verfahrensmöglichkeiten und –grenzen des Rotationsreibschweißens.

- [1] Christian Behrend
Diplomarbeit „Einsatzmöglichkeiten und –grenzen des Rotationsreibschweißens mit AFC – Vorschubantrieb“
FH Magdeburg Fachbereich Maschinenbau, 2004
- [2] Nadine Laval
Diplomarbeit „Konzipierung und Gestaltung eines Reibschweißautomaten für die Verbindung von Werkstücken aus Kupfer und Manganin“
FH Magdeburg Fachbereich Industriedesign, 2005
- [3] Stefan Schluricke
Diplomarbeit „Ermittlung der technischen Möglichkeiten zur Herstellung lage- und längengenaue Reibschweißverbindungen“
FH Magdeburg Fachbereich Maschinenbau, 2006
- [4] Michael Thiele
Diplomarbeit „Temperatur-Zeitverhalten beim Rotationsreibschweißen“
FH Magdeburg Fachbereich Maschinenbau, 2006
- [5] Uwe Diekmann
CC-Innovation, Getriebehohlwelle
Vortrag, 19.Juli 2006

Hochgeschwindigkeitsreibschweißen von metallischen Werkstoffen

Dipl.-Ing. Fritz Luidhardt, Harms & Wende GmbH & Co. KG

1. Reibschweißen von metallischen Werkstoffen

1.1. Einleitung

Der Drehzahleinfluss auf eine Schweißaufgabe ist eine oft vernachlässigte und dadurch unbekannte Größe. Es lassen sich innerhalb eines sehr weiten Drehzahlbereichs Reibschweißverbindungen erzielen. Bei korrekter Einstellung und Wahl der Parameter ergeben sich jedoch viele Vorteile, die eine hochwertige Verbindung und einen robusten Schweißprozess ermöglichen.

Im Nachfolgenden soll der Einfluß der Drehzahl auf eine Rotationsreibschweißverbindung näher dargestellt werden.

1.2. Parameter und Drehzahl

Allgemein wird das Reibschweißen wie folgt definiert:

„Beim Reibschweißen werden Schweißungen im festen Zustand erzeugt, indem ein Bauteil relativ zu und in Kontakt mit einem anderen zu fügenden Bauteil bewegt wird, um Wärme an den Stößflächen zu erzeugen. Die Schweißung wird durch Aufbringung einer Kraft während oder nach dem Aufheben der Relativbewegung fertiggestellt.“

Hierdurch lassen sich für das Rotationsreibschweißen die notwendigen Parameter definieren:

- Drehzahl
- Kraft
- Zeit
- Bauteilverkürzung

Maßgebend für die Reibverhältnisse ist die Relativgeschwindigkeit zwischen den Reibflächen, die als Tangentialgeschwindigkeit $v(n, r)$ neben der Drehzahl (n) auch von der Bauteildimension (Durchmesser bzw. Radius) abhängt.

Dabei gilt:

$$v(r, n) = 2 \pi \cdot r \cdot n \text{ bzw. } v \sim r \cdot n$$

mit v [m/s], n [1/min = 1/60s], r [mm = m/1000].

Für unterschiedliche Arbeitsdrehzahlen beim Reibschweißen gilt

$$v \sim n$$

Wird die Drehzahl verdoppelt, so wird die Relativgeschwindigkeit verdoppelt. Im Zentrum der Drehbewegung ist die Relativgeschwindigkeit Null. Über dem Querschnitt nimmt die Relativgeschwindigkeit linear mit dem Radius zu. Die tangentielle Relativgeschwindigkeit am Außendurchmesser wird als "Umfangsgeschwindigkeit" bezeichnet.

Für die Umrechnung einheitlicher Relativgeschwindigkeiten ($v_1 = v_2$) auf unterschiedliche Dimensionen gilt:

$$n_2 = n_1 (d_1/d_2).$$

D.h. eine vergleichbare Relativgeschwindigkeit (Umfangsgeschwindigkeit) wird bei Verdoppelung des Durchmessers durch eine Halbierung der Drehzahl erreicht.

Die Umrechnung der Drehzahl auf veränderte Durchmesser anhand gleicher Umfangsgeschwindigkeiten ist beim Reibschweißen jedoch nur für dünnwandige Rohrquerschnitte gleicher Wanddicke näherungsweise korrekt.

Bei Vollquerschnitten liegen – vom Radius abhängig – sehr unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten und Reibbedingungen über dem Querschnitt sowie veränderte Verhältnisse für die Plastifizierung und Wärmeleitung vor.

2. Einfluß der Drehzahl auf das Drehmoment und den Reibschweißvorgang

Unter der Annahme, dass Drehzahl und Kraft konstant gehalten werden, ergibt sich der Zusammenhang zur Energieeinbringung.

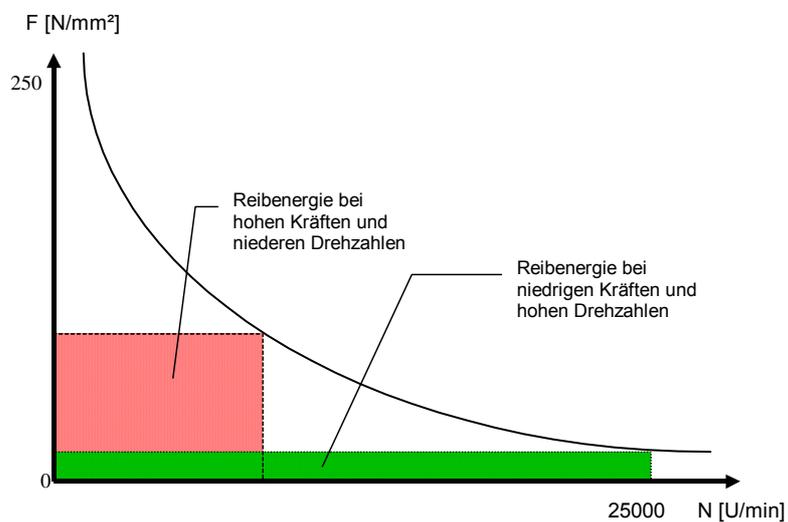
$$F_r = \mu \cdot F_n$$

Mit Reibkraft F_r , Reibkoeffizient μ , Normalkraft F_n (F_n =Umgangssprachlich Reib/Stauchkraft von Reibschweißmaschinen)

Die Reibenergie entspricht dabei:

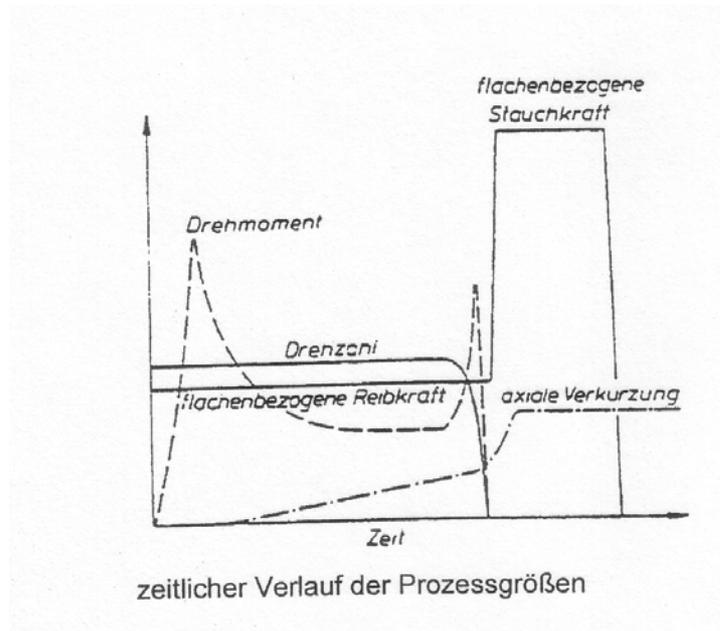
$$W_r = F_r \cdot l$$

Mit l gleich dem zurückgelegten Reibweg bzw. der Drehzahl.



Zusammenhang Drehzahl/Kraft unter idealen Bedingungen

Diese Darstellung ist jedoch nur korrekt bei μ als konstantem Wert. Beim Reibschweißen ist dieser Wert jedoch starken Veränderungen unterworfen. Eine übliche Drehmomentkurve bei einem Rotationsreibschweißvorgang sieht folgendermaßen aus



Das Drehmoment und damit der Reibkoeffizient ist im zeitlichen Verlauf des Reibschweißvorgangs starken Veränderungen unterworfen. Dies ist bedingt durch die Erwärmung und damit Änderung der Materialeigenschaften.

Besonders hervorzuheben sind die Drehmomentspitzen, die zu Beginn und zu Ende entstehen. Diese sind für die Auslegung der Maschine, das Spannen der Bauteile und auch für die Belastung der Bauteile von großer Bedeutung.

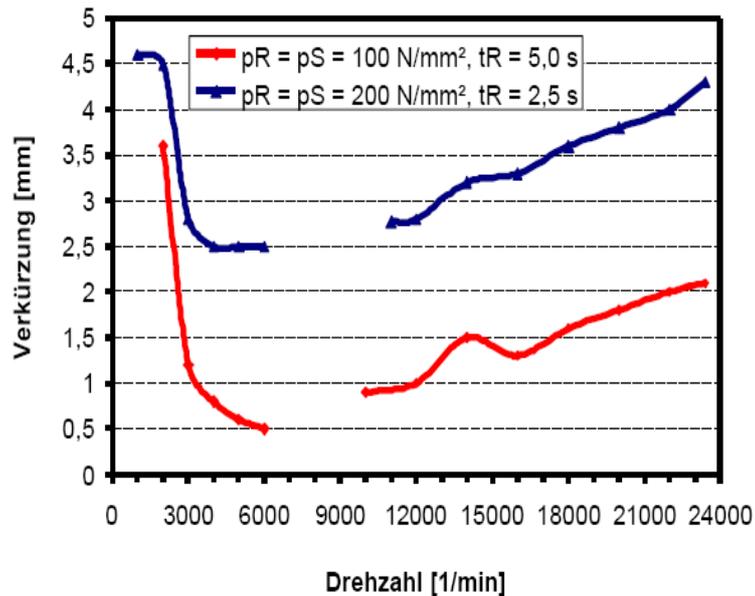
Es hat sich gezeigt, dass die Drehzahl während des zeitlichen Verlaufs einen sehr starken Einfluss auf das Drehmoment und damit den Reibkoeffizient ausübt.

Dies soll im folgenden exemplarisch an 2 Beispielen verdeutlicht werden

2.1. Zusammenhang Drehzahl und Bauteilverkürzung

Die Drehzahl steht in einem Zusammenhang zur Bauteilverkürzung und damit auch zur umgesetzten Energie in der Fügezone.

Die unten dargestellte Grafik zeigt den Einfluss der Drehzahl auf die Verkürzung anhand einer symmetrischen Verbindung mit $D=7,2$ mm



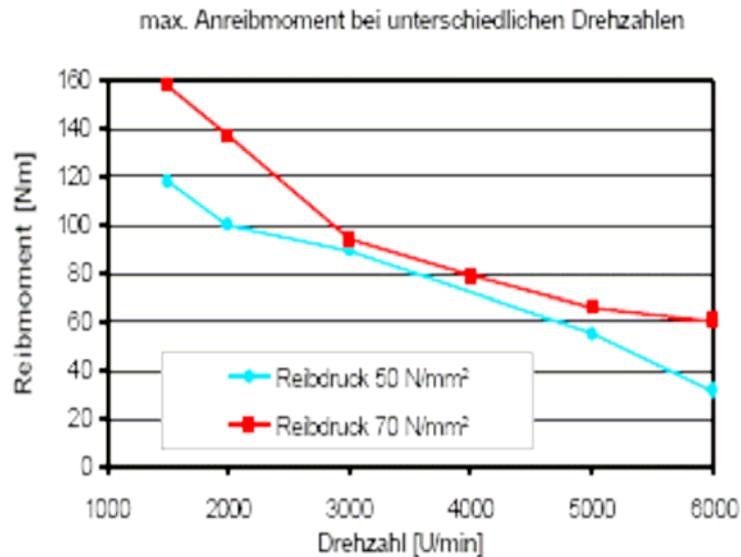
Die Randbedingungen bei diesem Versuch waren Reibdruck pR gleich Stauchdruck pS , schnellstmögliche Bremse, Drehzahl 1.000 – 6.000 U/min, KUKA RS4E; Drehzahl 10.000 – 23.400 U/min, H&W RSM200, Quelle: SLV München

Bei steigender Drehzahl nimmt die Bauteilverkürzung im unteren Drehzahlbereich deutlich ab. Nach Erreichen eines Minimums ist mit höheren Drehzahlen eine Zunahme zu beobachten.

Nicht berücksichtigt ist dabei die für eine gute Verbindung einzustellende Reibzeit. Grundsätzlich zeigt sich, dass bei höheren Drehzahlen kürzeren Reibzeiten gearbeitet werden kann.

2.2. Einfluß der Drehzahl auf das Anreibmoment

Deutliche Auswirkungen durch veränderte Drehzahlen/Relativgeschwindigkeiten ergeben sich bei großen Durchmessern oder bei kurzen Reibzeiten, d.h. grundsätzlich für jede Schweißaufgabe bei Prozeßbeginn in der sog. Anreibphase – bei großen wie kleinen Querschnitten.



Untersuchungen der Reibfläche an unlegiertem Stahl haben gezeigt, dass bei Prozeßbeginn die Reibung und Plastifizierung nicht gleichzeitig auf dem ganzen Querschnitt einsetzt. Erste Reibspuren zeigen sich, abhängig von den vorliegenden Arbeitsbedingungen auf bestimmten Radien –erst allmählich breiten sich die Reibungsvorgänge über den ganzen Querschnitt aus. Wird der Drehzahleinfluss selektiert, so liegt die Relativgeschwindigkeit mit den effektivsten Reibbedingungen bei niedrigen Drehzahlen am Außendurchmesser. Durch eine Drehzahlerhöhung wird eine vergleichbare Relativgeschwindigkeit bei kleineren Radien erreicht, weil dann dort eine vergleichbare Relativgeschwindigkeit für entsprechende Reibungsvorgänge vorliegt.

Deshalb kann es, insbesondere für bestimmte Werkstoff- oder Bauteilgruppen, vorteilhaft sein, den Bereich idealer Relativgeschwindigkeit durch die Optimierung der Drehzahl auf dem Schweißquerschnitt geeignet radial zu plazieren – mehr innen durch höhere Drehzahl oder mehr außen durch niedrigere Drehzahl.

Dadurch lässt sich nicht nur die Wärmeeinbringung und -verteilung gezielt beeinflussen – speziell bei großen Querschnitten. Auch das (An-)Reibmoment, eine spanntechnisch oft kritische Größe, hängt wesentlich davon ab, in welchem radialen Abstand vom Drehzentrum die intensivsten Reibungsvorgänge stattfinden und der größte Reibwiderstand wirksam wird.

Durch Drehzahlerhöhung können diese Bereiche ggf. zum Drehzentrum verschoben und das Reibmoment reduziert werden. An Serienteilen, bei denen auf die Abarbeitung des Schweißwulstes verzichtet wird, spielt die Beschaffenheit der Wulstoberfläche eine Rolle. Eine glattere Wulstoberfläche wird bei Stahl- und bei Aluminiumwerkstoffen bei höheren Drehzahlen erzielt. Diese Optimierungspotentiale des Drehzahleinflusses auf die

Wärmeeinbringung, verringerte mechanische Belastungen und eine verbesserte Nahtqualität - durch den Reibvorgang - ist bisher für die wichtigen Werkstoff- und Bauteilgruppen nicht untersucht.

3. Auswirkungen auf den Reibschweißvorgang im Detail

Für den Anwender stellt sich die Frage welche prozessspezifischen Veränderungen sich beim Einsatz von hohen oder niedrigen Drehzahlen ergeben.

Im Überblick stellt sich dies wie in der folgenden Grafik dar. Diese Darstellung bezieht sich dabei auf die momentan üblichen und am Markt verfügbaren Anlagen.

Umlaufgeschwindigkeit ↓	Umlaufgeschwindigkeit ↑
Anreibmoment ↑	Anreibmoment ↓
Reibungsintensität ↑	Reibungsintensität ↓
Gleiteffekte ↓	Gleiteffekte ↑
Verkürzungsgeschwindigkeit ↑	Verkürzungsgeschwindigkeit ↓
Rotationsenergie ↓	Rotationsenergie ↑
Reibverkürzung ↑	Reibverkürzung ↓
Stauchverkürzung ↓	Stauchverkürzung ↑
Gesamtverkürzung ↑	Gesamtverkürzung ↓
Reibzeit ↓	Reibzeit ↑
Reibschweißwulst rauher	Reibschweißwulst glatter
Reibbeginn eher außen	Reibbeginn im Zentrum

3.1. Veränderte Anreib- und Reibmomente

Diese erlauben den Einsatz kleinerer Antriebsmotoren und einfachere Spanntechnik. Das Anreibmoment ist beim Reibschweißen mit höheren Umlaufgeschwindigkeiten geringer. Es bilden sich ballige, leicht überwölbte Reibflächen. Dadurch bleibt das Reibmoment begrenzt und es wird ein guter Selbstreinigungseffekt der Fügezone auch unter geringer

Gesamtverformung erzielt. Die Anreibphase kann durch den Einsatz höherer Reibdrehzahlen verkürzt werden.

Die Rotationsenergie ist bei höheren Umlaufgeschwindigkeiten (bei gleicher Spindelmasse) größer. Dadurch besteht die Möglichkeit, auch mit niedrigen Prozesskräften die erhöhte Rotationsenergie durch einen verzögerten Bremsbeginn in eine gesteigerte Verkürzung (Energieeinbringung) umzusetzen. D.h. die größere Rotationsenergie aus einer höheren Reibdrehzahl kann bereits bei niedrigen Anpreßdrücken in Verkürzung (Reibungsenergie) umgesetzt werden. Deshalb ist es möglich, durch den Einsatz sehr hoher Reibdrehzahlen und entsprechender Spanntechnik eine mobile Reibschweißanlage für kleine Fügequerschnitte zu verwenden.

3.2. Anpreßkräfte

Theoretisch ergeben sich vergleichsweise niedrige Anpreßkräfte für eine geringere mechanische Belastung der Bauteile. Dadurch würde eine leichtere Bauart der Reibschweißmaschinen ermöglicht.

Mit Erhöhung der Reibdrehzahl nimmt die Plastifiziergeschwindigkeit (vergleichbar einer Druckreduzierung) durch Gleiteffekte ab. Dies ist durch eine Reibdruckerhöhung zu kompensieren. Das Reibschweißen mit hohen Drehzahlen kann eingesetzt werden, um längere Reibzeiten (z.B. Härtereduзierung) zu erzielen. Für vergleichbare Prozesszeiten ist eine erhöhte Drehzahl mit erhöhten Prozesskräften zu kombinieren. D.h. beim Reibschweißen mit hohen Drehzahlen ist tendenziell auch mit höheren Reibdrücken zu arbeiten. Eine Absenkung des Reibdruckes durch erhöhte Drehzahlen ist daher nicht sinnvoll.

Die Möglichkeit des Reibbolzenschweißens auf dünne Bleche ohne Hinterstützung ist deshalb nur für kleinere Fügequerschnitte ($a < 5$ mm) und größere Blechdicken ($t_{\min} = 2$ mm) zu erwarten.

3.3. Konzentrierte Wärmeeinbringung

Durch höhere Reibdrehzahlen ist die Wärmeeinbringung mehr auf die Mitte der Fügeebene konzentriert. Durch höhere Umlaufgeschwindigkeiten bei konstanter Reibkraft verlängert sich jedoch die Zeit, bis der vollständige Reibquerschnitt zu glühen beginnt. Durch den Einsatz höherer Umlaufgeschwindigkeiten kommt es nicht zu den typischen Reibungsvorgängen mit starker Durchmischung und zügiger Verkürzung der Bauteile, sondern zu Schleif und Schmiereffekten mit geringerer Wärmeerzeugung, langsamer Verkürzung und entsprechend langer Reibzeit. Begünstigt werden diese Effekte durch die Kombination von hohen Drehzahlen mit niedrigen Anpreßdrücken. Bei gleichem Reibweg vergrößert sich dadurch

die Ausdehnung der Wärmeeinflusszone. Bei erhöhten Prozesskräften und hohen Umlaufgeschwindigkeiten zeigen sich Gleiteffekte in der Reibphase erst nach längerer Reibzeit. D.h. durch die Kombination von hohen Drehzahlen mit erhöhten Anpresskräften ist es möglich, eine oberflächennahe konzentrierte Wärmeeinbringung und damit eine geringere thermische Wärmebelastung der Bauteile zu erzielen.

3.4. Bauteilverkürzung und Wulst

An größeren Querschnitten erfolgt der Abrieb mehr aus dem Bauteilzentrum. Dadurch ist bereits bei einer geringeren Verkürzung der Bauteile ein guter Selbstreinigungseffekt der Fügeflächen zu erzielen. An Serienteilen, bei denen auf die Abarbeitung des Schweißwulstes verzichtet wird, spielt die Beschaffenheit der Wulstoberfläche eine große Rolle. Der Reibschweißwulst (leg.- und unlegierter Stahl) bildet sich durch eine höhere Umlaufgeschwindigkeit glatter aus. Durch eine höhere Reibdrehzahl in Kombination mit einem erhöhten Reibdruckniveau (bei reduziertem Stauchdruck) kann dies noch verstärkt werden.

Im Gegensatz zu Stahlwerkstoffen steigt die Gesamtverkürzung mit steigender Umlaufgeschwindigkeit bei Aluminiumlegierungen an. Der Reibschweißwulst wird z.B. bei AlSi1MgMn durch eine Zunahme der Reibdrehzahl rauher.

3.5. Schweißbeignung

Bei verschiedenen Werkstoffpaarungen wie St/St oder Al/Al können die Reibbedingungen nicht geeignet angepasst werden, wenn nur die Kraft variabel ist – nicht aber die Drehzahl. Gleiches gilt ebenso für unterschiedliche Bauteildimensionen, die auf einer Maschine mit fester Drehzahl geschweißt werden sollen. Die Festschweißzahl ist in der Regel ein Kompromiß, hauptsächlich für Anwendungen aus unlegiertem Stahl. Für häufig geschweißte Werkstoffgruppen und Geometrievarianten wird eine variabel einstellbare Reibdrehzahl (auf einem höherem Niveau) sowohl die Flexibilität der Reibschweißanlage als auch die Schweißbeignung (bzw. die Qualität der Reibschweißung) verbessern.

Im Gegensatz zu Stahlwerkstoffen steigt die Gesamtverkürzung mit steigender Umlaufgeschwindigkeit bei Aluminiumlegierungen an. Der Reibschweißwulst wird durch eine Anhebung der Reibdrehzahl rauher, deshalb ist der Einsatz hoher Drehzahlen bei Aluminium nur bedingt von Vorteil.

3.6. Unterschiedliche Querschnitte

Der große Querschnitt kann in der Regel nicht ausreichend durchgewärmt werden. Mit einem Wärmeimpuls (pR , n) gelingt es aber, ein Übergewicht von eingebrachter zu abgeführter Wärme auch lokal begrenzt am dickeren Querschnitt zu erzeugen und dessen lokale Plastifizierung an der Reibzone zu ermöglichen. Der kleinere Querschnitt dringt dabei unter extremer Eigenverkürzung geringfügig in den dickeren Querschnitt ein. Es bildet sich eine in den dickeren Querschnitt gewölbte fehlerfreie Verbindungszone. Äußere Kennzeichen dieser richtig ausgeführten Schweißung ist ein schräg zwischen dem Querschnittsabsatz und unmittelbar an der Stirnfläche des dickeren Teils austretender Primärwulst sowie ein Sekundärwulst, der den Schweißnahtbereich außen als flacher Kranz ringförmig umschließt. Eine Anhebung der Reibdrehzahl mindert die Tendenz zur Sekundärwulstbildung. Bei einer zu niedrigen Umlaufgeschwindigkeit und/oder Reibdruck bildet sich der Sekundärwulst als Zwischenschicht zwischen den Reibpartnern aus, weil der plastifizierte Werkstoff an der Stirnfläche des größeren Bauteils abkühlt, verfestigt und nicht aus der Fügezone verdrängt werden kann. Damit fehlen auch der Selbstreinigungseffekt der Schweißzone durch den Materialtransport nach außen in den Wulst. Es kann zu Bindefehlern im Übergang zwischen dem großen Querschnitt und dem Sekundärwulst kommen. Die Brems- und Stauchphase ist so abzustimmen, dass mit erhöhter Kraft in die noch drehende Spindel gestaucht wird. Damit kann eine schmalere Zwischenschichtsekundärwulst noch vollständig verdrängt und eine fehlerfreie Verbindung erzielt werden.

3.7. Auslegung von Reibschweißmaschinen

Die Reibbedingungen für eine bestimmte Schweißaufgabe (Werkstoffpaarung, Geometrie) werden durch die Anpreßkraft und die Relativgeschwindigkeit ($v(n, r)$) bestimmt. Ist die Drehzahl bei Standardreibschweißmaschinen eine feste Größe, dann können die Arbeitsbedingungen nur eingeschränkt festgelegt und optimiert werden. Dies mag für einfache Schweißaufgaben bzw. ein kleines Spektrum von Aufgabenstellungen durchaus ausreichend sein. Das Verfahrenspotential kann dadurch aber bei erweiterter Aufgabenstellung (Werkstoffe, Geometrie) nicht ausgeschöpft werden. Dabei geht es neben wiederholgenauer Schweißqualität auch um die Prozeßführung. Oft ist das hohe Reibmoment eine kritische Größe für die Spanntechnik (Spanneindrücke, Durchrutschen) - manche Anwendung ist allein deshalb nicht realisierbar. Ein erhöhtes Drehzahlniveau kann dieses Problem lösen. Die Anreibdruckabsenkung in einem mehrstufigem Anpreßdruckprogramm, gleichzeitig oder alternativ ein verändertes Drehzahlniveau oder für künftig erweiterte Maschinensteuerungen der kombinierte Einsatz von Kraft- und Drehzahlprogrammen. D.h. das Anreiben erfolgt mit einer höheren Reibdrehzahl und nach

Überwinden des Reibmomentenmaximums wird mit einer niedrigeren Drehzahl Gleiteffekten in der Reibphase entgegengewirkt.

3.8. Qualität, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit

Aus der Bestimmung geeigneter Drehzahlbereiche ergeben sich Qualitäts- und Flexibilitätsverbesserungen für das Reibschweißen. Der Schweißbereich (größere Durchmesser) einer Reibschweißmaschine wird durch den Einsatz einer höheren Reibdrehzahl nicht vergrößert. Durch den Einsatz eines höheren Drehzahlniveaus wird allerdings die Flexibilität (im Bezug auf wechselnde Schweißaufgaben) und dadurch auch die Wirtschaftlichkeit verbessert.

Rotationsreibschweißen einer kriechfesten Magnesiumlegierung

M.Sc. G. A. Pinheiro, C. G. Pankiewicz, Dr. J. F. dos Santos und Prof. K. U. Kainer
Institut für Werkstofforschung, GKSS-Forschungszentrum GmbH, Geesthacht

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung der Reibschweißbarkeit der kriechfesten Magnesiumlegierung AE42HP. Zylindrische Bolzen mit 20mm Durchmesser wurden unter unterschiedlichen Bedingungen reibgeschweißt. Der Einfluß der Schweißparameter auf die Nahtbildung wurde mit Hilfe von Temperaturmessungen analysiert. Weiterhin sind metallographische Untersuchungen mittels eines Lichtmikroskop sowie Zugversuche durchgeführt worden, um die Reibschweißbarkeit dieser Magnesiumlegierung bestätigen zu können.

Die durch den Reibschweißprozess erreichten Ergebnisse zeigen eine gute Reproduzierbarkeit sowie eine hohe Zuverlässigkeit des Prozesses. Außerdem wurde entlang der Bindelinie eine sehr feinkörnige Mikrostruktur ausgebildet. Die Korngröße im Nahtbereich variierte zwischen ASTM 10 und 12, welche zu einer hohen Festigkeit der Schweißverbindungen führte.

Schlüsselwörter: Reibschweißen, Magnesiumlegierung AE42

1. Introduction

The Mg alloys currently used in the automotive industry are high pressure die cast and have either high strength (AZ91D) or high ductility (AM60 and AM50) at room temperature. However, power train applications such as automatic transmission cases and engine blocks are limited for these alloys since their mechanical properties decrease rapidly with temperature. Mg-Si alloys, like AS21, AS41A and AS41B were exploited on a large scale in the various generation of the famous Volkswagen Beetle engine in the 70s. Nowadays no Mg engine blocks are manufactured due to high operating temperature requirements of modern engines and the cost of the alloys [T1,2,3].

A die cast alloy developed by Dow Chemical Company, AE42, has shown superior mechanical properties in applications at high temperatures. This alloy was developed from a non-aluminum magnesium chemistry in which rare earths, under die-casting conditions,

were shown to increase creep resistance by forming fine Mg_9RE precipitates along the grain boundaries. The presence of alloying elements results in significant advantages in comparison to Mg-Zn and Mg-Mn alloys. Table 1 shows a brief comparison between some materials industrially used.

Table 1. Mechanical properties of pure Mg in comparison with some Mg, Al and steel alloys.

Mechanical Properties	AZ91	AE42	AA2024	AA6082	AISI1022	AISI1040
Hardness (HV)	80	60HB	142	95	143	211
UTS (MPa)	275	234	427	310	474	620
Yield Strength (MPa)	145	145	345	260	330	415
Elongation at Break (%)	6	11	5	10	34	25
Modulus of Elasticity (Gpa)	44.8	45	72.4	n. a.	200	200
Shear Modulus (GPa)	17	17	27	n. a.	80	80

Friction welding is a relatively unexplored area within Mg research and has showed some advantages as short welding times, good repeatability and suitability to perform sound welds specially in dissimilar configuration (i.e. in combination with other metals), if compared with conventional fusion welding processes. In the basic and most used variation one of the workpiece rotates while the other is held stationary. Both welding surfaces come in contact under a defined pressure during a preset time. The material at the faying surfaces becomes plasticized and the parts are forged together at the end of the process. Figure 1a shows the basic configuration of this variation.

The friction weldability of Mg alloys was previously considered to be difficult, but actually many publications [4,5,6,7,8] including the AWS Handbook describe it as possible. Many friction welding studies involving Mg similar and dissimilar joints with different alloys have been carried out aiming at an optimization of process parameters, leading to sound and reliable joint formation.

Bowles *et. al.* [4] investigated AE42 – AZ91 friction welded joints without significant loss of hardness across the bonding line. The AZ91 side of the weld showed more significant microstructural changes related to dynamic recrystallisation taking place along an app. 500 μm wide stripe starting from the bonding line. On the other hand very few changes in the microstructure are evident on the AE42 side of the weld. Only the mechanical

fragmentation of the intermetallic particles has been observed. Such a process was used to improve locally mechanical properties of an AZ91 cast component by joining AE42 studs/inserts.

Ogawa *et al* [5] have shown, through several experiments in a wide variety of friction welding conditions for the similar joint in AZ31, that the deformation caused by the heat input during the upset stage and upset loss can be used to evaluate the joint performance in terms of tensile strength. Friction time, rotational speed and upset pressure must have expressive values to the welds to lie in the sound joints range.

Similar AZ31 alloy joints were also studied by Kato and Tokisue [6]. According to the authors, the macrostructures in the vicinity of the weld interface are symmetrical in relation to the weld interface and joint axis regardless of the applied friction time. The hardness in the weld interface has a value similar to that of the base material and even in different parts of the joint has shown no significant difference. The tensile strength and elongation of the investigated friction welded joints [6] tend to be improved with an increase in the friction pressure and friction time. The highest impact value observed was app. 60% of the base material value due to the disappearance of the fibrous structure in the weld interface. This has also been observed in carbon steels [9] and aluminum alloys [10,11].

2. Experimental

An AE42-HP (high-purity) alloy has been selected for the present study. The material was delivered as cast ingots and spark-eroded. Table 2 lists the chemical composition while Table 3 lists both its mechanical properties according to tests carried out at GKSS and to the literature [12]. It should be mentioned that the base material properties were slightly different from those mentioned in the literature.

Table 2. Chemical composition of the AE42HP used in the present study.

El	Al	Zn	Mn	Ni	Si	Be	Ce	La	Nd	Pr	Th	Mg
%	3,9	0,003	0,4 1	<0,00 1	0,02	0,00 1	1,2	0,6	0,4	0,1	0,2	92

Table 3. Mechanical properties of the base material.

Material	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness
AE42HP (tested)	125 (114 – 143)	6 (4 – 7)	40 (36 – 44), Hv. 0,2
AE42 [12]	230	11	60, HBS 1/5

Conventional cylindrical geometry was chosen for this work with 20mm diameter and 100mm length studs. The rotating stud was tightened to the weld head while the other was remained stationary. This geometry was suitable to fit in the friction welding machine and is commonly used to perform conventional friction welding trials. Additionally, 1,2mm holes were drilled into the studs to insert thermocouples at 5 and 10mm from the welding interface. Figure 1 shows in a) a schematic of the process and in b) the geometry of both the rotary (A) and non-rotary stud, where the thermocouples were inserted.

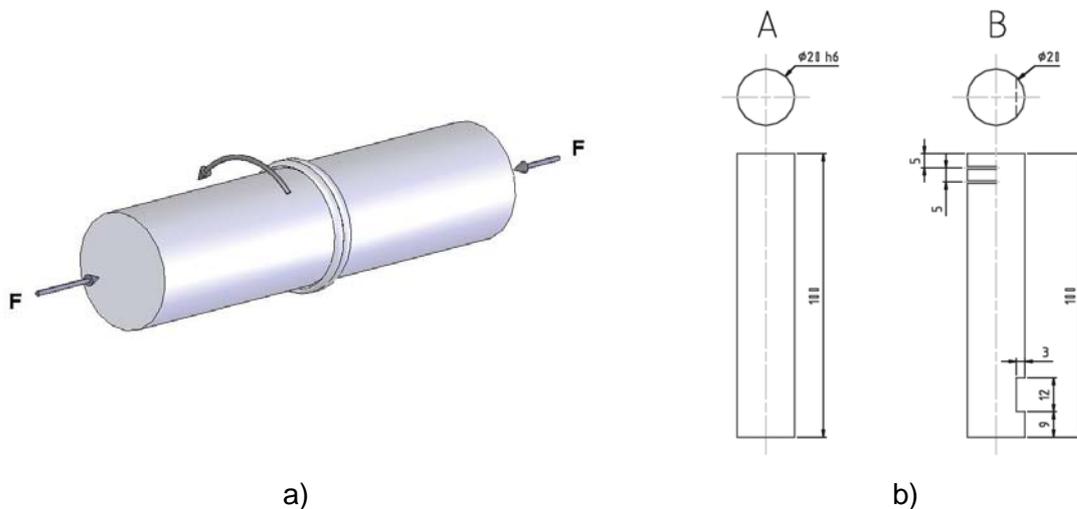


Figure 1. a) Geometry of the rotary (A) and non-rotary (B) welding studs and b) a schematic of the classic configuration used on this work.

A HSM 3000 machine has been used to perform the welds. This is a portable hydraulic powered friction welding system, designed and built by Circle Technical Services Ltd. Before the beginning with the welding operation itself some procedures were followed in order to ensure the reproducibility of the welding programme and avoid as much as possible external influences. The studs were cleaned with acetone to eliminate all possible contaminations forms that could influence the weld results. The oil temperature of the machine was kept at $20 \pm 2^\circ\text{C}$ prior to the beginning of the weld in order to avoid significant changes in the power delivered by the welding machine. Table 4 lists the set of 7 individual

friction welding conditions investigated. Two different weld series were proposed in varying the forging force (MgMg-series) and the rotational speed and the welding pressure (Mg-series). Each set of parameters, i.e. each weld of the weldability matrix was performed five times. Four specimens of each weld were designated to tensile tests and the remaining one to metallographic analysis. Thermal cycles were recorded in all cases with using thermocouples as well as with an infrared camera.

Table 4. Friction welding conditions.

Sample label	FP (MPa)	RS (rpm)	FF (MPa)	BO (mm)
MgMg-01	1.03	4000	1.38	5.0
MgMg-02	1.03	4000	1.72	5.0
MgMg-03	1.03	4000	2.07	5.0
Mg-01	1.03	3000	1.72	5.0
Mg-02	1.03	6000	1.72	5.0
Mg-03	1.72	3000	2.41	5.0
Mg-04	1.72	6000	2.41	5.0

FP: Friction Pressure set in the welding machine; RS: Rotational Speed; FF: Forging Force; BO: Burn-off;

Welded specimens were cut (longitudinally, in the center of the studs) and etched with a Picric Acid based etchant to allow a complete examination of the joint. Finally tensile testing has been carried out on specimens with the bonding line positioned in the middle of gauge length.

3. Results and Discussion

3.1 Process Stability

Friction time, welding pressure, rotational speed and burn-off were monitored during the welding by an external data acquisition system integrated with the control unit. The acquisition system recorded each individual weld and allowed later an accurately evaluation of each weld. All groups of welds have shown very low standard deviation on important parameters. This indicates that the process was generally stable and that the HMS 3000 presented a high level of reproducibility. Table 5 shows the average value of welding time and burn-off with their respective standard deviation to give an indication of the repeatability of process itself and of the welding machine.

Table 5. Average and standard deviation of welding time and burn-off.

Samples	Welding Time (s)	Standard Deviation (s)	Real Burn-off (mm)	Standard Deviation
MgMg-01	3.03	0.27	8.70	0.19
MgMg-02	3.20	0.62	10.84	0.84
MgMg-03	3.14	0.08	13.86	1.71
Mg-01	2.11	0.03	8.54	0.51
Mg-02	2.43	0.03	9.92	0.26
Mg-03	1.50	0.06	10.32	0.44
Mg-04	1.50	0.04	11.58	0.53

In the MgMg-series the influence of the forging force has been evaluated for a welding pressure of 1.03MPa. Table 5 shows that as a result approximately the same welding time has been obtained for the three welding conditions (i.e. MgMg-01, 02 and 03).

On the other hand it was observed that the real burn-off increased significantly with forging pressure. On an average the burn-off during the stopping time was 2.42, 4.22 and 6.64mm as the forging pressure was increased, playing an important role if the final length of the pair is considered. Figure 2 shows the real burn-off versus the forging pressure.

Table 5 also shows that in the Mg-series a higher rotational speed cause a slightly increase in the welding time when the pressure was set at 1.03MPa (groups Mg-01 and Mg-02). This effect was not observed when the pressure was set as 1.72 MPa (groups Mg-03 and Mg-04) where the average welding time was exactly the same. Another characteristic that can be observed in Table 5 is the decrease on welding time when the welding pressure was increased. Burn-off was also increased with rotational speed since the stopping time increase with rotational speed due to the inertia of the system.

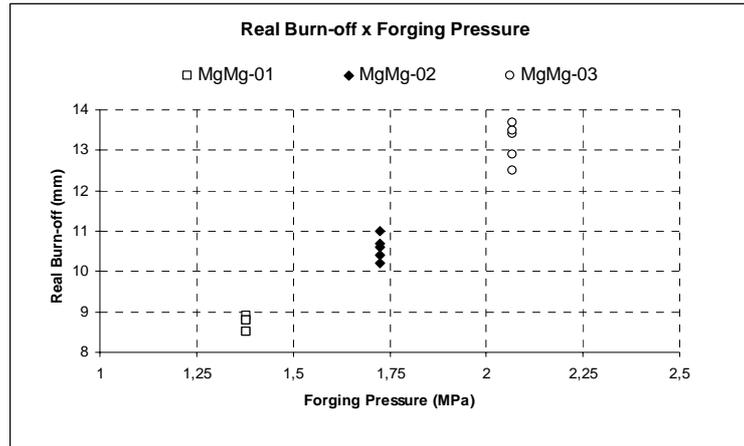


Figure 2. Dependence of real burn-off on forging pressure.

3.2 Thermal Cycle Measurements

The minimum and maximum temperatures reached during the welding process itself were recorded with a frequency of 10Hz. Therefore maximum temperatures, as presented in Table 6 for MgMg-series, could be evaluated with a precision of one tenth of a second.

Table 6. Average maximum temperature achieved during the weld.

Samples	Thermocamer a (°C)	Thermocouple s 5mm	Thermocouple s 10mm	Welding Time (s)
MgMg-01	487,78	551.91 °C	420.82 °C	3.03
MgMg-02	476,79	550.52 °C	428.45 °C	3.20
MgMg-03	480,31	562.26 °C	418.04 °C	3.14

T1: Time between the beginning of the weld and the maximum peak of temperature.

For the MgMg-series no significant differences could be observed since those parameters are more related to welding pressure, which was constant for all three parameter sets. Forging force and welding time cannot be evaluated together with maximum temperature since forging force is applied when the welding time/burn-off is achieved. Therefore the values found for this group of specimens seemed to be close to each other and to vary randomly.

On the other hand changes on the temperature parameters can be easily observed for the Mg-series. When the pressure was fixed at 1.03MPa the total input of energy increased with the rotational speed, since the welding time was clearly longer. The above mentioned result can be seen on Table 6 comparing the groups Mg-01 and Mg-02, welded at 3000 and 6000rpm respectively. The longer welding time and consequently the higher average

maximum temperature (out of 5 samples) reached by the welds made within group Mg-02 suggests a higher total energy input on those samples. In contrast to the previous analysis, if groups Mg-03 and 04, welded at 3000 and 6000 rpm respectively are compared, it could be observed that the temperature and therefore the total energy input at a pressure of 1.72 MPa decreases with rotational speed. Based on the results presented above, it can be concluded that the temperature varies randomly with rotational speed within the analyzed range of parameters.

When analysing the effect of the welding pressure on the total energy input the results were clearer. For both pairs of weld groups (Mg-01 and 03, welded at 3000 and Mg-02 and 04, welded at 6000rpm) the temperature and consequently the total energy input decreased with the welding pressure, as shown on Table 6. This tendency was observed since in the second case the preset burn-off is achieved faster owing to the higher welding pressure. Therefore the welding time is shorter and less heat is generated during the process. Figure 3 shows that the longer the welding time is, the higher the temperature tends to be.

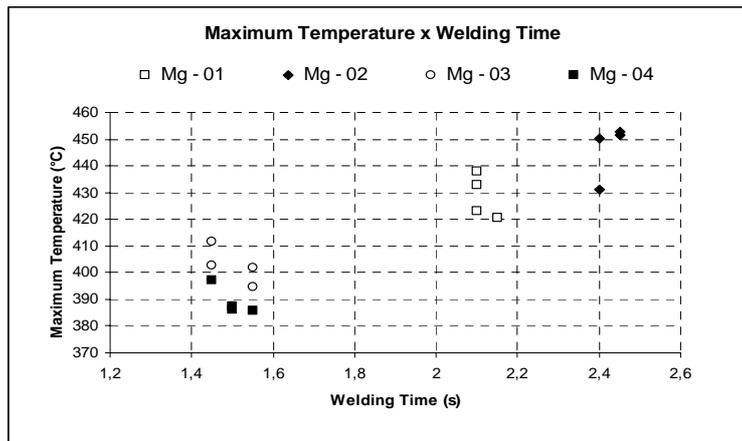


Figure 3. Variation of welding time with maximum temperature.

3.3 Metallographic Examination

Analysis of the macrographs of the group MgMg showed that sound welds with no porosity and without lack of bonding could be produced using friction welding. Bonding line is visible in the borders of the stud but not in the center, where a higher amount of plasticized material is concentrated. This effect can be explained by the lower radial forces and restricted material flow conditions closer to the rotational centre obstruct the hydro-extraction effect of both surface contamination particles and plasticized material generated in the welding interface centre. In the outer regions of the weld zone the material is easily

pressed out of the friction surfaces, due to the high plastification and low deformation constrain. As the temperature of the material and the height of the plasticized zone increases, the resistance to the axial force reduces and the material is pressed out of the friction area forming the flash. These combined effects lead to an accumulation of plasticized material at the joint centre in one hand and to a defined bonding line with less plasticized material in the outer regions. Figure 4 shows an overview of sample MgMg-01.

For the sample MgMg-03, particularly, the bonding line can barely be seen even in the borders, i.e. the width of the plasticized layer is very thin in comparison to the weld carried out with lower forging forces (MgMg-01 and 02). On the other hand no significant difference can be noticed between samples MgMg-01 and 02, welded with a forging force of 1.72 and 2.07MPa respectively.

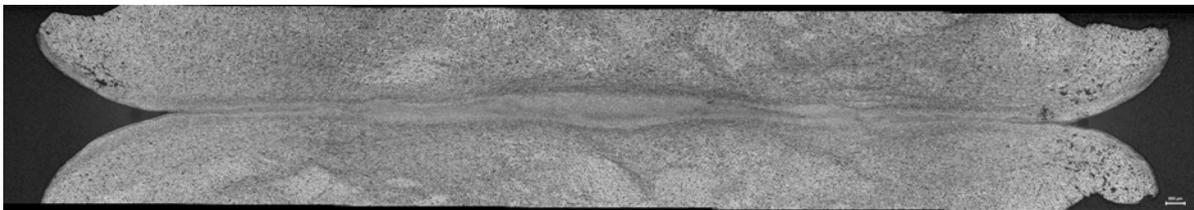


Figure 4. Overview of sample MgMg-01.

On the other hand a clear bonding line could not be seen in all four welded samples of the Mg-series due to the intimate contact between the workpieces after the welding process. In this region no discontinuities like porosity or lack of bonding could be found through the entire diameter of the weld. As observed also within the MgMg-series, the weld interface shows the pattern of a typical friction welded joint. The microstructure at the bonding line is characterized by a thin layer of dynamically recrystallized grains without any special particles or phases precipitated in the grain boundaries (verified by EDS). Analysis of macrographs of all samples showed that the height of the plasticised layer in the center of the stud was always bigger when compared with the width of the layer at the borders. In order to evaluate the influence of the welding parameters on the shape of the bonding line, the width of the plasticised layer, i.e. the area where dynamically recrystallization has taken place, was measured through the whole welding interface. According to the measurements carried out on the light microscope it was also clear that the rotational speed plays an important role on the amount of heat generation. In welds made with lower rotational speeds it was observed a noticeably higher amount of plasticised material if compared with welds made with higher rotational speeds. On the other hand it was not possible to observe a significant change in the welds made with 40 and 60MPa. Table 7 lists the

results of the measurements carried out on the welded samples. Figure 5 presents a sketch representing the measured width and extension of the plasticized zone.

Table 7. Height of the plasticised layer along the welding interface.

Position	Height of the plasticized zone (μm)			
	1	2	3	4
-10.0	580	410	385	290
-7.5	760	465	270	415
-5.0	840	410	210	665
-2.5	101 5	375	825	1025
0.0 (Center)	157 0	740	1020	1110
2.5	113 0	850	740	865
5.0	870	420	210	575
7.5	680	280	200	445
10	405	365	230	435

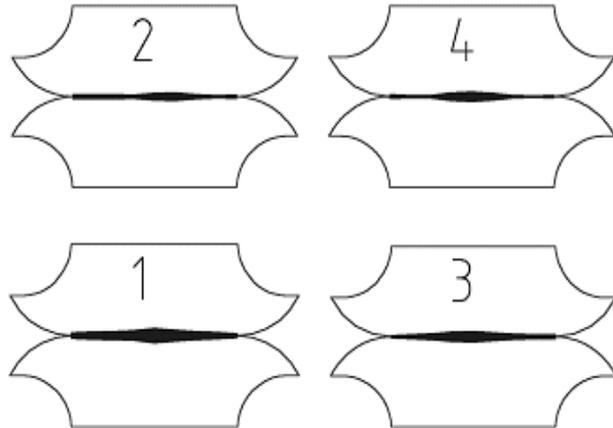


Figure 5. Bonding line shape x welding speed.

Since the relative speed and therefore the heat generation is noticeably higher in the outer regions of the diameter, it was found, as expected, that average grain size was always smaller in the center than on the periphery of the weld (see Table 8). Although welding time and maximum temperature have shown different values on the samples welded at low pressures, grain size was very similar in both cases. The major difference in grain size measurement was observed between specimens welded at high pressures. According to these results, rotational speed seems not to have a significant influence on the grain size of the welding zone. On the other hand it was observed that the pressure plays an important role on the development of the microstructure in these alloys. In both cases the higher the welding pressure, the smaller the average grain size. Comparing the groups welded under different conditions, Table 8 shows that generally samples with larger grain size reached the highest temperatures, i.e. the higher the welding temperature is, the bigger the grain size will be.

Table 8. Grain size measurements.

Sample	ASTM – Grain Size								
	Center				Outer region				Average
	1	2	3	Average	1	2	3	4	
Mg01	11.0	11.7	11.2	11.3	10.4	10.7	10.6	9.5	10.3
Mg02	11.2	10.9	11.9	11.3	9.5	10.4	10.4	10.9	10.3
Mg03	11.8	12.6	12.2	12.2	10.6	10.9	11.1	11.2	11.0
Mg04	11.2	11.9	12.1	11,7	10.7	10.4	10.4	10.5	10.5

3.4 Mechanical Testing

Tensile tests were carried out to confirm the suitability of friction weld for performing sound welds in the selected base material. Figure 6a shows joints made under different welding conditions in having mechanical properties similar to that of the base material since no sample failed at the bonding line and no joint faced the problem of ductility loss (at 100% joint efficiency). Tensile strength and elongation were found to be equivalent while the yield strength was in all the cases noticeably superior to that of the base material.

Although the influence of the forging force in friction welding of Mg alloys is reported to be very relevant in relation to joint formation [13], samples of MgMg-series have shown that the forging force did not play a significant role in influencing the tensile strength among the specimens. As already discussed in previous sections, welding parameter, thermal cycle and therefore resultant microstructure were very similar for these three samples. As it would be consequently expected, mechanical properties within the group were also very similar.

Similarly to the behavior previously observed, samples within Mg-group presented also an adequate tensile strength with a joint efficiency of 100% and loss of ductility under some welding conditions. As mentioned above, joints have shown similar tensile strength and elongation values with a clearly higher yield strength. Specimen Mg-04, where the lowest maximum temperatures were measured, presented the best result within this group, with clear higher tensile and yield strength values in relation to base material. Figure 6b presents three tested samples showing clearly that the failure has occurred in the base material far away from the welding region and from the HAZ, positioned in the middle of the sample.

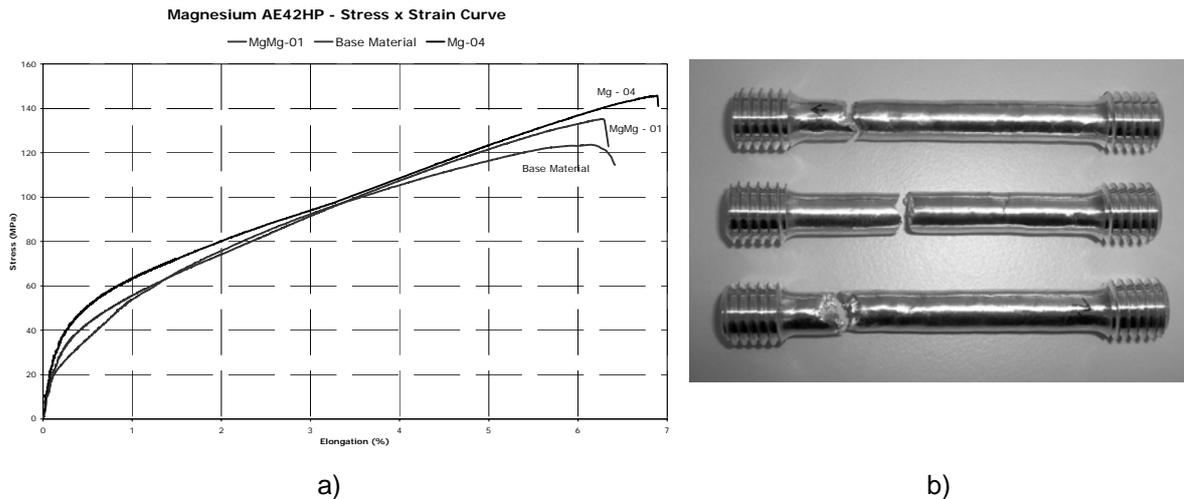


Figure 6. In a) the Stress x Strain curves for MgMg and Mg-series in comparison with base material and in b) tensile samples with the failure positioned far away from welding region.

Although rotational speed is considered in having a lower influence on the formation of the weld interface [13], within this series, tensile strength increases clearly with rotational speed and has an undefined relation with axial pressure. Welds performed with lower rotational speed (Mg-01 and Mg-03) presented an efficiency of 98 and 90% with inferior elongation if compared with the base metal, while Mg-02 and Mg-04 presented a 100% joint efficiency. At lower speed an increase in welding pressure reduces the strength, while at higher rotation an increase in it causes a gain in tensile properties. Additionally and contrarily to the results reported on the literature [13], fully satisfactory bonded joints from the perspective of tensile strength were obtained with short welding times (<3s).

4. Summary

After the conclusion of this work, it was possible to conclude:

- ❖ The pair welding process/welding equipment presented a high reproducibility among the set of parameters investigated. The process itself was proved to be suitable and reliable in performing similar welds within the same set of parameters. Additionally it was observed that both the welding and forging pressure plays an important role in the course of the process and consequently in the formation and properties of the joint. On the other hand the rotational speed seemed not to influence significantly the welding process;
- ❖ Welding temperature varies randomly with rotational speed within the analyzed range of parameters. The effect of the welding pressure on the total energy input showed

that the temperature and consequently the total energy input decreased with the welding pressure;

❖ Analysis of the macrographs of the group MgMg showed that sound welds with no porosity and without lack of bonding could be produced using friction welding. Weld interface in all cases shows the pattern of a typical friction welded joint. The microstructure at the bonding line is characterized by a thin layer of dynamically recrystallized grains without any special particles or phases precipitated in the grain boundaries. Analysis of macrographs of all samples showed that the height of the plasticized layer in the center of the stud was always bigger when compared with the height of the layer in the borders;

❖ Average grain size was always smaller in the center than on the periphery of the weld. Also rotational speed seems not to have a significant influence on the grain size of the welding zone. On the other hand the higher the welding pressure, the smaller the average grain size. Samples with larger grains reached the highest temperatures;

❖ Within the range of parameters investigated fully satisfactory bonded joints from the perspective of tensile strength were obtained. No sample failed at the bonding line and no joint faced the problem of ductility loss (at 100% joint efficiency). Tensile strength in this case increases clearly with rotational speed and was found to have an undefined relation with axial pressure.

5. Acknowledgements

The authors would like to thank both Mr. Hort for the fruitful discussions as well as Mr. Kree for the metallographic support. The research of the first author was partially sponsored by the Brazilian Council for the Development of the Research, CNPq.

6. References

-
- [1] Bob R. Powell, Vadim Rezhets, Michael P. Balogh and Richard A. Waldo, JOM August 2002, 34-38.
 - [2] I.P. Moreno, T.K. Nandy, J.W. Jones, J.E. Allison and T.M. Pollock, Scripta Materialia 2003, 48, 1029-1034.
 - [3] H. Dieringa, A. Bowles, Norbert Hort and K.-U. Kainer, Materials Science Forum 2005, 482, 271-274.

- [4] A. Bowles, N. Hort, A. Meyer, J.F. dos Santos and K.-U. Kainer, 6th International Conference on Magnesium and their Applications, September 2003, 917-923.
- [5] K. Ogawa, H. Yamaguchi, H. Ochi, T. Sawai, Y Suga and Y Oki, Welding International, 2003, 17, 879-885.
- [6] K. Kato and H. Tokisue, Welding International, 1994, 08, 452-457.
- [7] U. Draugelates, A. Schram, B. Bouaifi and Chr. Kettler, 1998, Institute of Welding and Machining (ISAF), TU-Clausthal, Germany.
- [8] K. Kato and H. Tokisue, Welding International, 2004, 18, 861-867.
- [9] T. Shioya, S. Yamada and Y. Kurumatani, 1996, J Jpn Weld Soc 35(1), 65-71.
- [10] H. Tokisue and K. Kato, 1978, J Jpn Weld Soc 28(9), 450-454.
- [11] K. Kato and H. Tokisue, 1990, J Jpn Weld Soc 45(5), 351-355.
- [12] M. M. Avedesian, H. Baker, ASM Specialty Handbook – Magnesium and Magnesium Alloys, 1999, p. 67.
- [13] U. Draugelates and A. Schram, 2000, Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren, TU-Clausthal, Germany.

Reibschweißen unter dem Flüssigkeitsschutz von Sondermetallen

Friction welding of special metals in fluid

Dr.-Ing. Hab. A. Ambroziak Prof. PWr, Technische Univ., Wrocław (Polen)

Kurzfassung

Im Rahmen von Untersuchungen über den Einfluss von Schutzflüssigkeiten für das Reibschweißen unter Flüssigkeitsschutz, wurden die Metalle Titan und Tantal in verschiedenen Flüssigkeiten gegläht. Zur Beurteilung der Schichten werden die Ergebnisse der Mikrohärtmessungen und Untersuchungen auf der Mikrosonde herangezogen. Mit Hilfe von Makro- und Mikrogefügeuntersuchungen sowie Mikrohärtmessreihen wird eine Beurteilung der an Luft und unter Flüssigkeitsschutz (Funkenerosionsöl) reibgeschweißten Verbindungen von Titan, Vanadin, Niob und Tantal vorgenommen.

Es konnte festgestellt werden, dass das modifizierte Reibschweißen unter Flüssigkeitsschutz die Verbindungspartner wirksam vor der Gasen der Luft abschirmt. Weitere Vorteile sind eine günstigere Ausbildung der Wärmeeinflusszone und geringere Werkstoffverluste beim Reibschweißen.

Abstract

Within the scope of investigations concerning the influence of protective liquids for friction welding under fluid protection, the metals titanium and tantalum were annealed in different fluids. The results of microhardness measurements and microprobe analyses are used to evaluate the layers. By means of macro- and micro-structure analysis and microhardness measurements an evaluation of on air or under protective liquid, friction welded titanium, vanadin, niobium and tantalum are made.

The result was, that the protective liquid of the modified friction welding method is a good shielding from air atmosphere. Other advantages are the good configuration of the heat-affected zone and the low waste during friction welding.

1. Einleitung

Eine steigende Anwendung von Va- und VIa – Metallen und ihren Legierungen erfordert Kenntnisse über die Behandlung dieser Metalle, die auch die Einsatzmöglichkeiten verschiedener thermischer Fügeverfahren beinhalten sollten. Der Einsatz konventioneller Schweiß – und Lötverfahren an diesen Werkstoffen würde zu einer Schädigung bis hin zum Verlust der Gebrauchseigenschaften dieser Werkstoffe führen. So sind es mit wenigen Ausnahmen nur die hochentwickelten Fügeverfahren Elektronenstrahlschweißen im Hochvakuum und Hoch-

temperaturlöten, die für Verbindungen dieser metallischen Werkstoffe miteinander, in besonderen Fällen auch mit anderen metallischen Werkstoffen, eingesetzt werden.

Für das Reibschweißen von Titan, Vanadin, Niob, Tantal, Molybdän und Wolfram sind zwei Voraussetzungen zu schaffen:

- an der Schweißstelle müssen während einer Temperaturerhöhung die verbindenden Teile vor den Gasen der Luft abgeschirmt werden,
- dem Schweißbereich muss ein für den Bindevorgang ausreichender Energiebetrag zugeführt werden [2].

Die Betrachtung des Reibschweißprozesses unter diesen beiden Gesichtspunkten folgende Erkenntnisse, die den Versuchen zugrunde gelegt werden:

1. Abschirmen der beim Schweißen erwärmten Sondermetalle vor den Gasen der Luft
2. Energiebedarf für das Reibschweißen von Sondermetallen

Herkömmliche Werkstoffe werden an Luft reibgeschweißt. Die während des Schweißens entstehende Oxid- und Nitridschichten werden aus der Bindeebene in den Schweißgrat verdrängt und mit diesem – mit wenigen Ausnahmen – später entfernt. Weitere Bereiche, in denen sich während des Schweißens unter dem Einfluss von Luft Oberflächenschichten ausgebildet haben, werden nur selten abgearbeitet, da sich diese Schichten meist nicht störend auf die Funktion der Teile auswirken. Anders sieht es dagegen bei den genannten Sonderwerkstoffen aus. Eine Wechselwirkung mit den in der Luft enthaltenen Gasen führt über die Oberflächenreaktionen hinaus zu einer Gasaufnahme, die – wie schon gesagt – die Werkstoffeigenschaften verschlechtert [1]. Von der wirksamen Abschirmung dieser Metalle bei erhöhten Temperaturen während des Schweißens vor den Gasen der Luft hängt es damit ab, inwieweit ihre Ausgangseigenschaften noch vorhanden sind. Schmelzgeschweißt werden diese Metalle deshalb im Hochvakuum oder in geschlossenen Inertkammern. Der Sauerstoffanteil in solchen Inertgasatmosphäre wird auf Werte unter 1vpm, außerhalb einer geschlossenen Kammer, nicht zu erzielen. Die Restsauerstoffanteile in einem Hochvakuum sind noch geringer. Vorstellbar wäre, in einer geschlossenen Kammer unter Inertgas oder im Hochvakuum reibzuschweißen. Der erforderliche Aufwand wäre aber dann so hoch, dass wesentliche Taktzeiten, nicht mehr zum Tragen kämen. Deshalb musste eine weniger aufwendige Methode für die Abschirmung während des Schweißens gefunden werden. Als solche erwies sich, die Bindeebene unter der Spiegel einer Flüssigkeit zu verlegen. Die zwischen den zu verbindenden Teilen vorhandene Flüssigkeit wird während der Annäherung der Stoßflächen durch Verdrängung und Fliehkraft herausgedrückt. Die Schweißzone selbst kann so lange in der Flüssigkeit gehalten werden, bis eine gewünschte Temperatur erreicht ist.

Während einer Reibphase in der Werkstoffpaarung Wolfram – Tantal hat man Temperatur von 1855⁰C, 2 mm unter Reibfläche erreicht [3].

2. Auswahl der Schutzflüssigkeit

Für die Auswahl der Schutzflüssigkeit ist die Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und den zu verbindenden Metallen bei hoher Temperatur von entscheidender Bedeutung. Die Untersuchungen des Einflusses wurden an zylindrischen Proben durchgeführt, die in den zu untersuchenden Flüssigkeiten geblüht wurden.

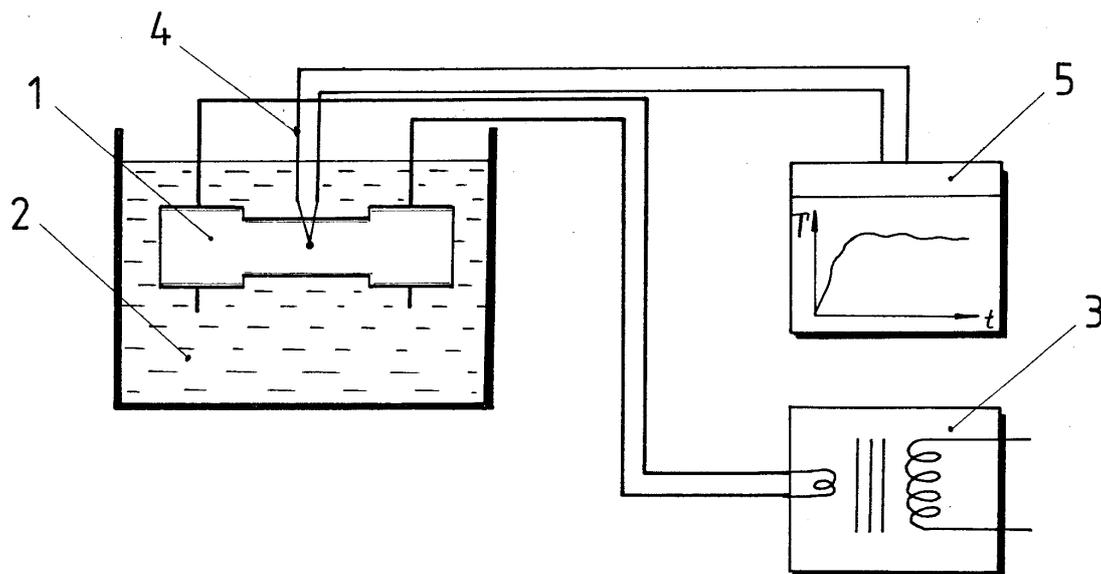


Bild 1. Schema des Versuchstandes zum Glühen in Flüssigkeiten
 1 – Probe, 2 – Behälter mit Flüssigkeit, 3 – regelbarer Transformator,
 4 – Thermoelement, 5 - Schreiber

Der Versuchsstand (Bild 1) besteht im wesentlichen aus einer regelbaren Stromquelle, einem Flüssigkeitsbehälter und einem Schreiber für die Aufzeichnung der Probentemperatur. Es werden die Ergebnisse der Untersuchungen an Titan – und Tantalproben vorgestellt, die in Funkenerosionsöl, Glykol und Wasser thermisch belastet werden. Die Glüh­temperatur betrug für Titan 950°C und für Tantal 1550°C, die Glühzeit betrug jeweils 3 Minuten.

Die Wärmebehandlung hat bei allen Proben Kornwachstum zur Folge. Die in Funkenerosi­onsöl geblühten Titanproben haben unter dem durch die Zersetzung des Öls entstandenen Oberflächenbelag keine Oberflächenschicht. Im Gegensatz dazu ist bei den Proben, die in Glykol und Wasser geblüht wurden, unterhalb der abgeplatzten Oxydschicht eine dichte Dif­fusionsschicht sichtbar, die von Ätzmitteln nicht angegriffen wurde. Darunter ist bei der in Glykol geblühten Probe bis in eine Tiefe von 300 µm ein feinenadeliges, martensitähnliches Gefüge zu sehen. Bei der in Wasser behandelten Probe ist dieser Bereich etwa 400 µm breit [4]. Die Mikrohärtmessungen (Bild 2a) ergaben im Randbereich von Titan-Proben der in

Glykol und Wasser geglühten Proben einen starken Anstieg der Härte. Dabei ist die Härte der stark sauerstoffhaltigen Oberflächenschicht nach dem Glühen in Wasser höher, als nach dem Glühen in Glykol. Unterhalb dieser mit 1000 – 1300 HV 0.025 sehr harten Schicht, nimmt die Mikrohärtigkeit stetig von etwa 600 HV 0.025 auf 300 HV 0.025 ab.

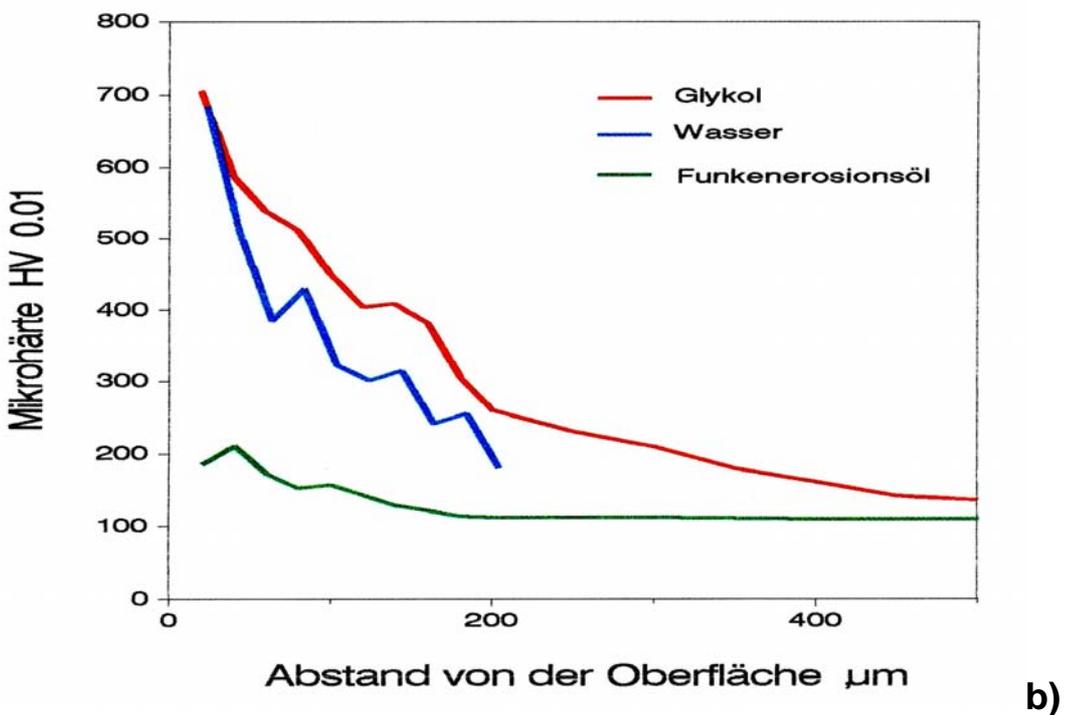
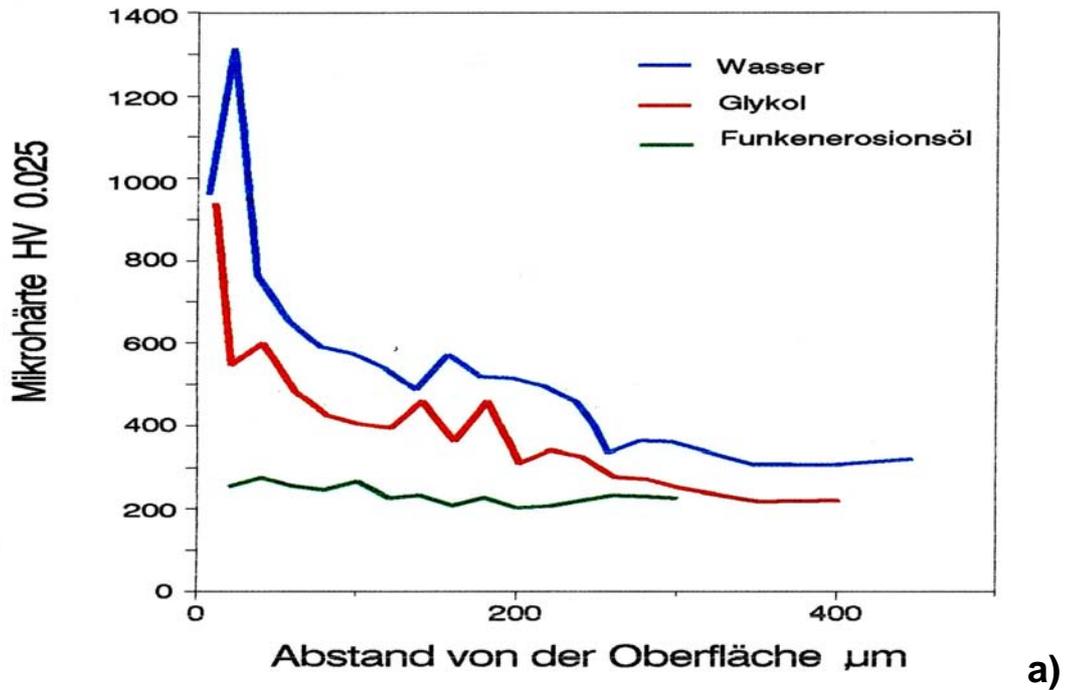


Bild 2. Mikrohärtigkeit der in Flüssigkeiten thermisch belasteten Titan-Proben (a) und Tantal-Proben (b)

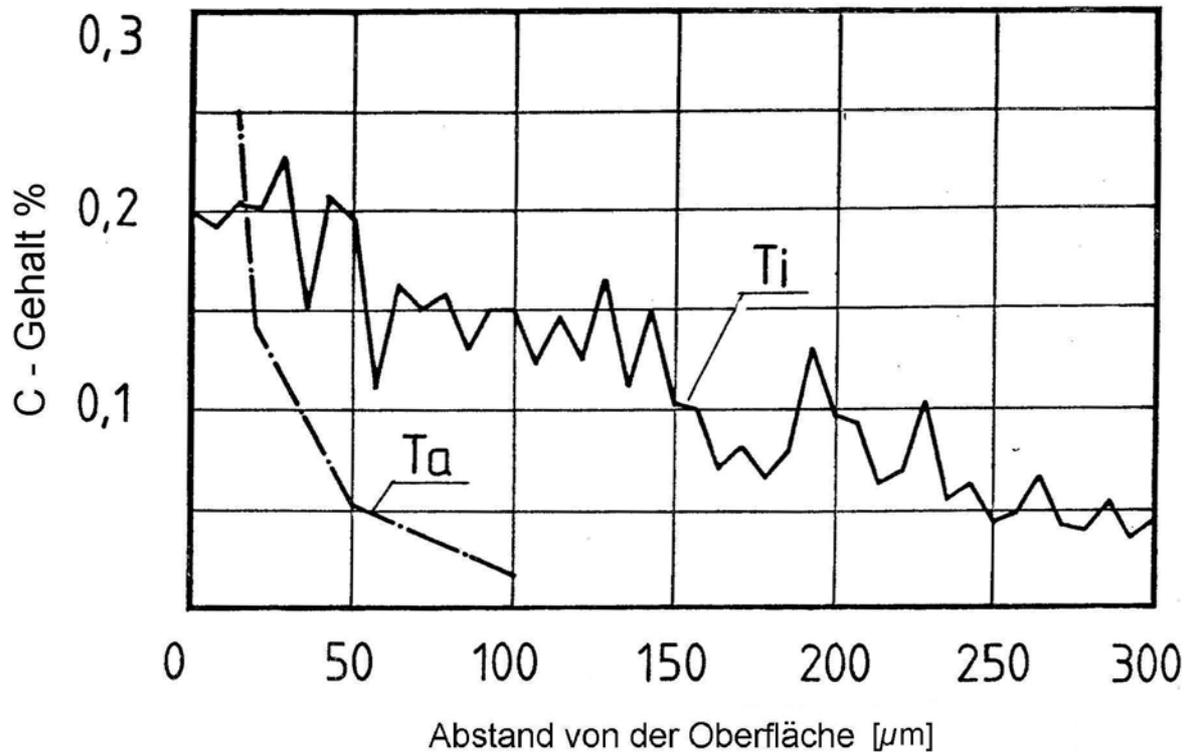


Bild 3. Konzentrationsverlauf von Kohlenstoff thermisch belasteter in Funkerosionsöl Titan- und Tantal-Proben

Die Breite des aufgehärteten Bereiches stimmt mit den im Schliff sichtbaren Gefügeänderungen überein. Bei der in Funkerosionsöl thermisch belasteten Probe ist keine Änderung der Härte gegenüber dem Grundwerkstoff feststellbar.

Durch die Mikrosondenuntersuchung konnte bei der in Funkerosionsöl geglühten Titan-Probe ein Kohlenstoffgehalt von 0.2 Gew. - % in unmittelbarer Nähe der Oberfläche nachgewiesen werden (Bild 3). Bis zu einer Tiefe von 300 µm fällt der Kohlenstoffgehalt stetig auf 0.05 Gew.-% ab. Die Untersuchung der Schichtstruktur der in Glykol und Wasser geglühten Proben ergab einen übereinstimmenden Aufbau. An der Oberfläche bildet sich Titandioxyd, welches durch Röntgenfeinstrukturuntersuchung der abgeplatzten Schicht nachgewiesen wurden [4].

Bei den in Glykol und Wasser geglühten Tantal-Proben ist an der Oberfläche eine Oxydborke vorhanden, deren Bildung mit einer starken Querschnittsabnahme der Probe verbunden ist. In der Oberflächenschicht der in Glykol geglühten Probe konnte neben Tantaloxyd Tantalcarbid nachgewiesen werden. Die auf der in Funkerosionsöl geglühten Probe locker haftende Schicht besteht laut chemischer Analyse aus Kohlenstoff. Dieser Kohlenstoff ent-

steht durch die thermische Zersetzung der Kohlenwasserstoffe des Öls. Unterhalb dieser Schicht ist bei hoher Vergrößerung eine sehr dünne Schicht erkennbar, deren Mikrosondenuntersuchung auf Tantalcarbide schließen lässt. Unter dieser Schicht sind bis in eine Tiefe von etwa 50 µm in den Tantalkörnern feine Ausscheidungen sichtbar [4]. Die in Glykol und Wasser geglühten Proben haben unterhalb der Oxidschicht bis in eine Tiefe von gut 100 µm gerichtete Ausscheidungen in den Körnern. Es handelt sich dabei um blättchenförmig ausgeschiedene Oxide. An den Korngrenzen sind weitere oxydische Ausscheidungen erkennbar.

Die im Gefüge der im Funkerosionsöl geglühten Tantal-Probe sichtbaren Ausscheidungen führen zu einem Anstieg der Härte von 100HV 0.01 auf 200 HV 0.01 im Randbereich (Bild 2b). Der beim Glühen in Glykol und Wasser eindiffundierte Sauerstoff führt in dem nadeleigen Bereich zu einem Anstieg der Härte auf 700 HV 0.01. In 400 µm Abstand von der Oberfläche ist kein nennenswerter Anstieg der Härte feststellbar.

Die Mikrosondenuntersuchung ergab bei der in Öl geglühten Tantal-Probe in 5 µm Abstand von der Oberfläche einen Kohlenstoffgehalt von 0.25 Gew.-%. In einer Tiefe von 100 µm ist nur noch eine geringfügige Erhöhung des C-Gehaltes feststellbar (Bild 3).

Aus diesen Untersuchungen sieht man, dass der geringste Einfluss auf die untersuchten Metalle bei dem Funkerosionsöl ist.

Mit diesem modifizierten Reibschweißverfahren wurden die Schweißversuche durchgeführt.

3. Reibschweißen von Sondermetallen

Für die Versuche wurde eine konventionelle Reibschweißmaschine mit Fremdbremse verwendet, die vertikal arbeitet (Bild 4). Daher besteht die Möglichkeit, Reibschweißungen unter einer Flüssigkeit durchzuführen. Einbezogen in die Untersuchungen wurden die Werkstoffe wie Titan, Vanadin, Niob und Tantal. Die Verfahrensparameter für diese Reibschweißungen sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Die relativ niedrige Wärmeleitfähigkeit von Titan ist die Ursache für örtliche Überhitzungen, die beim Reibschweißen an Luft zu einem großen, ungleichmäßigen Grat führen (Bild 5a). Unter Flüssigkeitsschutz reibgeschweißte Verbindungen haben einen kleineren, gleichmäßiger ausgebildeten Grat. Die dunkle Verfärbung des Schweißgrates entsteht durch eingelagerte Kohlenstoffpartikel, deren Ursache die Zersetzung der mineralöhlhaltigen Flüssigkeit ist.



Bild 4. Versuchseinrichtung mit Reibschweißmaschine

Die Gesamtverkürzung der Reibschweißverbindung, die sich aus der Reibweg- und Stauchverkürzung zusammensetzt, ist mit Ausnahme der Tantal- Verbindung grundsätzlich beim Reibschweißen unter Flüssigkeitsschutz geringer als beim Reibschweißen an Luft. Reibschweißverbindungen, die unter Flüssigkeitsschutz geschweißt wurden, zeigen allgemein ebenfalls einen kleineren Schweißgrat als an Luft geschweißte Verbindungen.

Die Mitte der Verbindung enthält eine feinkörnige Struktur. In Verbindungen, die an Luft geschweißt wurden, ist die Zone mit dieser feinkörnigen Struktur breiter als in Verbindungen, die unter Flüssigkeitsschutz reibgeschweißt wurden.

Alle Verbindungen, die an Luft reibgeschweißt wurden, brauchen viel hohe maximale Leistung als in Verbindungen, die unter Flüssigkeitsschutz reibgeschweißt wurden (Tabelle 1).

Obwohl Tantal einen relativ hohen Schmelzpunkt von 2996°C hat, kann es reibgeschweißt werden (Bild 6). Die benötigte Reibzeit beträgt 3 Sekunden. An Luft und unter Flüssigkeitsschutz reibgeschweißte Verbindungen bilden gleichgroße Schweißgrate. Die Mikrohärtegraphik zeigt für bei hohen Temperaturen mit Luft in Berührung gekommene Tantal-Bereiche hohe Härtewert von 640 HV_{0,05} [5], die bei unter Flüssigkeitsschutz hergestellten Verbindungen nicht zu beobachten waren (Bild 6b).

Tabelle 1. Reibschweißparameter (für alle Verbindungen n= 1500U/min; Probendurchmesser – 30mm)

Werkstoff-Kombination	Schutz	Reibdruck 1 [MPa]	Zeit [s]	Reibdruck 2 [MPa]	Zeit [s]	Stauchdruck 1 [MPa]	Zeit [s]	Stauchdruck 2 [MPa]	Zeit [s]	Reibweg [mm]	Gesamtverkürzung [mm]	Maks. Leistung [kW]
Titan – Titan	Luft	15	0,8	23	1,5	23	1,0	30	1,0	4,4	7,0	23,6
	Flüss.	14	0,8	23	1,5	23	1,0	30	1,0	3,0	4,6	19,1
Vanadin – Vanadin	Luft	21	2,0	25	1,5	33	6,0	47	12,0	3,2	5,7	43,3
	Flüss.	21	2,0	26	1,45	34	6,0	47	12,0	2,2	3,8	27,2
Niob – Niob	Luft	14	1,0	30	2,0	32	6,0	32	8,0	1,2	4,6	29,5
	Flüss.	15	1,0	32	2,0	35	6,0	35	8,0	0,5	1,5	20,6
Tantal – Tantal	Luft	22	1,5	23	1,5	32	6,0	47	12,0	12,0	15,2	36,2
	Flüss.	22	1,5	23	1,5	32	6,0	47	12,0	12,2	15,5	25,1



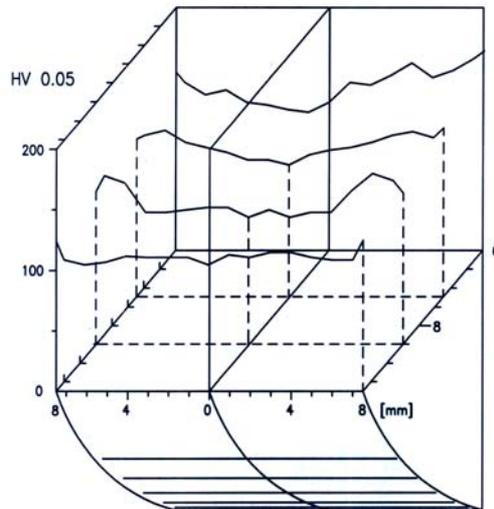
a)

b)

Bild5. Reibschweißverbindung Titan-Titan an Luft (a) und unter Flüssigkeitsschutz (b) reibgeschweißt, Parameter nach Tabelle 1



a)



b)

Bild 6. Reibschweißverbindung Tantal-Tantal, geschweißt unter Flüssigkeit, Parameter nach Tabelle 1; Makrogefüge (a) und Mikrohärteverlauf (b)

Zusammenfassung

Das modifizierte Reibschweißen unter Flüssigkeitsschutz macht es möglich, die erhitzten Verbindungspartner wirksam vor den Gasen der Luft abzuschirmen. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist eine vorteilhaftere Ausbildung der Wärmeeinflusszone. Reibschweißverbindungen zeigen meist eine, von der Mitte zum Rand hin breiter werdende Wärmeeinflusszone, was zu einer grobkörnigen, überhitzten Struktur in den Außenbereichen führt. Diese Erscheinung wird beim Schweißen unter Flüssigkeitsschutz verringert, da unter Flüssigkeit weniger Wärme entsteht und diese während des Schweißens besser abgeführt werden kann.

Ein weiterer Vorteil des Reibschweißens unter Flüssigkeitsschutz sind geringere Werkstoffverluste für die Ausbildung des Schweißgrates und während des Stauchens. Dies betrifft hauptsächlich Werkstoffe mit nicht zu hohen Festigkeiten und relativ niedrigen Schmelztemperaturen.

Das modifizierte Reibschweißen unter Flüssigkeitsschutz braucht niedrigste maximale Leistung als beim Schweißen an Luft.

Literaturnachweis

1. Fromm E., Gebhardt E.: *Gase und Kohlenstoff in Metallen*, Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 1976
2. Ambroziak A., Horn H., Lison R.: *Reibschweißen von Werkstoffpaarungen mit Sondermetallen*, Schweißen u. Schneiden, H.2/90
3. Ambroziak A.: *Friction welding of high-melting metals in fluid versus other joining methods*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998
4. Drzeniek H., Ambroziak A., Hinz L., Lugscheider E.: *Präparation und Gefügeentwicklung von Diffusionsschichten in Titan- u. Tantal-Proben*, Metallographie-Tagung, Leoben, Okt. 1990, s.179-188
5. Ambroziak A., Lison R., Watermeyer K.: *Gefügebau in reibgeschweißten Verbindungen von IVa u. Va Metallen, die an Luft und unter Flüssigkeitsschutz geschweißt wurden*, Metallographie-Tagung, Braunschweig, Sept. 1989, s.371-384

Alle Reibschweißverbindungen entstanden in der ZAT des Forschungszentrum Jülich GmbH. Für die Anregung und die hilfreiche Unterstützung bei meinen Versuchen danke ich, besonders Herrn Dr.-Ing. R. Lison.

Reibauftragsschweißen metallischer Werkstoffe – Prozess und Anwendungen

Friction Surfacing of Metals – Process and Applications

Dipl.-Ing. Matthias Beyer, Dr. Jorge F. dos Santos, Institut für Werkstofforschung, GKSS-Forschungszentrum GmbH, Geesthacht

Einleitung

Die immer geringer werdenden leicht erreichbaren Rohstoffressourcen zwingen die Förderung auf bisher als nicht erschließbar geltende Gebiete vorzustoßen. Eines dieser Gebiete ist die Tiefsee. Bisher als nicht rentabel geltende Lagerstätten speziell Öl und Gas geraten unter der Bedingung steigender Rohstoffpreise immer mehr in den Fokus.

Offshorebauwerke bzw. –strukturen sind dafür notwendig. Diese Strukturen sind neben der mechanischen Belastung natürlich auch der Korrosion ausgesetzt. Weiterhin kommt es zu Kavitationsschäden. Reibschweißverfahren, speziell das Reibauftragsschweißen (Friction Surfacing), können dabei sehr hilfreich sein, da sie unabhängig von der Wassertiefe eingesetzt werden können.

Ein weiterer Sektor, welcher für die Reibschweißverfahren interessant sind ist der Leichtbausektor. Dabei werden zunehmend Werkstoffe eingesetzt, welche sich mit herkömmlichen Verfahren nicht fügen lassen. Das Reibauftragsschweißen bietet die Möglichkeit lokale Verstärkungen durch Beschichtung herzustellen. Diese Funktionsschichten können dem Korrosions- und dem Verschleißschutz dienen und sowohl im Neubau als auch in der Reparatur eingesetzt werden.

Das GKSS Forschungszentrum GmbH Gruppe Fügetechnologie arbeitet seit längerer Zeit in zahlreichen Projekten an der Entwicklung und Anwendung des Reibauftragsschweißens für den Offshore- und den Leichtbaubereich.

Mit dieser Arbeit soll der Stand der Anwendung und der aktuellen Entwicklungstendenzen des Reibauftragsschweißens in seiner Bedeutung für den Leichtbau und den Offshore-Sektor aufgezeigt werden.

Prozess

Das Verfahren wurde das erste Mal Mitte des letzten Jahrhunderts erwähnt. [8] Näher wurde sich damit aber erst in den achtziger Jahren beschäftigt. Ein rotierender Bolzen wird mit einer definierten Kraft auf einer Werkstückoberfläche (Substrat) aufgesetzt. Durch die entstehende Reibungswärme wird der Bolzen im Kontaktbereich plastifiziert. Bei geeigneter Parameterwahl wandert die Reibebene in Richtung der Bolzenlängsachse. Reibung findet also nur zwischen dem Bolzenmaterial selbst statt. Auf dem Substrat wird so Bolzenmaterial deponiert. Durch die hohen Temperaturen und die Axialkraft wird eine metallurgische Verbindung zwischen Substrat und Beschichtung hergestellt. Überlagert man nach erfolgter Plastifizierung eine Translationsbewegung des Substrats relativ zum Schweißbolzen kann eine linienförmige Auftragsschweißschicht hergestellt werden.

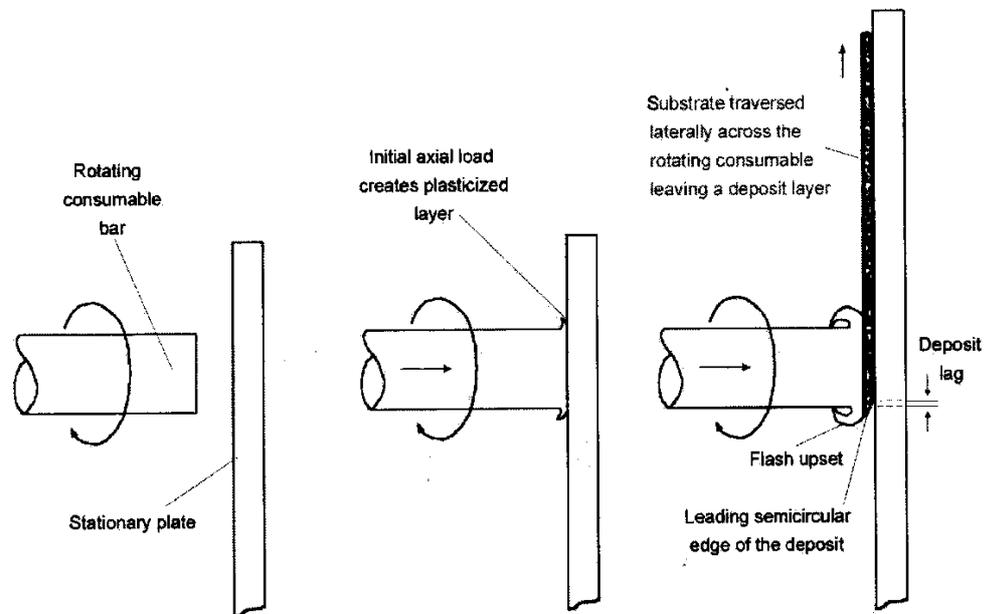


Abbildung 1: Prinzip des Reibauftragsschweißens (Friction Surfacing)

Schweißtechnik

Bei Verwendung des Reibschweißens unter Wasser ist wie schon ausgeführt keine Habitatkonstruktion nötig. Allerdings ist es dann notwendig Handhabungs- und Unterstützungssysteme für den direkten Wasserkontakt auszulegen.

Die Umgebungsbedingungen unter Wasser, besonders der Druck, stellen besondere Anforderungen an die Konstruktion der verwendeten Gerätschaften. Diverse

Spezialkonstruktionen und Handhabungssysteme sind in den letzten Jahren entwickelt worden gerade in Hinsicht auf die Automatisierung und Erleichterung der Arbeitsabläufe.

Die Marinisierung von Arbeitsgeräten folgt verschiedenen Konzepten die oft gemischt angewendet werden. Es ist grundsätzlich möglich:

- die Konstruktion abzudichten,
- wasserunempfindliche Komponenten (z.B. Keramiklager) zu verwenden,
- alle Hohlräume mit einer geeigneten Flüssigkeit oder aushärtenden Material (im allgemeinen Öl bzw. Harz) zu fluten bzw. zu vergießen.

Möglichkeit eins versagt schon in geringen Tiefen wenn z.B. Drehdurchführungen solch hohe Dichtkräfte erfordern, dass die Antriebskraft nicht mehr ausreicht. Mit zunehmender Wassertiefe werden diese Konstruktionen immer schwerer, da einem größeren Druck widerstanden werden muss. Die Möglichkeiten zwei und drei sind daher die am häufigsten verwendeten. Hydraulische Komponenten sind mittlerweile für annähernd jeden Zweck kommerziell verfügbar und müssen lediglich in Hinblick auf Korrosionsbeständigkeit angepasst werden.

Ein großes Problem in geringen bis mittleren Tiefen ist der vorhandene organische Bewuchs. Auch andere Ablagerungen können sich z.B. durch Korrosion gebildet haben. Zur Entfernung dieser Schichten sind hydraulisch angetriebene Schleif- und Trenngeräte sowie Bürstensysteme entwickelt worden, weiterhin sind Wasserstrahl-Hochdrucksysteme mit Zugabe von Abrasivgut im Einsatz.

Nach erfolgter Reinigung können dann Inspektionen der gefährdeten Bereiche vorgenommen werden. Dazu steht eine Reihe von zerstörungsfreien Verfahren zur Verfügung. Der Anfang ist sicher eine optische Begutachtung mittels Kamerasystem. Im Folgenden werden dann elektromagnetische oder akustische Verfahren zur Rissprüfung angewendet.

Die Firma Circle Technical Services hat in Zusammenarbeit mit der GKSS speziell für die portable Anwendung von Reibschweißverfahren unter Wasser einen Schweißkopf entwickelt, der aufgrund seiner Kompaktheit sowohl direkt von Tauchern montiert als auch in verschiedene Handhabungssysteme integriert werden kann.

Das Gerät HMS 3000 (

Abbildung 2) ist vollhydraulisch ausgelegt, d.h. die Antriebe für Drehung und Vorschub sind hydraulisch betrieben und auch die Sensorik ist in dem vollständig ölfüllten Gehäuse untergebracht. Das Gewicht des Geräts beträgt lediglich 16 kg, was einen portablen Einsatz ermöglicht. Die Antriebsleistung von 22 kW bei Nenndruck und -drehzahl von 6000 U/min erlaubt die Verwendung von Schweißbolzen von 10 bis zu 25 mm Durchmesser in Stahl. Die

maximale Arbeitstiefe ist auf 1000 m SWS ausgelegt. Die Steuerungs- und Überwachungselektronik kann sich in bis zu 4 km Entfernung befinden. Alle relevanten Schweißparameter werden aufgezeichnet und gespeichert. Es besteht eine Zulassung durch die Zertifizierungsgesellschaften Lloyds, ABS und DNV für den Betrieb in explosionsgefährdeten Örtlichkeiten (Zone 0) [2].



Abbildung 2: Schweißkopf HMS 3000

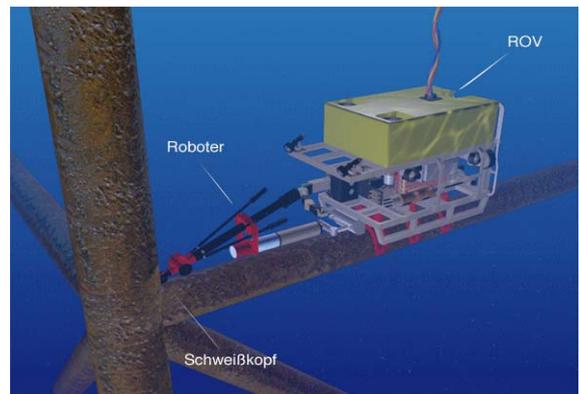


Abbildung 3: Robotereinsatz unter Wasser auf ROV

Zahlreiche verschiedene Befestigungssysteme für den HMS 3000 Schweißkopf wurden für den Unterwassereinsatz entwickelt. Um den automatisierten Betrieb auch unter Wasser zu ermöglichen erfolgte die Umrüstung verschiedener Robotersysteme bei GKSS. Bereits 1989 konnte der Unterwasserbetrieb eines Manutec r15 demonstriert werden. Im Jahr 2000 erfolgte dann die Fertigstellung eines Unterwasser-Prototyps auf Basis des Tricept TR 600 Systems mit Parallelkinematik. Beide Prototypen lassen sich in vorhandene Trägersysteme integrieren und ermöglichen genaue bahngesteuerte Operationen für Testprozeduren und im Fall des Parallelkinematiksystems Tricept TR 600 (Abbildung 3) auch das Reibschweißen unter Wasser.

Bei GKSS steht eine umfangreiche Ausrüstung zur Verfügung um verschiedene Reibschweißverfahren auch unter Wasser entwickeln und optimieren zu können

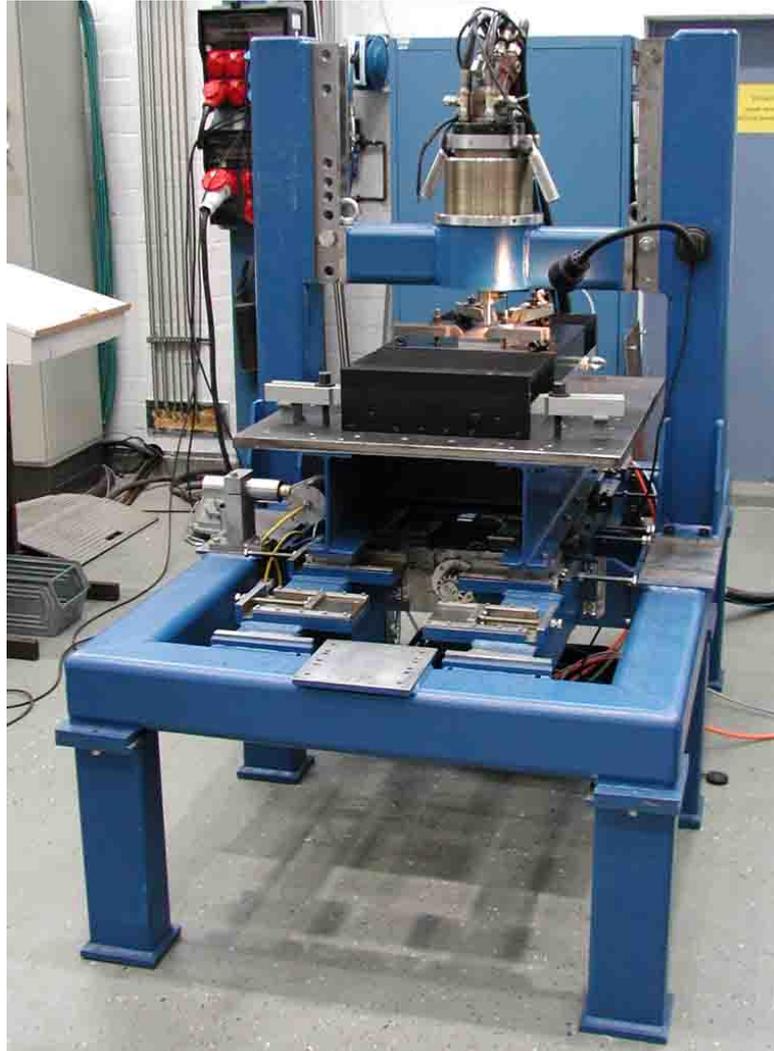


Abbildung 4: Reibauftragsschweißvorrichtung bei GKSS

Zum Reibauftragsschweißen wurden verschiedene Maschinen bei GKSS entwickelt. Eine dieser Maschinen zeigt Abbildung 4.

Ergebnisse und Eigenschaften

Die Auftragsschicht zeigt ein typisches Gefüge mit Schichtungsstrukturen ähnlich Zwiebelschalen und ist entsprechend der Prozessführung asymmetrisch ausgeprägt (Abbildung 5).

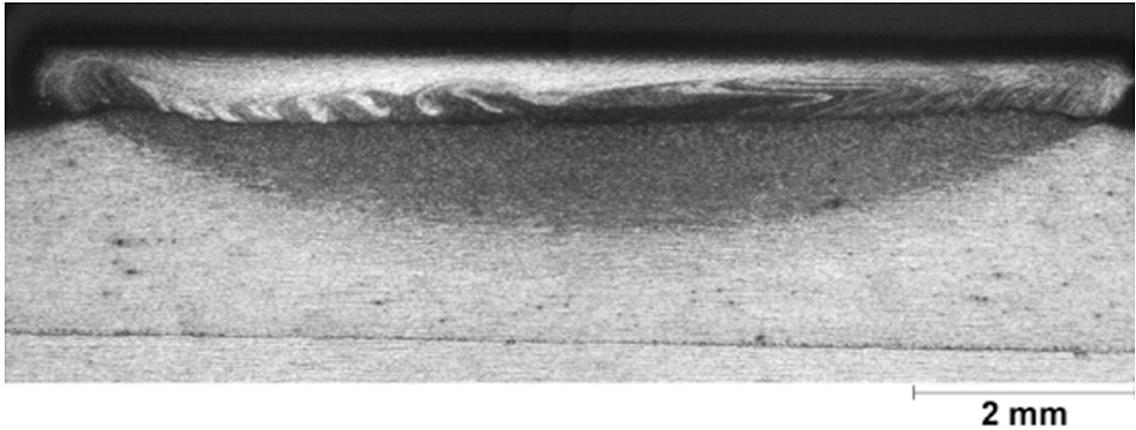


Abbildung 5: Querschliff einer Reibauftragsschweißung (CrNi-Stahl auf Karbonstahl)

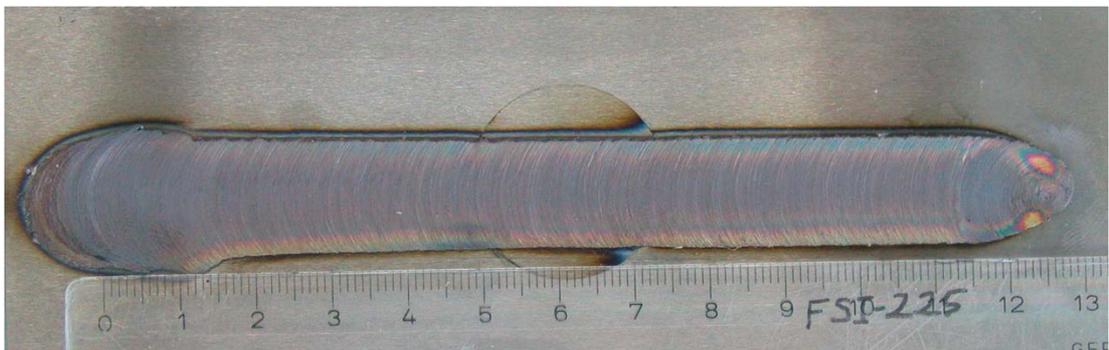


Abbildung 6: Oberfläche einer Reibauftragsschweißung (CrNi-Stahl auf Karbonstahl)

Die wesentlichen Schweißparameter sind Rotationsgeschwindigkeit, axiale Kraft und die Relativgeschwindigkeit zwischen Bolzen und Substrat. Bei optimalem Zusammenspiel der Prozessparameter ist eine sehr gute Bindung zwischen dem Auftragsmaterial und dem Substrat zu erreichen. Die metallurgischen Eigenschaften sowohl der Verbindung als auch der Beschichtung sind hervorragend. Eine kleine Wärmeeinflusszone ohne die Gefahr von Kaltrissen, geringe Eigenspannungen und wenig Verzug aufgrund der geringen Wärmeeinbringung [9] [10]. Die Aufmischung des Substratwerkstoffs ist signifikant geringer als mit jedem bekannten Schmelzschweißverfahren. Dieses ist besonders wichtig für Korrosionsschutz- und Verschleißschutzbeschichtungen, da die Eigenschaften der Beschichtungswerkstoffe erhalten bleiben und keine Legierungsbestandteile verloren gehen (Abbildung 7).

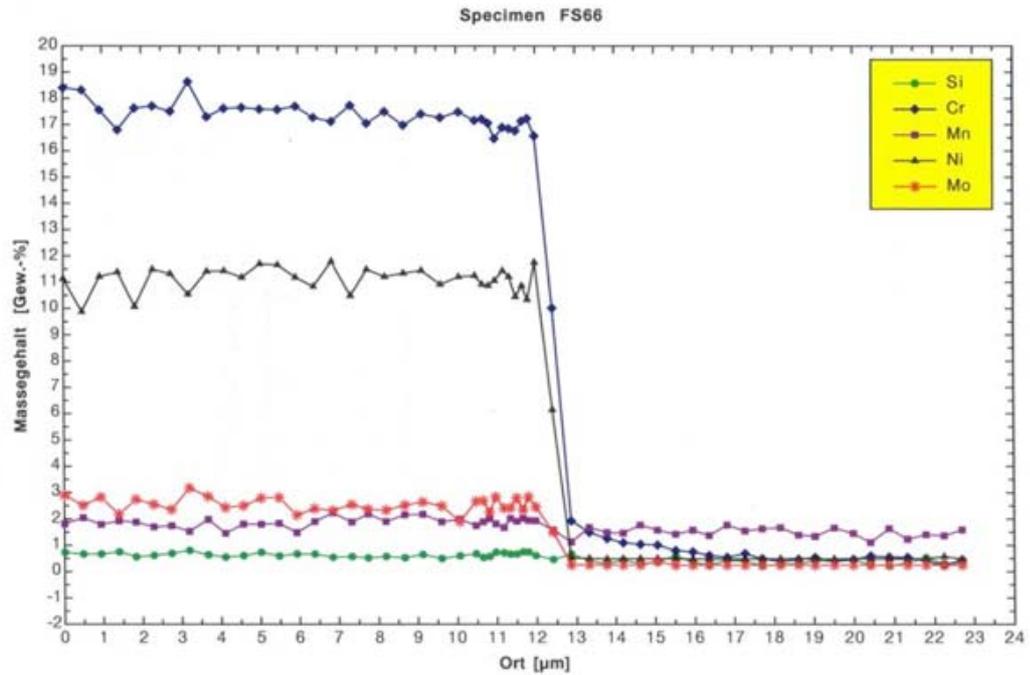


Abbildung 7: Elementverteilung an der Bindelinie einer Reibauftragsschweißung (CrNi-Stahl auf Karbonstahl)

Die Härtemessungen zeigen eine sehr kleine Wärmeeinflusszone (Abbildung 8).

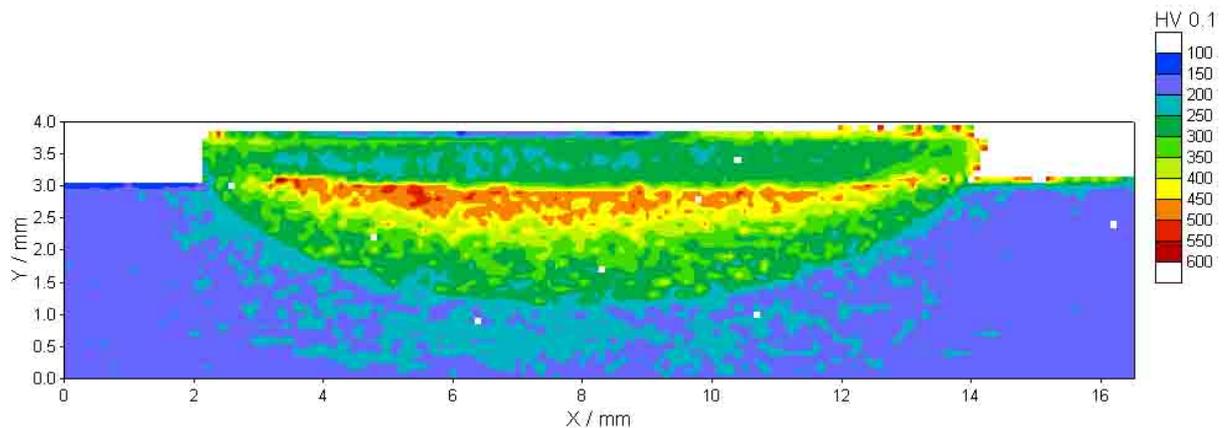


Abbildung 8: Härtescan einer Reibauftragsschicht und der Wärmeeinflusszone (austenitischer Edelstahl auf niedriglegiertem Stahl)

Bei GKSS sind bereits eine Reihe von Materialkombinationen mit diesem Prozess sowohl in trockener als auch unter Wasser erfolgreich geschweißt und untersucht worden. Auch die Einsetzbarkeit des Verfahrens mit Robotern konnte gezeigt werden [11]. Zur Beurteilung der

Beschichtungsqualität wurde eine neue Verfahrensvariante des sogenannten „Push-Off“-Tests entwickelt, welche noch evaluiert wird [12].

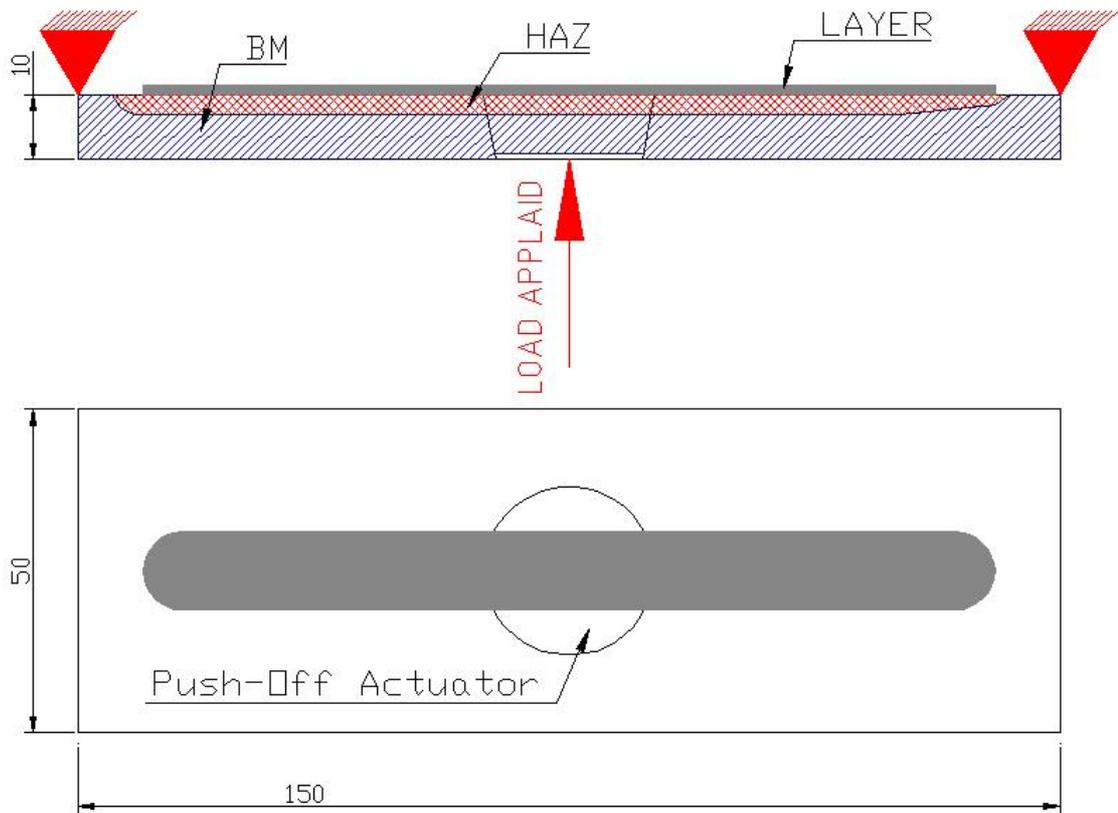


Abbildung 9: Push-Off-Test Probe

Diese Probenbauart erlaubt es auch dickere Schichten zu testen und die Haftfestigkeit zu der Beschichtung zu ermitteln.

Anwendung

Eine praktische Anwendung des Verfahrens erfolgt im Moment durch die Firma Frictec (UK), welche damit Messerkanten beschichtet und Verschleißschutzschichten aufbringt.

Aktuelle Entwicklung

Bei GKSS sind zur Zeit folgende Anwendungen in Entwicklung:

- Reparatur von Korrosionsschutz- Verschleißschutzbeschichtungen
- Nachbeschichten an Fügestellen von plattierten Blechen
- Anbringen von lokalen Verschleißschutzschichten
- Aufbringen von verlorenem Material zur Reparatur von Kavitationschäden an Schiffspropellern und Pumpenläufern
- Verbindungsschweißungen von metallurgisch problematischen Fügepartnern

Zur Entwicklung der neuen Anwendungen und ihrer praktischen Einsetzbarkeit sind weitere Punkte zu untersuchen, die im Folgenden aufgeführt werden:

- Evaluierung von zerstörungsfreien Prüfmethode
- Besseres Verständnis des Materialflusses und der Bindemechanismen des Prozesses
- Optimierung des Temperaturzyklus speziell beim Unterwasserschweißen

Zusammenfassung

Es konnte im Rahmen der Projekte der letzten Jahre die von GKSS durchgeführt wurden gezeigt werden, dass mit dem Reibauftragsschweißen Ergebnisse dargestellt werden können, welche sich mit keinem herkömmlichen Schweißverfahren im im Trockenen als auch im Unterwasserbereich erzielen lassen. Diese Reibschweißungen können, im Gegensatz zu Schmelzschweißungen, auch in größeren Tiefen mit hoher Qualität durchgeführt werden. Es lassen sich fehlerfreie Verbindungen generieren welche hervorragende mechanische Eigenschaften aufweisen.

Handhabungssysteme und Prozeduren für den automatisierten Einsatz dieses Verfahres wurden konstruiert und erprobt. Die aktuellen Projekte zielen darauf das Verfahren in die praktische Anwendung zu überführen.

Literatur

- [1] dos Santos, J.F., Vorlesungsskript Unterwassertechnik II Technische Universität Hamburg-Harburg

- [2] HMS 3000 specification sheet.pdf auf: <http://www.circletechnical.com>
- [3] Thomas, W., D. Nicholas, S.B. Jones, R.H. Lilly, C.J. Dawes and R.E. Dolby, „Friction Forming“. TWI, Cambridge, Patent No. EP 0 602 072 B1, 1992
- [4] W. Thomas, D. Nicholas, 'Friction Hydro Pillar Processing (FHPP)'. In TWI Connect, 1992(June).
- [5] AWS, 'Welding Handbook'. 8th ed, R.L. O'Brien. Vol.2. 1991, American Welding Society. P955
- [6] Meyer, A., Doktorarbeit, GKSS-Report, „Friction Hydro Pillar Processing – Bonding Mechanism and Properties“. Geesthacht 2003, ISBN 0344-9629.
- [7] Gul, B.M., Diplomarbeit, GKSS-Report, „Initial investigations on underwater FHPP-overlap-welds in mild steel with different gap sizes“. Geesthacht 2003
- [8] KLOPSTOCK, H, A.R. NEELANDS,– Patent Specification – '*An Improved Method of Joining or Welding Metals*'. Application date October 17th 1941, Ref 572789.
- [9] NICHOLAS, E.D., '*Friction Surfacing*', in ASM Handbook. 1993. p. 321 – 323.
- [10] NICHOLAS, E.D., and W.M. Thomas, 'Metal Deposition by Friction Welding'. Welding Journal, 1986 (August): p. 17-27.
- [11] Kalken, A.M.v., "Friction Surfacing of Stainless Steel on Mild Steel with a Robot". MSc, Delft University of Technology, Laboratory of Material Science and Engineering, 2001
- [12] Abschlußbericht Projekt EU CRAFT-1999-70658 „Friction Surfacing for Multi-Sectorial Applications“ (FRICSURF). 2003

Reibschweißen von Gusseisen mit Kugelgraphit

W. Hauke, Georg Fischer Fahrzeugtechnik AG, CH-Schaffhausen

Der Reibschweißprozess zählt mit zu den Pressschweißverfahren. Diese haben gemeinsam, dass zwei Stirnflächen der zu verschweißenden Partner gegenüber positioniert sind um an ihren Stirnflächen erwärmt zu werden und um dann durch Zusammenpressen miteinander verbunden zu werden. Neben dem Reibschweißen gibt es weitere bekannte Pressschweißverfahren, wie das Abbrennstumpfschweißen und das Magnetarc-Schweißen.

Reibschweißen zur Verbindung von metallischen Einzelteilen zu komplexen Bauteilen ist seit vielen Jahren Stand der Technik und ein wesentlicher Bestandteil in der Großserienfertigung. Es werden nicht nur unterschiedliche Stahlsorten miteinander verschweißt, sondern auch Aluminium-Legierungen, Magnesium und Buntmetalle. Darüber hinaus gibt es materialübergreifende Mischverbindungen.

Auch graphithaltige Eisenwerkstoffe wie Gusseisen mit Kugelgraphit, - nach der Normabkürzung EN- GJS -, können untereinander nach dem Reibschweißverfahren verbunden werden. Ebenso sind Mischverbindungen zwischen ferritischen mit perlitischen EN- GJS - Sorten aber auch mit Stählen möglich.

Damit werden der Konstruktion neue Möglichkeiten eröffnet, Gusseisen mit Kugelgraphit unter Grossserienbedingungen zum Verbindungsschweißen heranzuziehen, um Bauteile miteinander zu verbinden.

Ein Vorzug beim Reibschweißen von Gusseisens mit Kugelgraphit ist, dass ein Werkstoff mit stahlähnlichen Eigenschaften bei freier Formgestaltung verwendet werden kann, der wiederum mit einem optimal gefertigten Gegenstück zu einem integralen Bauteil zusammengefügt werden kann.

Kombinierte Festigkeitseigenschaften mit Einsparungen von Fertigungsschritten und vermindertem Materialaufwand sind realisierbar.

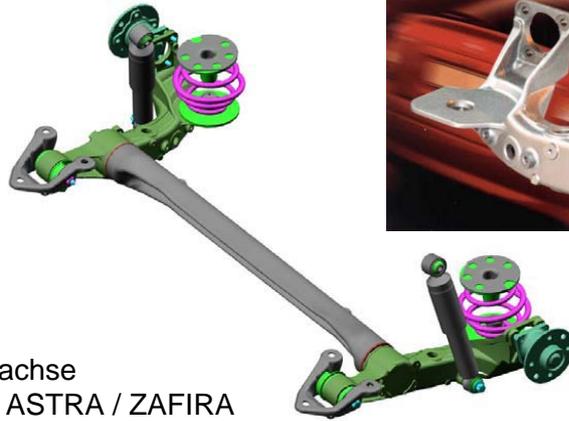
Mit dem Magnetarc- Schweißverfahren, einem weiteren Pressschweißverfahren, werden bereits seit Jahren Millionen von Verbundlenker- Hinterachsen hergestellt, wie z.B. für PKW der ASTRA - Klasse, oder den Kompakt - Van ZAFIRA.

Während beim Magnetarcschweißen die zu verbindenden Wandstärken auf ca. 6 mm beschränkt sind, wurden mit dem Reibschweißen Verbindungen bis zu 15 mm hergestellt. Entsprechende Bauteilgeometrien mit angepasster Maschinenauslegung lassen nach vorliegenden Erfahrungen durchaus noch mehr erwarten.

Beide Verfahren decken damit nebeneinander einen Bereich von Verbindungen ab, die für Sicherheitskonstruktionen von Gusseisen mit Kugelgraphit als Schweißpartner unter Großserienbedingungen Anwendung finden.

+GF+

Magnetarc-Schweißen Anwendungsbeispiel



Hinterachse
OPEL ASTRA / ZAFIRA



International Technical Development Center



k:\8151\ck25\lmsv\3000.ppt / PE Chassis_15.12.99 K.Haarhoff

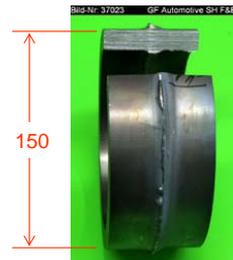
GF Automotive

„Geesthachter Schweißstage „06“

+GF+

Beispiel: GJS<>GJS Reibschweißverbindung

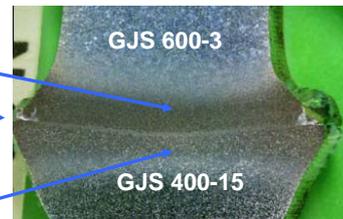
Verbindung im Schweißzustand:
GJS 600-3 mit GJS 400-15



GJS 600 sorbitisch – perlitische
Übergangszone.
Martensitgehalte < 4%

Nach aussen gedrückte GJS – Schmelze die
ledeburitisch erstarrt ist.

GJS 400 sorbitisch – perlitische - ferritische
Übergangszone.



GF Automotive

„Geesthachter Schweißstage „06“

+GF+

Beispiel: Stahl<>GJS Reibschweißverbindung

Verbindung im Schweißzustand:
S 355 JO mit GJS 600 - 3



Gussseitige Verbindungszone über einen breiteren Bereich martensitisch abkühlt. In den Übergängen ZTU-gemäße Zwischenstrukturen.

Nach aussen gedrückte GJS – Schmelze die ledeburitisch erstarrt ist.

Dünnere Aufkühlungssaum der leicht martensitisch abgekühlt ist.



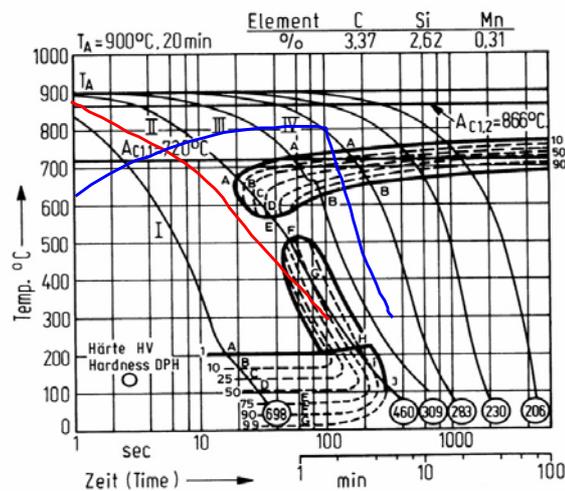
GF Automotive

„Geesthachter Schweißstage „06“

+GF+

Massnahme zur Vermeidung von Martensit

Beispiel: Verzögerte Abkühlung:



Abkühlung aus der Schweißwärme

verzögerte Abkühlung durch induktive Erwärmung

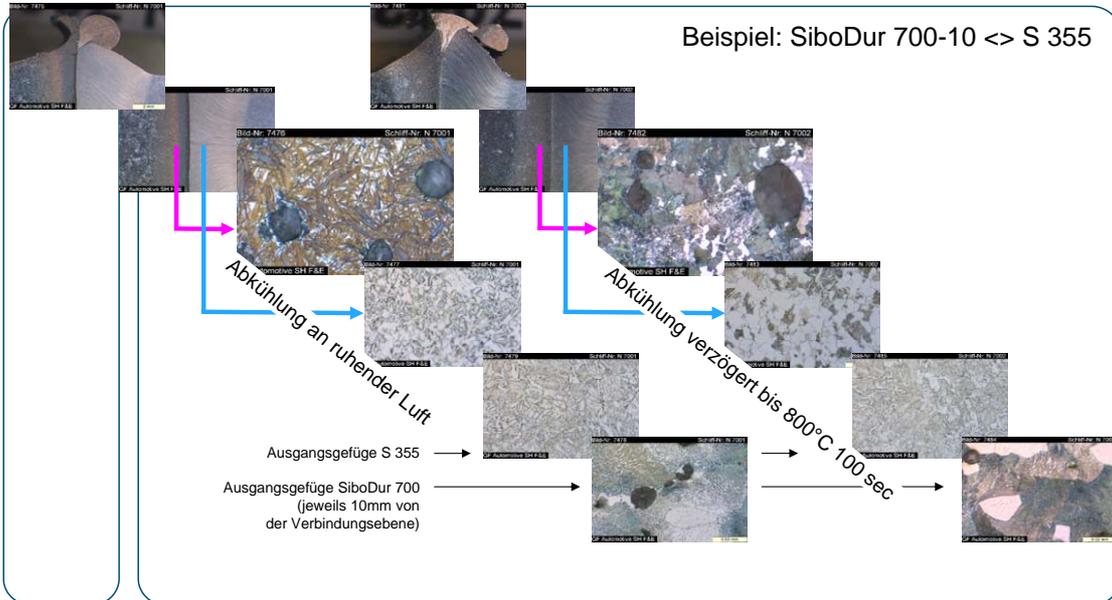
Basis - Diagramm nach:
VDG Taschenbuch Nr. 6 1979

GF Automotive

„Geesthachter Schweißstage „06“

+GF+

Ergebnis der verzögerten Abkühlung

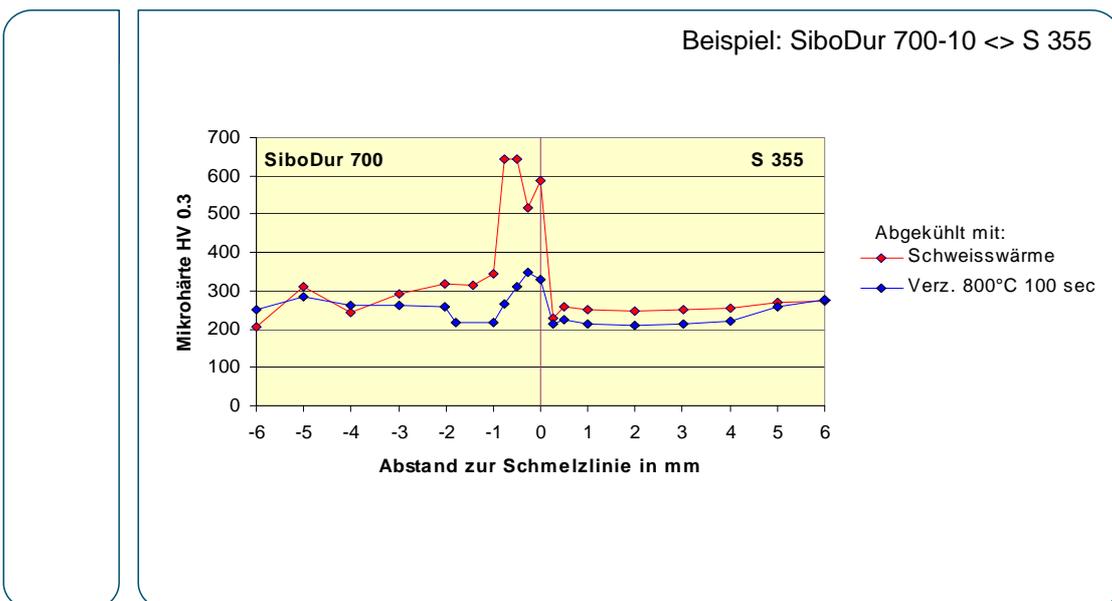


GF Automotive

„Geesthachter Schweißstage „06“

+GF+

Härteverläufe mit und ohne verzögerte Abkühlung



GF Automotive

„Geesthachter Schweißstage „06“

+GF+

Reibschweißprozess

Voraussetzung:

- Rotationssymmetrische Teile

Vorteile:

- Es lassen sich alle GJS – Sorten untereinander, aber auch mit Stählen verbinden
- Verbindungen gleicher Werkstoffe sind in der Regel ohne Wanddicken-einschränkung, d.h. bis zu Vollquerschnitt möglich
- Gegenüber dem Magnetarc- Verfahren lassen sich größere Wanddicken verbinden

Nachteile:

- Parameterfindung komplexer als bei Schweißverfahren mit elektrischer Energieeinbringung (Datenbanken, Erfahrung),
- Reibschweißungen zwischen unterschiedlichen Werkstoffen müssen oft aus physikalischen Gründen auf Hohlprofile eingeschränkt werden.

GF Automotive

„Geesthachter Schweißtage „06“

+GF+

Durchführung des Reibschweißprozesses



Spannen



Erwärmen



Entnehmen

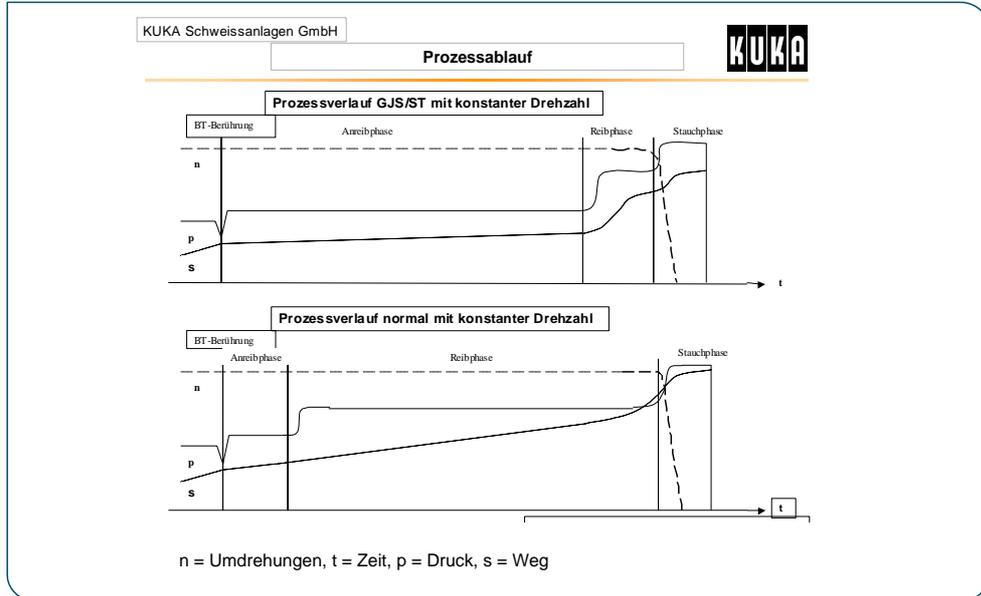
KUKA Schweißanlagen GmbH
Augsburg, Typ RS 80

GF Automotive

„Geesthachter Schweißtage „06“

+GF+

Reibschweißen Prozessablauf

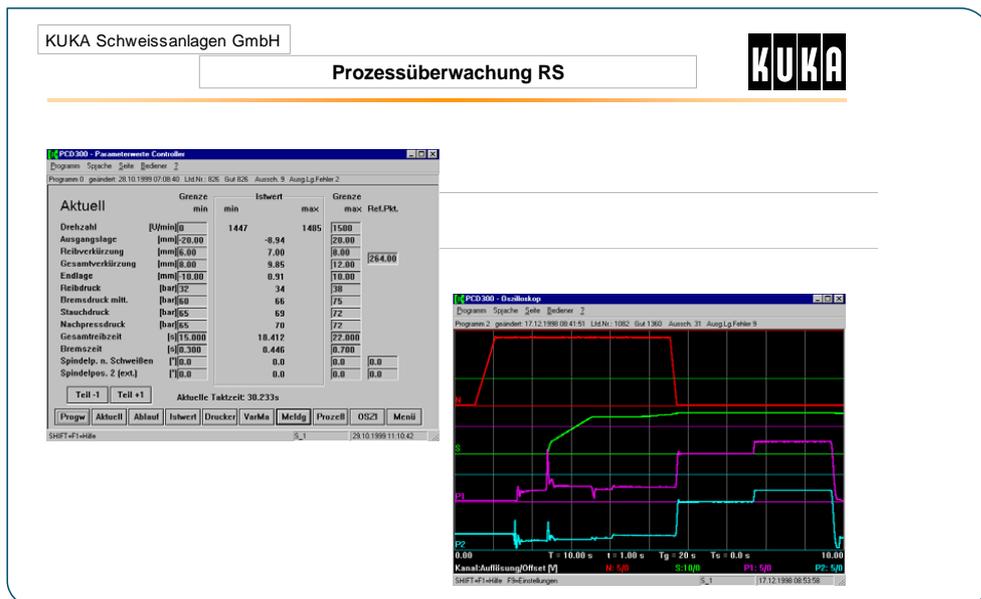


GF Automotive

„Geesthachter Schweißstage „06“

+GF+

Reibschweißen Prozessüberwachung

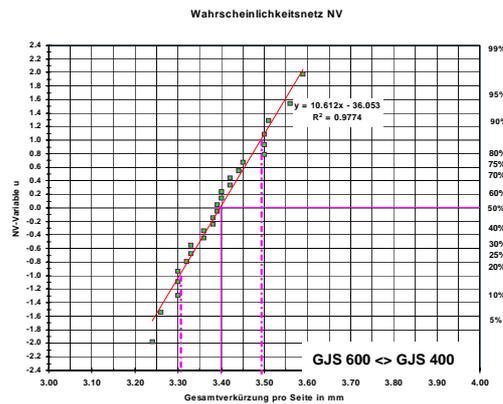


GF Automotive

„Geesthachter Schweißstage „06“

+GF+**Längenänderung beim Reibschweißen**

Beispiel: Gesamtverkürzung von Rohrverbindungen



Aussen Ø 150mm
 Wanddicke 13mm

Anzahl Schweißungen $n = 26$

Mittelwert $\bar{x}_q = 3.40\text{mm}$
 Streuung $s = 0.09\text{mm}$

GF Automotive

„Geesthachter Schweißstage „06“

+GF+**Anwendungsfälle**

Rotationssymmetrische Verbindungsstellen, bei denen man Gusseisen mit Kugelgraphit mit anderen GJS – Sorten oder Stählen verbinden möchte:

- Achsen untereinander
 - Achsen mit Gehäusen
 - Wellen mit Flanschen
 - Wellen mit Gelenkköpfen
 - Deckel mit Gehäusen
 - Rohre mit Guss- Flanschen
 - Stahlzapfen an Gussträger
- u.a.**



GF Automotive

„Geesthachter Schweißstage „06“

+GF+

Zusammenfassung

- Gusseisen mit Kugelgraphit wird unter Großserienbedingungen prozesssicher geschweißt.
- Pressschweißverfahren kommen dem gusseigenen Erstarrungsverhalten der Schweißnähte entgegen.
- Die Verbindung von GJS – Sorten untereinander, aber auch mit Stählen, ermöglicht neue Eigenschaftskombinationen in komplexen Bauteilen.
- Magnetarc-Verfahren sind bis zu Wandstärken von etwa 6mm einsetzbar. Der Reibschweißprozess ermöglicht je nach Bauteilgröße Wanddicken von mindestens 15mm zu verbinden.
- Die freie Formgebung von Gussteilen führt zu einer erweiterten Gestaltungsfreiheit von Baugruppen.
- Durch Schweißprozesse vermiedene Materialüberdeckungen, Flansche und Verbindungselemente kann Gewicht gespart werden.

GF Automotive

„Geesthachter Schweißtage „06“

Reibpunktschweißen von Aluminiumlegierungen

H. Knoll, Fachhochschule Düsseldorf,
J. –T. Isakovic, RIFTEC GmbH, Geesthacht
M. Beyer, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH,

1 Einleitung

Die Forderung nach nachhaltigem Wirtschaften und verringerter Schadstoffemission bedingt eine deutliche Verringerung des Verbrauchs fossiler Energieträger und nicht nachwachsender Rohstoffe. Einen deutlichen Beitrag hierzu kann die Technik durch Wirkungsgraderhöhung bei der Energiewandlung sowie durch Verringerung des Konstruktionsgewichtes vor allem bewegter Teile leisten. Dies wiederum kann durch den Übergang zu leichten Werkstoffen und zu höherer Ausnutzung der Werkstofffestigkeit erreicht werden. Weit gehender Leichtbau kann nicht nur zu beträchtlichen Einsparungen an natürlichen Ressourcen führen, sondern auch bei Fahrzeugen das Verhältnis von Nutzlast zu Leergewicht verbessern. Dies ist von besonderer Bedeutung für die Verkehrstechnik, aber auch für Bereiche der Energietechnik. Auf beiden Gebieten besetzt die deutsche Industrie traditionell internationale Spitzenplätze, die sich in entsprechenden Weltmarktanteilen niederschlagen.

Um diese Position zu halten, bedarf es großer Anstrengungen in Forschung und Entwicklung, wobei die Beherrschung der Lebenszykluskosten von Fahrzeugen einen hohen Stellenwert hat. Preise und Verfügbarkeit fossiler Energien und von Rohstoffen sowie die Dauer schadensfreier Laufzeiten stellen wichtige Komponenten der Lebenszykluskosten dar, deren Bedeutung, vor allem wegen der ungünstigen Einschätzung der Fördermengen fossilen Energieträger, künftig zunehmen wird. Eine entscheidende Rolle spielt hier die Materialforschung, deren Fortschritte den modernen Leichtbau erst möglich machen.

Die Anforderungen an neue Werkstoffe steigen rasant. In der Folge sollen beispielsweise zum einen neuartige intermetallische Legierungen auf Titanbasis Eigenschaftsprofile aufweisen, die die Vorteile von metallischen und keramischen Werkstoffen in sich vereinen: einsetzbar bei hohen Temperaturen, dazu leicht und extrem fest und trotzdem verformbar und zäh. Zum anderen sind es Magnesiumwerkstoffe, die für einen verstärkten Einsatz in der Verkehrstechnik entwickelt werden, um das Leichtbaupotenzial metallischer Werkstoffe in Konkurrenz zu Polymerstoffen zu erhöhen.

Leichtbau wird jedoch nicht nur durch leichte Werkstoffe ermöglicht: neue, für Leichtbauwerkstoffe geeignete Schweißverfahren werden entwickelt, die höchste Anforderungen an die Nahtgüte erfüllen. Wirtschaftlichkeit bei möglichst gesteigerter Sicherheit wird durch die Entwicklung von umfassenden Bewertungsverfahren für Werkstoffe und Bauteile gewährleistet; hierbei spielen Computersimulationen eine zunehmende Rolle.

In diesem Beitrag werden Eigenschaften von Fügeverbindungen am Leichtbauwerkstoff Aluminium dargestellt und diskutiert, die mit dem neuen Fügeverfahren Reibpunktschweißen geschweißt wurden.

2 Reibpunktschweißen

Das Reibpunktschweißen ist ein neues Festphasen-Schweißverfahren und wurde am GKSS-Forschungszentrum Geesthacht in der Gruppe Fügetechnologie entwickelt, erprobt und patentiert. Das Verfahren ermöglicht die Herstellung punktförmiger Schweißverbindungen für Überlappverbindungen ohne Zusatz- und Hilfswerkstoffe.

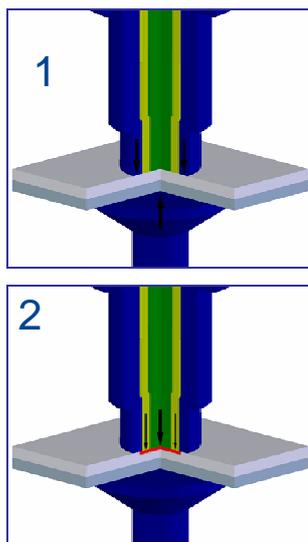
Die RIFTEC GmbH, ein 2003 aus der Fügetechnologie ausgegründetes Unternehmen, ist der erste Lizenznehmer des Patents und beschäftigt sich unter anderem mit der Weiterentwicklung des Reibpunktschweißens zur industriellen Reife. Um diese Entwicklung zu beschleunigen wurde Anfang 2005 ein Kooperationsprojekt mit dem GKSS-Forschungszentrum ins Leben gerufen. RIFTEC übernahm dabei in Zusammenarbeit mit der Firma Harms und Wende GmbH & Co KG aus Hamburg die Entwicklung und den Bau eines industriell einsetzbaren Schweißsystems. In enger Zusammenarbeit mit den Reibschweißspezialisten der GKSS Fügetechnologie werden der Schweißprozess und das Werkzeugdesign optimiert.

Beim Reibpunktschweißen wird der Werkstoff in der Fügezone unter Zuhilfenahme rotierender Schweißwerkzeuge erwärmt und plastifiziert. Der Werkstoff befindet sich in einem teigigen Zustand und ist so ohne Probleme plastisch verformbar.

Die Verbindung die dabei entsteht ist rotationssymmetrisch und stoffschlüssig. Das Prinzip des RPS- Prozesses wird Mithilfe der nachstehenden Abbildungen erläutert.

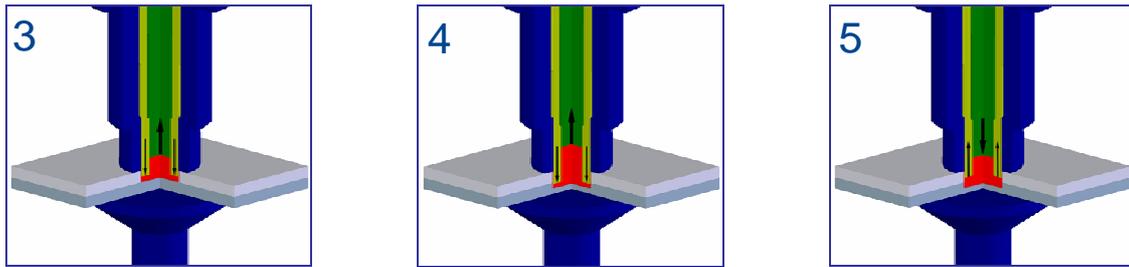


Abb. 1: RPS – Anlage.



Das Werkzeug wird mit vorgegebenem Druck auf den Verbindungsbereich aufgesetzt. Der äußere Stempel (blau) sorgt für eine Spannung bzw. Fixierung der Fügepartner auf dem ebenfalls feststehenden Gegenstück – der Unterlage (ebenfalls blau).

Die durch einen rotierenden Stift (dunkelgrün) und die ihn umgebende gleichsinnig rotierende Hülse (hellgrün) erzeugte Reibungswärme plastifiziert den Werkstoff. Die rotierende Hülse wird mit einer definierten Geschwindigkeit in das Werkstück hineingedrückt.



Der Stift wird gleichzeitig vom Werkstück abgehoben. Dabei entsteht zwischen der Hülse und dem festen Gehäuse ein definierter Raum, welcher den mit der Hülse verdrängten plastifizierten Werkstoff aufnimmt.

Dieser Vorgang wird beendet, sobald die Hülse eine definierte Tiefe erreicht hat. Die Einschweißtiefe wird so gewählt, dass das obere Blech / die oberen Bleche sicher angebunden werden.

Die Hülse wird mit vorgegebener Geschwindigkeit wieder aus dem Werkstück hinausgezogen. Gleichzeitig drückt der Stift den gesammelten plastifizierten Werkstoff wieder in den Verbindungsbereich zurück.



Abb. 2: Verfahrensprinzip des Reibpunktschweißens.

Im Verbindungsbereich besteht jetzt eine stoffschlüssige punktförmige Verbindung.

Sobald der Stift und die Hülse ihre Ausgangsposition erreicht haben, ist der Fügevorgang beendet und das Werkzeug kann abgehoben werden.

Das Reibpunktschweißen ist zum Fügen von Leichtmetalllegierungen auf Aluminiumbasis optimiert. Dabei ist auch das Fügen von weiteren Leichtmetallen wie Magnesium sowie die Herstellung von Mischverbindungen denkbar.

2.1 Charakteristika des RPS – Verfahrens

Durch den Reibschweißprozess ergeben sich spezifische Vor- und Nachteile im Vergleich zu anderen Fügeverfahren. Diese sollen im Folgenden aufgeführt werden:

- Stoffschlüssiges Fügen unterhalb der Schmelztemperatur, d.h. keine Heißrissbildung, keine Poren, kaum Wärmeverzug, dichte und elektrisch leitende Verbindung
- Kein zusätzliches Verbindungselement, Zuführeinrichtungen, Schweißzusätze etc. notwendig
- Blechebenen Ausbildung auf Oberseite der Verbindung – keine Nachbearbeitung
- Keine Beeinträchtigung der Oberflächengüte der Rückseite
- Große Schweißpunktdurchmesser lassen sich auch bei geringer Blechdicke herstellen. Zurzeit sind Fügepunktdurchmesser bis zu ca. 11 mm möglich und Bleche mit einer Gesamtdicke von bis zu 5 mm sind schweißbar.
- Bei hoher Bauteilsteifigkeit auch mit einseitiger Zugänglichkeit verwendbar
- Hohe Prozesssicherheit bei geringer Anzahl relevanter Verfahrensparameter
- Unterschiedliche Blechstärken ohne Werkzeugwechsel schweißbar
- Geringer Vorbereitungsaufwand
- Nur ein Arbeitsgang bei hoher Fügegeschwindigkeit
- Hohe Energieeffizienz
- Geringe Umweltbelastung
- Keine Schutzmaßnahmen erforderlich, da keine Strahlung, kein Lärm, keine Spritzer und keine Gase entstehen

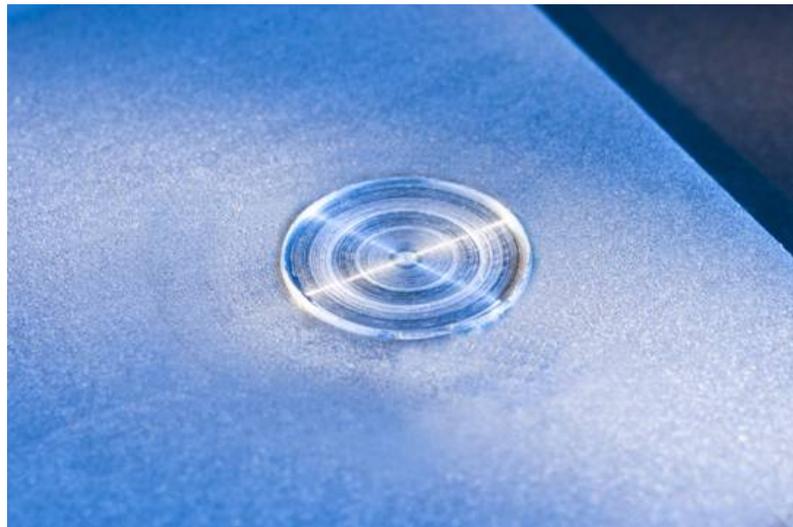


Abb. 3: Schweißpunktoberfläche einer Reibpunktschweißverbindung.

2.2 Verfahrensvarianten

Im Laufe der Vorversuche des Projektes sind drei mögliche Verfahrensvarianten für das Reibpunktschweißen untersucht und miteinander verglichen worden.

Verfahrensvariante 1:

Stift und Hülse dringen nacheinander in das untere Blech ein.

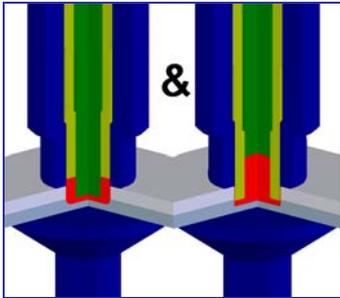


Abb. 4: Verfahrensvariante 1

Vorteil:

- Material wird stark verrührt
- Großer verbundener Querschnitt

Nachteil:

- Probe wird stärker erhitzt
- Lange Prozessdauer

Verfahrensvariante 2:

Nur der Stift dringt in das unterste Blech ein.

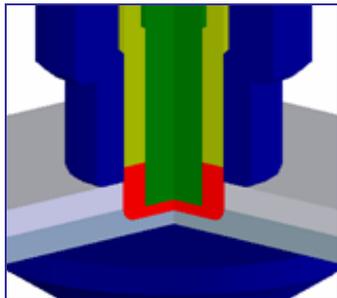


Abb. 5: Verfahrensvariante 2

Vorteil:

- Hohe Schweißgeschwindigkeit

Nachteil:

- Geringer verbundener Querschnitt

Verfahrensvariante 3:

Nur die Hülse dringt in das unterste Blech ein.

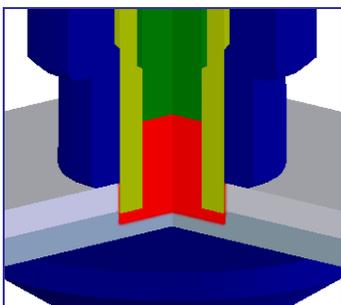


Abb. 6: Verfahrensvariante 3

Vereint die Vorteile der Prozessvarianten 1 und 2 bei relativ geringer Wärmeeinbringung

Aufgrund der Vorteile der letzten Variante und die guten Ergebnisse im Laufe der Voruntersuchungen wurde im Projekt nur die Verfahrensvariante 3 verwendet.

3 Optimierung des RPS- Verfahrens

Im Vordergrund des in der Einleitung angesprochenen Kooperationsprojektes zwischen dem GKSS-Forschungszentrum und Riftec steht die Prozessoptimierung mit umfangreichen Werkzeugentwicklungen, Verfahrensanalysen und Parameteroptimierungen. Erste Ergebnisse aus diesem Projekt werden im Folgenden dargestellt. Sämtliche Schweißungen wurden bei der Riftec GmbH auf der seriennahen RPS – Entwicklungsanlage durchgeführt.

Das gesamte Projekt umfasst eine Werkstoffauswahl von fünf Aluminiumlegierungen. Erste Untersuchungen und Analysen wurden an den, speziell der Automobilbaubranche eingesetzten Legierungen EN AW5042 und EN AW6181-T4 durchgeführt. Im folgendem werden die Zusammensetzung und die Mechanischen Eigenschaften dieser beiden Grundwerkstoffe beschrieben [1].

3.1 Grundwerkstoff EN AW5042

Der Werkstoff EN AW5042 wird als nicht aushärtbare Aluminiumlegierung klassifiziert. Sie zeichnet sich durch einen relativ hohen Magnesiumgehalt aus. Mn bewirkt in AlMg-Legierungen neben Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit eine zusätzliche Festigkeitssteigerung: Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes ist in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Nominelle chemische Zusammensetzung von EN AW5042.

Chemisches Symbol	Zulässige Beimengungen in % der Masse							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Andere
AlMg3,5Mn	0,2	0,35	0,15	0,2-0,5	3,0-4,0	0,1	0,25	0,2

Die Al- Mn- Mg- Legierungen zeichnen sich noch durch eine gute Zähigkeit aus, weshalb auch ein Einsatz bei tiefen Temperaturen möglich ist. Die eingesetzte Wandstärke beträgt 1,5mm. Die mechanischen Eigenschaften dieser Aluminiumlegierung sind in der folgenden Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2: Mechanische Eigenschaften von EN AW5042.

Bezeichnung	Dicke (mm)	Streckgrenze Rp 0,2 (MPa)	Zugfestigkeit Rm (MPa)	Dehnung A50 (%)
EN AW5042	0,25 – 0,50	230 - 280	280 – 320	6

3.2 Grundwerkstoff EN AW6181-T4

Der Werkstoff EN AW6181 ist eine aushärtbare Legierung im Wärmebehandlungszustand T4. Das Halbzeug wurde lösungsgeglüht, abgeschreckt und kaltausgelagert. Hauptlegierungselemente sind Magnesium und Silizium. Legierungen der Serie 6xxx werden vorwiegend als Strangpressprofile verwendet. Sie können gut wärmebehandelt werden. Der Werkstoff wurde in einer Wandstärke von 1,7mm verschweißt.

Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes ist in der Tabelle 3 dargestellt, die mechanischen Eigenschaften dieser Aluminiumlegierung folgen in der Tabelle 4.

Tab.3: Nominelle Chemische Zusammensetzung von EN AW6181-T4.

Chemisches Symbol	Zulässige Beimengungen in % der Masse								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Andere
AlSi1Mg0,8	0,8-1,2	0,45	0,10	0,15	0,6-1,0	0,10	0,20	0,10	0,20

Tab. 4: Mechanische Eigenschaften von EN AW6181-T4.

Bezeichnung	Dicke (mm)	Streckgrenze Rp 0,2 (MPa)	Zugfestigkeit Rm (MPa)	Dehnung A60 (%)
EN AW6181-T4	1,67 – 1,68	140 - 144	251 - 254	27,5

3.3 Parameterkombination / Versuchsmatrix

In Voruntersuchungen wurden grundlegend die Parameterbereiche definiert, in denen die Proben für eine Charakterisierung der Verbindung geschweißt werden sollten. Als Parameter wurden 3 verschiedene Einschweiß-tiefen mit 5 Gesamtschweißzeiten kombiniert. Von den 15 möglichen Punkten wurden 10 als sinnfällig erachtet, die wiederum mit 3 verschiedenen Schweißwerkzeugdrehzahlen geschweißt wurden (siehe Tabelle 5).

Tab. 5: Darstellung der Versuchsmatrix.

Matrix	Gesamtschweißzeit: 1			Gesamtschweißzeit: 2			Gesamtschweißzeit: 3			Gesamtschweißzeit: 4			Gesamtschweißzeit: 5		
	Drehzahl 1	Drehzahl 2	Drehzahl 3	Drehzahl 1	Drehzahl 2	Drehzahl 3	Drehzahl 1	Drehzahl 2	Drehzahl 3	Drehzahl 1	Drehzahl 2	Drehzahl 3	Drehzahl 1	Drehzahl 2	Drehzahl 3
Einschweiß-tiefe 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	X		
Einschweiß-tiefe 2	X			13	14	15	16	17	18	19	20	21	X		
Einschweiß-tiefe 3	X			X			22	23	24	25	26	27	28	29	30

Die Parameterkombinationen ergeben 30 Parametersätze, abgestimmt auf die jeweilige Legierung.

3.4 Versuchsprogramm

Zur Charakterisierung der geschweißten Verbindungen kamen neben einfachen Schälversuchen Scherzug- und Kopfzugversuche zum Einsatz. Drei Proben pro Zugversuch wurden geprüft und der Mittelwert errechnet. Die Bruchkanten der Zugproben wurden einer Analyse unterzogen. Des Weiteren erfolgte pro Parametersatz die Anfertigung eines metallographischen Schliffes. Vereinzelt wurden hiermit Härteverläufe erstellt.

4 Ergebnisse und Diskussion

Im Laufe der Prozessoptimierung wurde eine Versuchsmatrix abgearbeitet. Dabei wurden die Hauptparameter (Eindringtiefe des Werkzeugs, Drehzahl der Schweißwerkzeuge sowie die Schweißdauer) in jeweils mindestens drei Abstufungen variiert. Die Schweißungen wurden nach der gezeigten Verfahrensvariante mit Hilfe eines zylindrischen RPS- Tools ausgeführt.

Bei beiden untersuchten Aluminiumlegierungen konnten im abgesteckten Parameterbereich fehlerfreie Schweißpunkte erstellt werden. Die Schweißzeiten lagen zwischen 2 und 7 Sekunden, in das untere Blech wurde zwischen 0,2 und 0,8 mm tief eingedrungen, die Drehzahlen lagen zwischen 700 und 2.900 1/min. Der zur Verfügung stehende, weite Parameterbereich deutet auf eine hohe Prozessstabilität hin.

Beide untersuchten Legierungen zeigen beim Scherzugversuch grundsätzlich das gleiche Verhalten. Die Schweißpunkte erreichen ihre maximalen Festigkeitswerte bei den minimalen Eindringtiefen des Werkzeuges. Bei tieferem Eindringen tritt keine Erhöhung der Festigkeit auf sondern es wird im Gegenteil eine geringere Zugfestigkeit erreicht.

4.1 Scherzugversuch

Das folgende Diagramm zeigt die Mittelwerte der Scherzugproben von der AW6181 Legierung bezogen auf die Parameterkombinationen. Die Drehzahlangabe 2900 / 2700 beschreibt die Umdrehungen beim Eindringen und beim Herausziehen des Schweißwerkzeuges.

Bei den Drehzahlen 2900 und 2400 ist deutlich der Abfall der Festigkeit bei steigender Einschweißtiefe und Schweißzeit zu erkennen. Bei der Drehzahl 1900 und einer Einschweißtiefe von 0,2 mm ist ein leichter Anstieg der Festigkeit zu erkennen, jedoch bricht die Festigkeit bei der nächsten Einschweißtiefe ein. Die Maximalfestigkeit von 7,3 kN wird mit der schnellsten Schweißzeit erreicht. Das Diagramm zeigt deutlich, dass selbst bei ungünstig gewählten Parametern die Festigkeit der Fügeverbindung höher als bei vergleichbaren mechanischen Fügeverfahren ist.

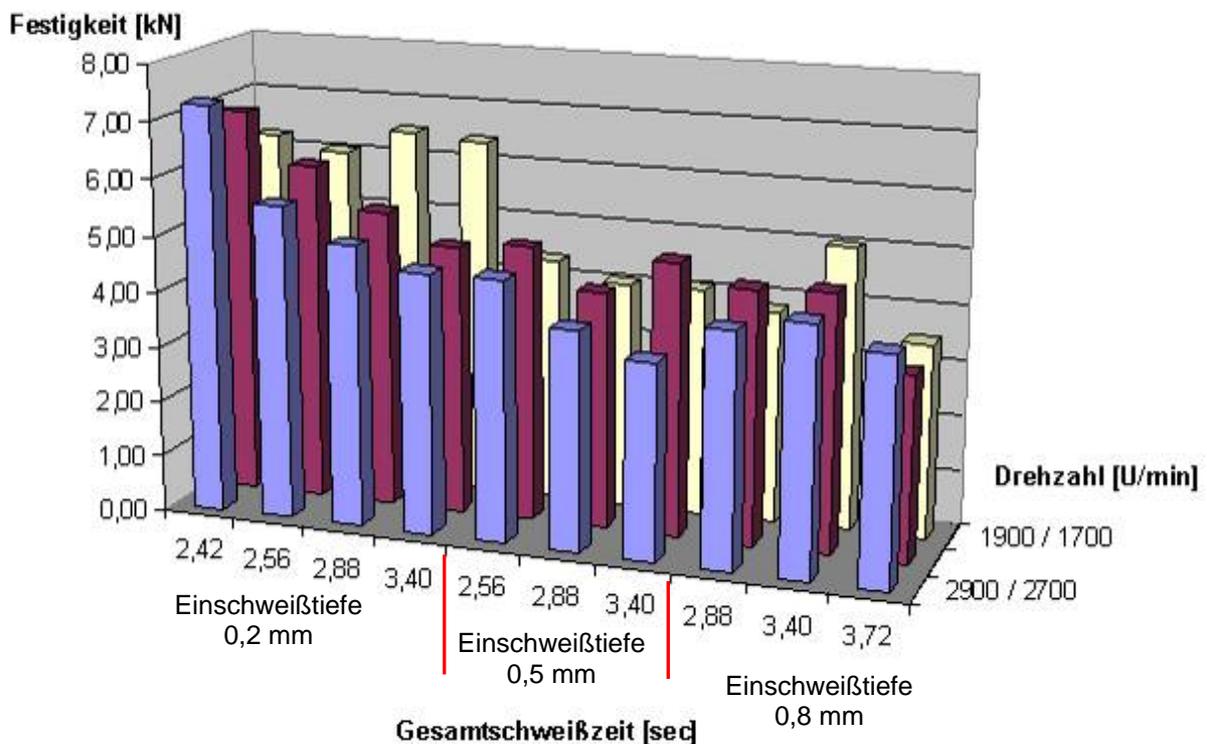
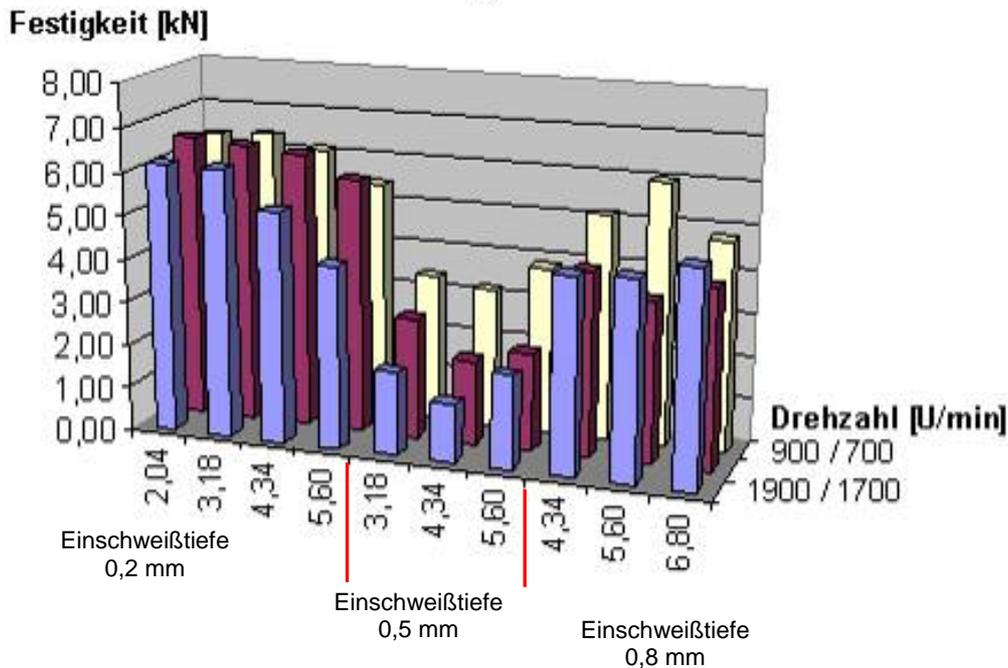


Abb. 7: Scherzugversuch EN AW6181-T4 komplett.

Die Scherzugfestigkeit der Aluminiumverbindung AW5042 zeigt ein ähnliches Verhalten wie bei der sechstausender Legierung. Die höchsten Festigkeitswerte werden mit der geringsten Einschweißtiefe erreicht. Deutlich bricht die Festigkeit bei Erhöhung der Einschweißtiefe um 0,5 mm ein. Allerdings ist der auch ein deutlicher Anstieg der Festigkeit bei einer weiteren Erhöhung der Einschweißtiefe um 0,3 mm auf 0,8 mm erkennbar. Das Maximum von 6,5 kN wird auch hier bei der schnellsten Schweißgeschwindigkeit erreicht. Tendenziell ist hier eine höhere Festigkeit bei geringeren Drehzahlen erreichbar.



Gesamtschweißzeit [sec]

Abb. 8: Scherzugversuch EN AW5042 komplett

Die Ergebnisse zeigen deutlich die Abhängigkeit der Festigkeit von der Einschweißtiefe, wobei die Maxima der Festigkeiten in den unterschiedlichen Einschweißtiefen eher bei den kürzesten Schweißzeiten liegen. Die Ursache hierfür wird wohl der niedrigere Wärmeeintrag durch die kurzen Schweißzeiten in die Schweißproben sein. Dagegen verdeutlichen die Ergebnisse auch, dass eine Drehzahlvariation keine großen Auswirkungen auf die Festigkeit der Scherzugproben haben.

Klärungsbedarf gibt es allerdings noch bezüglich der in den Ergebnisdiagrammen zu erkennenden Wellenform bei unterschiedlichen Einschweißtiefen.

4.2 Kopfzugversuch

Die Ergebnisse der Kopfzugversuche zeigen ein ähnliches Verhalten wie die im vorherigen Abschnitt diskutierten Ergebnisse der Scherzugversuche. Auch hier zeigt sich ein starker Einbruch der Festigkeitswerte beim Wechsel der Einschweißiefen. Die geringste Einschweißtiefe und kürzeste Schweißzeit liefert das Maximum der Festigkeit von 3 kN bei einer Blechstärke von 1,7 mm! Bei der Einschweißtiefe von 0,8 mm zeigt sich auch hier die leichte Tendenz zur Wellenform und der damit verbundenen Erhöhung der Festigkeit.

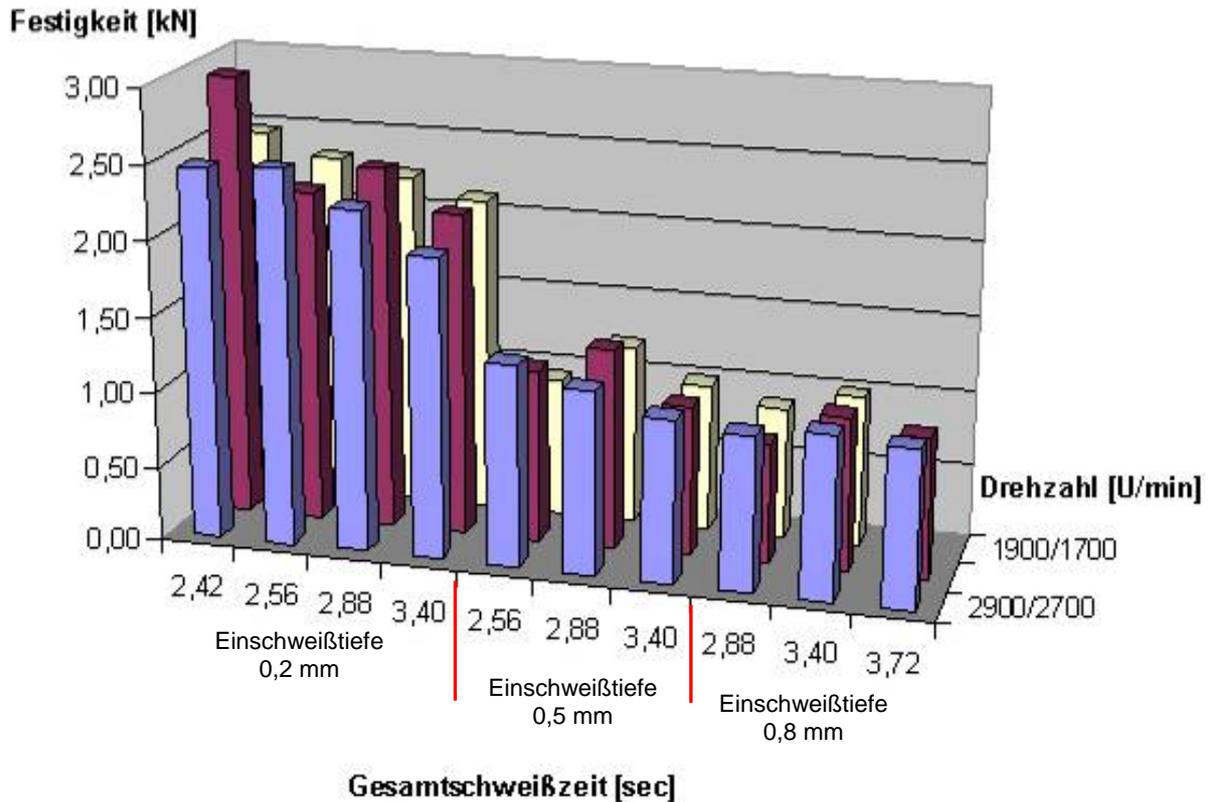


Abb. 9: Kopfzugergebnisse EN AW6181-T4 komplett.

Die Ergebnisse der Kopfzugversuche von der Legierung AW5042 lagen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor.

4.3 Härteversuch

Bei der Untersuchung der Härte an den Fügestellen hat sich ergeben, dass die Ergebnisse der Härteprüfung mit den Ergebnissen der Scherzugversuche nicht korrelieren. Die Schweißungen, die im Scherzugversuch höchste Festigkeiten erreichen, besitzen im Bereich des Fügepunktes die niedrigsten Härtewerte.

Das folgende Diagramm zeigt die Härtewerte der AW6181-T4 Legierung. Für den Versuch wurde der Parametersatz mit den höchsten Festigkeiten herangezogen. Alle Diagrammkurven zeigen das gleiche Verhalten bezogen auf den Abstand zur Probenmitte. Deutlich ist der Anstieg der Härte im Randbereich des Reibschweißpunktes zu erkennen. In der Mitte des Punktes zeigt sich, dass die Härte auf das Niveau der Probenrandbereiche wieder abfällt.

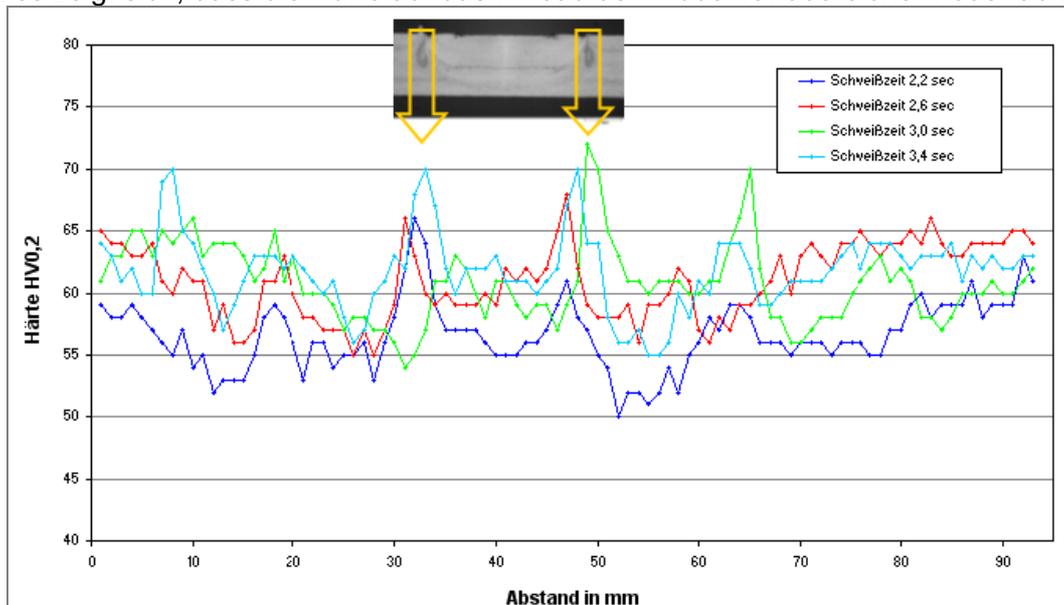


Abb. 10: Härte HV0,2; EN AW6181-T4

Im folgendem werden zwei möglichen Ursachen für dieses Verhalten nachgegangen. Denkbare Erklärungen wären:

1. Geringer gebundener Querschnitt der Fügestelle.
2. Inhomogene Verteilung der Oxide in der Fügestelle.

Das Härtediagramm der AW5042 Legierung zeigt dagegen eine andere Charakteristik. Durch das Reibpunktschweißen dieser Legierung konnten bezüglich der Härte des Werkstoffes keine grundlegenden Veränderungen beobachtet werden. Die Ursache wird in der fehlenden Eigenschaft des Aushärtens der 5xxx – Legierungen liegen.

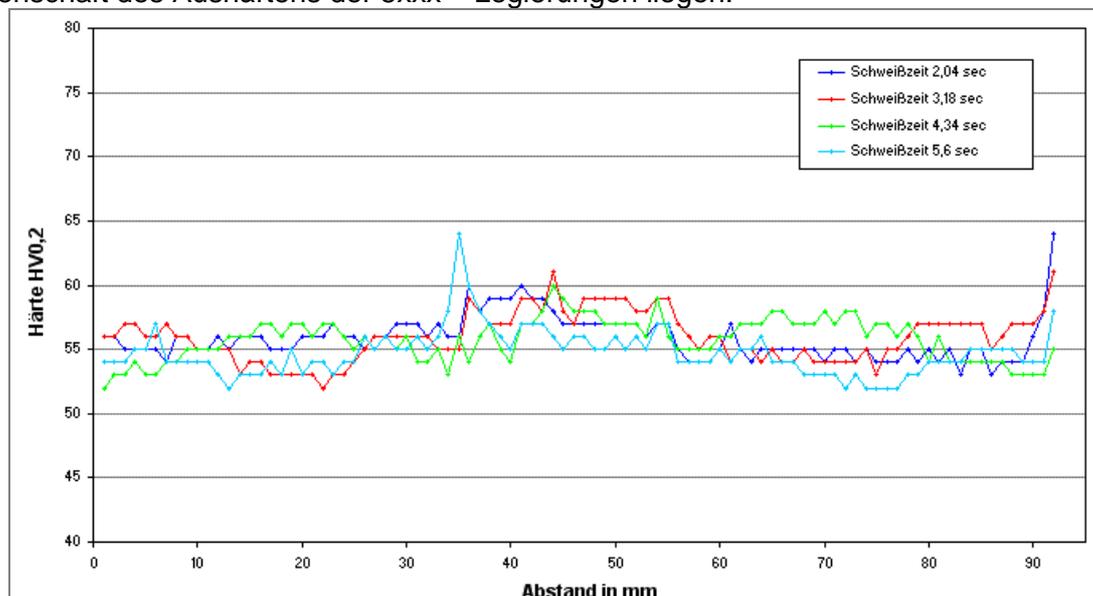


Abb. 11: Härte HV0,2; EN AW5042

4.4 Bruchkanten

Die Analyse der Bruchkanten der einzelnen Zugproben ergab, dass die Identifikation einer gut verbundenen Schweißprobe mittels visueller Kontrolle der Bruchkanten möglich ist. Bereiche die fest verbunden sind, zeigen eine matte Bruchfläche, während glatte Flächen auf eine fehlerhafte oder fehlende Verbindung hinweisen. Zur schnellen Überprüfung der erreichten Qualität bezüglich der Festigkeit einer Schweißprobe rückt der manuelle Schälzug in den Fokus der Prüfmethoden.

Generell sind alle untersuchten Scher- und Kopfzugproben ausgeknöpft. Der verbundene Querschnitt aller Proben ist identisch mit dem Durchmesser der Hülse. Im folgendem werden die Bruchkanten von Proben mit einer Schweißzeit von 2,2 und 3,4 s gegenüber gestellt. Die ersten vier dargestellten Bilder sind zwölfmal vergrößert. Dagegen entsprechen die letzten beiden Bilder einer Vergrößerung von fünfzig.

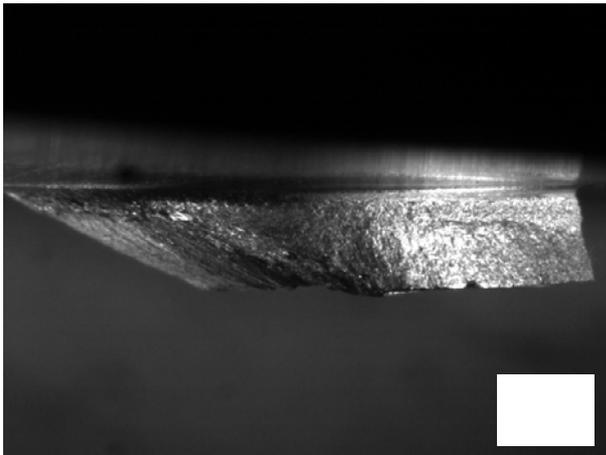


Abb. 12: Probe 1 (2,2 s) Bruchkante 1.

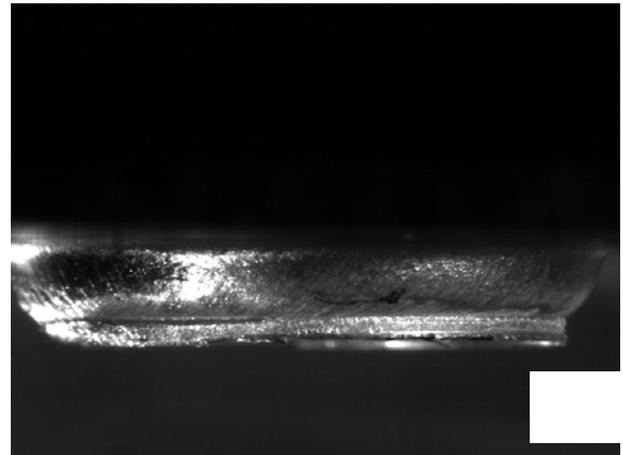


Abb. 13: Probe 2 (3,4 s) Bruchkante 1.

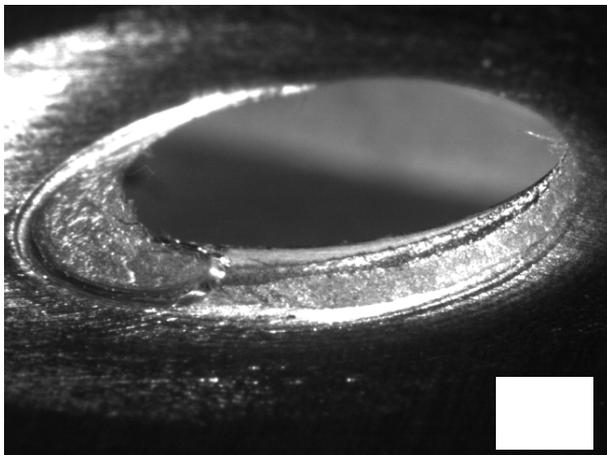


Abb. 14: Probe 1 (2,2 s) Bruchkante 2.

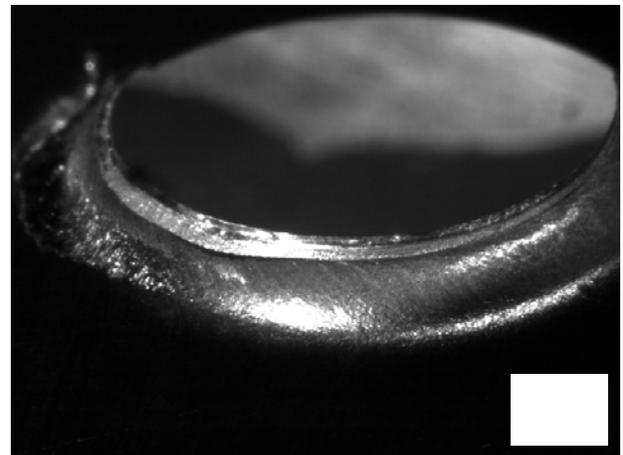


Abb. 15: Probe 2 (3,4 s) Bruchkante 2.

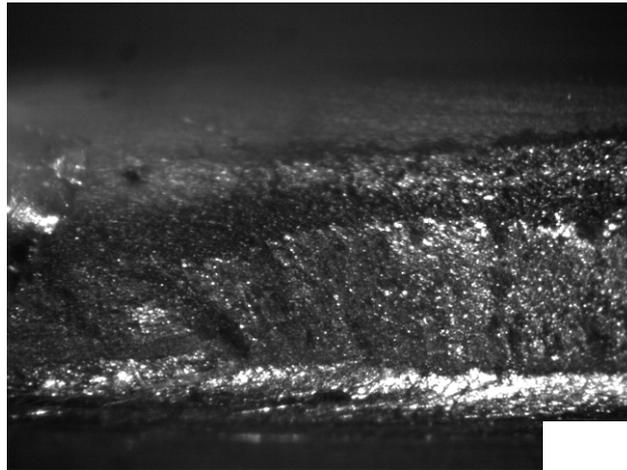


Abb. 16: Probe 1 (2,2 s) Vergrößerung.

In Abbildung 13 ist zu erkennen, dass es keinen Bereich im Querschnitt der Bruchkante gibt, in dem glatte Flächen zu finden sind. Das bedeutet die Anbindung des Fügepunktes an den Randbereich war vollständig.

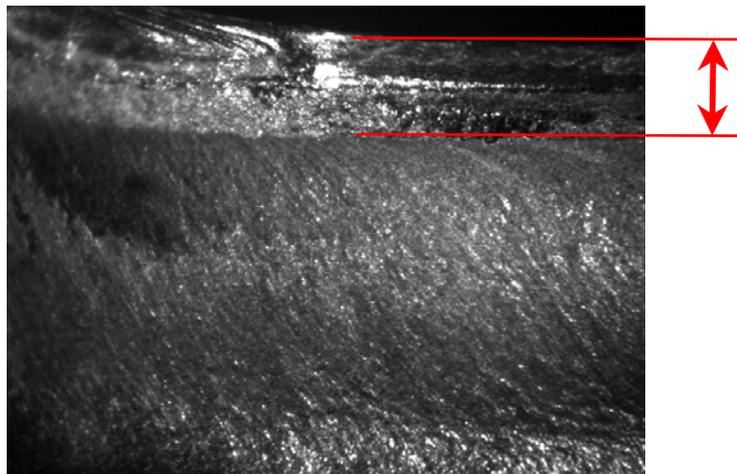


Abb. 17: Probe 2 (3,4 s) Vergrößerung.

Die Vergrößerung der Bruchkante aus der Probe 2, mit der längeren Schweißzeit zeigt im oberen Abschnitt einen zum Rest der Kante auffällig glänzenden Bereich. Dabei handelt es sich um die oben erwähnten, glatten Flächen, welche auf keine oder eine fehlerhafte Anbindung in diesen Bereich hindeutet. Der Anteil der glatten Flächen einer Bruchkante steht im Verhältnis zur Festigkeit einer Probe und ist abhängig von der Schweißzeit. Die erste Hypothese kann somit schon einmal bestätigt werden.

4.5 Metallographie

Von jedem Parametersatz wurde für eine metallographische Untersuchung Querschnitte der Proben erstellt. Um einen direkten Vergleich zu unternehmen, werden im folgendem nur Abbildungen mit der gleichen Gesamtschweißzeit dargestellt.

4.5.1 EN AW6181-T4

Die Gesamtschweißzeit von 2,88 s war in jeder Parameterreihe der unterschiedlichen Einschweißstiefen vorhanden.

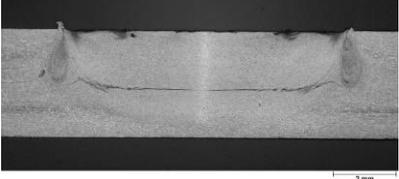
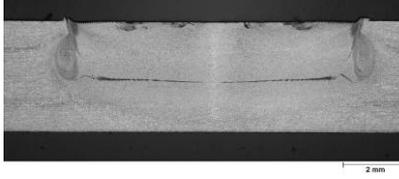
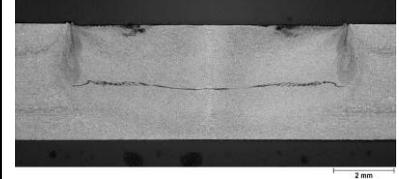
Gesamtschweißzeit : 2,88 s		
Einschweißtiefe unteres Blech : 0,2 mm		
1: 2900 U/min 2: 2700 U/min	1: 2400 U/min 2: 2200 U/min	1: 1900 U/min 2: 1700 U/min
7	8	9
		

Abb. 18: Eindringtiefe komplett 1,9 mm; Eindringtiefe unteres Blech 0,2 mm; Schweißungen 7 – 9

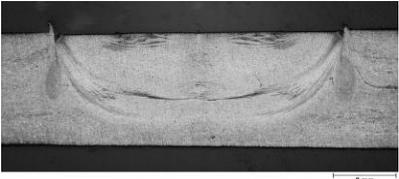
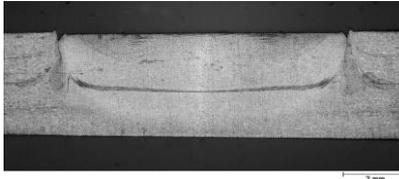
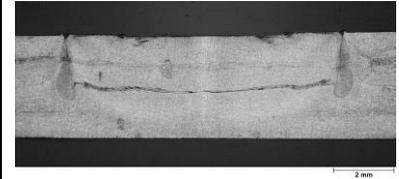
Gesamtschweißzeit : 2,88 s		
Einschweißtiefe unteres Blech : 0,5 mm		
1: 2900 U/min 2: 2700 U/min	1: 2400 U/min 2: 2200 U/min	1: 1900 U/min 2: 1700 U/min
16	17	18
		

Abb. 19: Eindringtiefe komplett 2,2 mm; Eindringtiefe unteres Blech 0,5 mm; Schweißungen 16 – 18

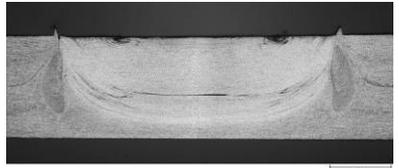
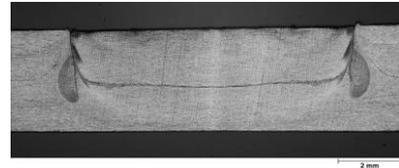
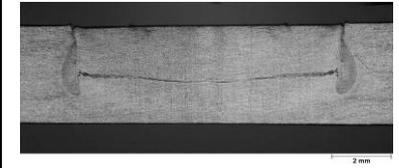
Gesamtschweißzeit : 2,88 sec		
Einschweißtiefe unteres Blech : 0,8 mm		
1: 2900 U/min 2: 2700 U/min	1: 2400 U/min 2: 2200 U/min	1: 1900 U/min 2: 1700 U/min
22	23	24
		

Abb. 20: Eindringtiefe komplett 2,5 mm; Eindringtiefe unteres Blech 0,8 mm; Schweißungen 22 – 24

Auf den ersten Blick haben alle Bilder eine erstaunlich hohe Ähnlichkeit. Die für eine RPS – Schweißung charakteristischen Augen links und rechts des Punktes sind bei den einzelnen Schweißstiefen untereinander gleich groß. Die Vergrößerung der Einschweißtiefe ist zwischen den Abbildungen 18 bis 20 deutlich zu erkennen. Bei Verringerung der Drehzahl lässt sich eine leichte Vergrößerung der Wärmeeinflusszone erkennen.

Die zweite Hypothese der Inhomogenitäten der Oxidverteilung in den Fügstellen konnte jedoch nicht bestätigt werden. Die Verteilung der Oxide weist keine signifikanten Unterschiede auf.

4.5.2 EN AW5042

Auf den Makroaufnahmen von Proben der 5xxx- Legierung sieht man allerdings deutliche Veränderungen der Wärmeeinflusszone in Abhängigkeit von der Eindringtiefe des Werkzeuges und der Rotationsgeschwindigkeit.

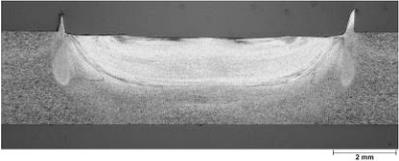
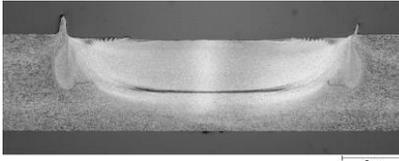
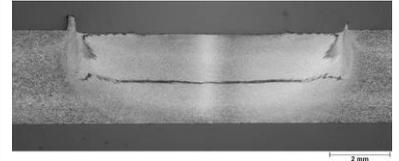
Gesamtschweißzeit : 4,34 s		
Einschweißtiefe unteres Blech : 0,2 mm		
1: 1900 U/min 2: 1700 U/min	1: 1400 U/min 2: 1200 U/min	1: 900 U/min 2: 700 U/min
7	8	9
		

Abb. 21: Eindringtiefe komplett 1,7 mm; Einschweißtiefe unteres Blech 0,2 mm; Schweißungen 7 – 9

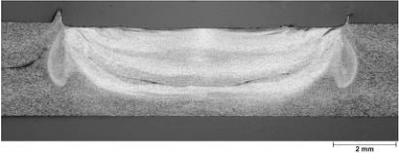
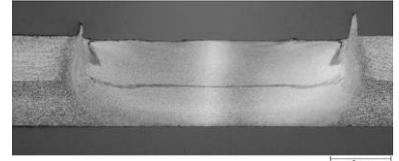
Gesamtschweißzeit : 4,34 s		
Einschweißtiefe unteres Blech : 0,5 mm		
1: 1900 U/min 2: 1700 U/min	1: 1400 U/min 2: 1200 U/min	1: 900 U/min 2: 700 U/min
16	17	18
		

Abb. 22: Eindringtiefe komplett 2,0 mm; Eindringtiefe unteres Blech 0,5 mm; Schweißungen 16 – 18

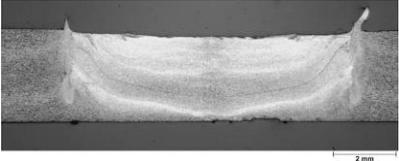
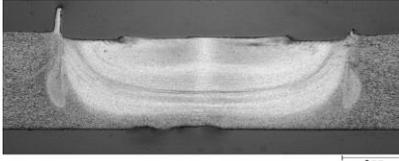
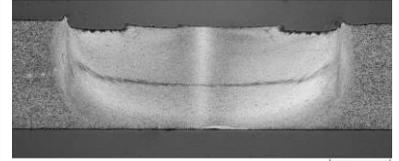
Gesamtschweißzeit : 4,34 s		
Einschweißtiefe unteres Blech : 0,8 mm		
1: 1900 U/min 2: 1700 U/min	1: 1400 U/min 2: 1200 U/min	1: 900 U/min 2: 700 U/min
22	23	24
		

Abb. 23: Eindringtiefe komplett 2,3 mm; Eindringtiefe unteres Blech 0,8 mm; Schweißungen 22 – 24

Die Vergrößerung der Einschweißtiefe lässt sich auch hier sehr gut verfolgen. Die Schweißaugen links und rechts des Fügepunktes sind bei der geringsten Drehzahl kaum noch vorhanden. Zusätzlich ist die Wärmeeinflusszone sehr viel größer als bei Schweißungen mit Umdrehungen von 1900 / min.

5 Zusammenfassung

Der bisherige Verlauf des Projektes und der Ergebnisse zeigen deutlich die Stärken des Reibpunktschweißens. Der Prozess läuft in weiten Prozessgrenzen sehr stabil, was unter anderem einen großen Vorteil bezüglich Qualitätssicherungen darstellt. Die Eigenschaften eines Parametersatzes bleiben weitestgehend über viele Schweißzyklen konstant. Das beruht auf der Tatsache, dass das Reibpunktschweißen ein mechanisiertes Fügeverfahren ist.

Deutlich zeigten die Vorversuche und die Ergebnisse aus den Zugversuchen, dass ein großes Prozessfenster besteht. Die Auswertung und Analyse der metallographischen Schliffe zeigten in allen Parametersätzen poren- und rissfreie Verbindungen. Und auch die Tatsache, dass alle Zugproben ausgeknöpft sind, verdeutlicht die Stärken des Verfahrens. Zugfestigkeiten von anderen mechanischen Fügeverfahren erreichen bei gleichen Werkstoffen und Dicken nicht die mit dem Reibpunktschweißverfahren erreichten Maximalwerte von 7,3 und 6,5 kN.

Die Erhöhung der Einschweißtiefe liefert keinen Vorteil. Das heißt aber auch eine Verringerung der Gesamtschweißzeit bzw. Taktzeit zugunsten einer höheren Festigkeit! Die besten Parametersätze liegen bei Einschweißtiefen von 0,2 mm mit einer Gesamtschweißzeit von ca. 2 s. Abschließend kann behauptet werden, dass die Schweißtiefe und die Schweißzeit die Parameter mit den größten Einflüssen auf die mechanischen Eigenschaften sind.

[1] Dr. Catrin Kammer, Aluminium- Handbuch, Band 1 „Grundlagen und Werkstoffe“, Aluminium- Verlag Düsseldorf, 2002, 16. Auflage

Die Ultraschalltechnologie im Automobilbau als Kunststoff- verbindungstechnik

Dipl.-Ing. Bernd Hennings, Fa. Hermann Lühr GmbH Hamburg

1. Einleitung

Der Vortrag wird von Bernd Hennings, Diplom-Ingenieur Maschinenbau, Diplom Kaufmann Wirtschaftswissenschaften vorgetragen. Herr Hennings hat seit 1970 in der Konstruktion, Entwicklung ca. 25 Jahre gearbeitet in mehreren Funktionen, weitere Jahre in Service- and maintenance Bereich, im technischen Vertrieb und ist seit 3 Jahren im technischen Verkauf der Fa. Hermann Lühr GmbH für den Geschäftsbereich Sondermaschinen, speziell Kunststofffügetechnik zuständig.

Die Fa. Hermann Lühr GmbH ist mit Sitz in Hamburg seit 1918 im Modell- und Werkzeugbau tätig und hat sich seit 1994 in dem Bereich Kunststofffügetechnik weltweit betätigt. Der Schwerpunkt der Entwicklung und Fertigung von Maschinen und Werkzeugen in der Kunststofffügetechnik ist im Automobilbau und der Fügetechnik von Bauteilen im Auto.

Zu unserem Kundenkreis zählen fast alle Automobilhersteller weltweit wie auch die Zulieferindustrie.

Im Automobil hat sich seit Beginn der 50 er Jahre des vergangenen Jahrhunderts, erst behutsam und zögerlich, doch seit Beginn der 70 er Jahre verstärkt, immer mehr der Werkstoff „Kunststoff“ in seinen verschiedenen chemischen Zusammensetzungen durchgesetzt.

Heute sind ca. 14-16 % des Autos aus Kunststoff, mit steigender Tendenz. Dem entsprechend hat sich im fast umgekehrten Verhältnis der Eisen- und Stahlanteil verringert.

Neben dem Effekt des Gewichtersparnis und der kostengünstigen Fertigung hat auch wesentlich die gestalterische Freiheit des Designer hier eine Rolle gespielt. Durch den technischen Fortschritt bei der Weiterentwicklung moderner Kunststoffe, wie auch der hinzugefügten Verstärkungselemente (z. B. Glasfaser), ist es auch gelungen bessere technische Werte wie Festigkeit, Temperaturstabilität etc. zu erreichen.

2. Die üblichen Verfahren der Kunststoffverbindungstechnik

Die üblichen Verfahren in der Kunststofffügetechnik sind:

- Heizelement Schweißen, als Wärmekontaktverfahren, im Hochtemperaturbereich von ca. 380-420° C.
- Heißluftnieten, mit erwärmter Luft werden die Nieten angewärmt und mit einem kalten Stempel die Nietköpfe ausgeformt.
- Heizstempelnieten, mit erwärmten Stempeln werden die Nietköpfe unter relativ hohem Druck ausgeformt
- Infrarotschweißen, kontaktloses Erwärmen über Strahlungswärme und Verpressen der zu fügenden Teile
- Ultraschallschweißen, elektrische Energie wird in mechanische Schwingungen umgewandelt und erwärmt die zu fügende Teile.
- Klebverfahren (Kaschieren), unter Wärmeeinfluß wird ein Kleber aktiviert und unter Druck werden die Teile gefügt.
- Vibrationsschweißen, mechanische Schwingungen erwärmen die zu fügenden Teile und unter Druck werden die Teile gefügt
- Laserschweißen, durch Laserenergie werden die zu fügenden Teile erwärmt und unter Druck gefügt.

Der Einsatz einzelner Verfahren ergibt sich aus der Wirtschaftlichkeit, technischen Anforderungen, Anforderungen an die Formstabilität etc. und nicht zuletzt aus der Vorliebe einzelner Entscheidungsträger beim Kunden.

3. Das Ultraschallverfahren in der Kunststoffverbindungstechnik

3.1. Grundlagen des Ultraschallschweißverfahren

Als zu verarbeitende Werkstoffe eignen sich Thermoplaste, die durch Wärmeeinwirkung plastisch verformbar sind und nach dem abkühlen wieder einen festen Zustand annehmen.

Der physikalisch, technische Vorgang des Schweiß-/ Nietvorgangs wird nicht näher beschrieben; im Prinzip wird elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt, die zur Erwärmung der zu verschweißenden Teile durch Reibung führt und an den Kontaktflächen zur Schmelze führt.

Die beiden Hauptanwendungsgebiete sind:

- das **Schweißen**. Zwei Teile werden „flächig“ miteinander verbunden.

- das **Nieten**. Zwei Teile werden mit Hilfe von Ausformung eines Nietkopfs miteinander verbunden..

Eine gute Verbindung zweier Teile ist im wesentlichen abhängig von:

- Eigenschaften des Werkstoffes
- Form der zu verbindenden Teile
- Lage der sogn. Fügezone
- Fügezonengestaltung (z. B. Lage und geometrische Abmessungen der Energierichtungsgeber ERG)
- weitere Einflussfaktoren.

Die einzelnen Schweißparameter, von der die Qualität der Schweißung / Nietung abhängig ist, sind:

- die Qualität des Schwingensystem
- die Schweißzeit
- der Schweißdruck
- die Halte- oder Kühlzeit
- die Einsinkgeschwindigkeit der Sonotrode nach Einsetzen der Ultraschall

3.2 Das Ultraschallschwingsystem

Ein Schwingsystem zum Umwandeln von elektrischer Energie in mechanische Energie besteht aus folgenden Komponenten:

- Generator, im Frequenzbereich zwischen ca. 20 kHz bis ca. 40 kHz
- Hochfrequenzverbindungskabel
- Schallkopfhalter (pneumatisch, federbetätigt etc.)
- Konverter (Schallkopf) in dem Frequenzbereich des Generators
- Sonotrode im Frequenzbereich des Schwingsystems

Zur Verstärkung der Amplitude kann noch ein Transformationsstück genutzt werden, das die Amplitude der mechanische Schwingung erhöht und damit eine schnellere Schmelzebildung ermöglicht.

Außerdem gibt es noch mehrere Peripherieeinrichtungen wie Kühlung, Meßsysteme etc. die vom jeweiligen Einsatzfall abhängig sind und zur Effizienzerhöhung oder Steuerung genutzt werden.

Der **Generator** wird zur Wandlung der niederfrequenten Energie des Wechselstroms in die höherfrequente Energie für das Ultraschallverfahren gebraucht, im Bereich 20-40KHz, mit einem Leistungsspektrum von 400 Watt bis mehrere Kilowatt.

Der **Konverter** wandelt die elektrischen Schwingungen in mechanische Schwingungen mit Hilfe piezokeramischer Werkstoffe (keramische Scheiben) in mech. Energie um.

Die **Sonotroden** verstärken die Amplitude der, vom Konverter erzeugten mechanischen Schwingungen und übertragen diese per Kontakt auf die zu verbindenden Teile. Die Sonotroden werden im Normalfall aus den Materialien Titan, Aluminium und Stahl gefertigt, je nach Einsatzfall und Schweißaufgabe.

3.3 Das Ultraschallschweißen

Als Ultraschallschweißen wird das Verfahren bezeichnet, bei dem zwei Teile an einer Schweißfläche miteinander verbunden werden. Die geometrische Form ist von der Gestaltung der zu verbindenden Teile sowie der Kontaktfläche der Sonotrode abhängig.

Hier gibt es mehrere Möglichkeiten wie die Rundsonotrode, Rechtecksonotrode; Kontursonotrode (folgt der 3D Konstruktion des Fügeteils), „Pickelsonotrode“ etc.

Die Gestaltung ist im Prinzip nur von der Schwingfähigkeit der Sonotrode abhängig im Bereich der zu erzielenden Verschweißung.

Die Verschweißung wird im Normalfall von den beiden Parametern Schweißzeit und Schweißdruck gesteuert (wenn man von der optimalen Auslegung der Sonotrode mit dem zugehörigen Amplitudenbereich ausgeht). Da bei der Verschweißung zwei Flächen aufeinanderliegen ist eine Steuerung über den Verschweißweg sehr aufwendig und wird in der Regeln nicht gewählt.

Ein entscheidender Punkt bei einer Verschweißung ist, neben dem Material, die geometrische Gestaltung der Fügezone. Um eine optimale Übertragung der Energie zu ermöglichen werden, z. B. an den Spritzteilen sog. Energierichtungsgeber mit angespritzt, die den Energiefluß leiten und eine optimale Verschweißung ermöglichen.

Dies ist besonders wichtig in der Automobilindustrie, da die Oberfläche (Sichtseite) der zu verschweißenden Teile von Veränderungen wie Anblendungen, etc nicht beeinflusst werden soll.

3.4 Das Ultraschallnieten

Als Ultraschallnieten wird das Verfahren bezeichnet, beidem zwei Teile mit Hilfe von Nieten zusammengefügt werden. Die Nieten sind an einem Teil in der Regel angespritzt und werden durch ein Loch, in den zweiten zu verschweißenden Teil, gesteckt. Durch Abschmelzen des heraustehenden Teils des Niets und Ausformung des Nietkopfs wird eine feste Verbindung erzeugt.

Die Steuerung des Vorgangs erfolgt durch die beiden Parameter „Schweißweg“ und Schweißdruck. Sobald die erforderliche Länge des Nietes, zur Bildung eines Nietkopfs, abgeschmolzen ist, wird die Ultraschallschwingung abgeschaltet und die Energiezufuhr gestoppt. Dies erfolgt üblicherweise über einen Initiator (z. B. induktiv) oder ein spezielles Weg-Meß-Abschaltsystem.

Die geometrische Gestaltung des Nietkopfs ist von der Sonotrodenform abhängig und wird individuell für den Anwendungsfall ermittelt.

4. Die Kunststoffkomponenten / Baugruppen im Automobil

Grundsätzlich wird bei den Kunststoffteilen im Auto zwischen

- Teilen für das **Interieur** (grob: Teile im Innenraum des Autos)
- Teilen für das **Exterieur** (grob: Teile, die außen am Auto angebaut sind) unterschieden.

4.1. Interieur

Die großen Baugruppen sind:

- Instrumententafeln
- Türinnenverkleidung
- Mittelkonsolen
- Türsäulenverkleidung mit Komponenten
- Kofferraumverkleidungen
- Teppiche, Sitzlehnen etc.

4.2. Exterieur

Die großen Baugruppen sind:

- Stoßfänger mit einzelnen Komponenten
- Radverkleidungen mit Komponenten
- Komponenten im Motorenraum
- Unterbodengruppen als Schalldämmung und Schutz gegen Schmutz

4.3 Die bevorzugten Werkstoffe (Kunststoffe) im Automobilbau

Es wird nur der Bereich Interieur betrachtet und auch nur thermoplastische Kunststoffe, die für die Verarbeitung mit dem Ultraschallverfahren geeignet sind.

- PP (Polypropylen)
- ABS (Acryl-Butadien-Styrol)

- PA (Polyamid)
- PE (Polyethylen)
- PC (Polycarbonat)
- POM (Polyoxymethylen) etc.

Dies sind nur die häufigsten Kunststoffe und die Aufstellung erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Die jeweiligen Materialien werden z. T. mit anderen Werkstoffen vermengt (z.B. Glasfaser, Talkum, etc.) damit bessere technische Eigenschaften erzielt werden können bzw. aus wirtschaftlichen Gründen (z. B. Anteil Recyclingmaterial).

Der weitaus größte Anteil ist PP und ABS. Dies ändert sich jedoch mit der Weiterentwicklung der Verfahren und ist auch abhängig von Rohstoffpreis und der gestalterischen Möglichkeit des jeweiligen Kunststoff.

5. Auswahl an Anwendungsbeispiele in der Automobilindustrie

In der Regel wird, da es sich im Automobilbau um größere zu fertigende Stückzahlen pro Zeiteinheit handelt und die Taktzeit einer Maschine von ausschlaggebender Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit und Produktivität des zu fertigenden Teils ist, für die jeweilige Fügeaufgabe ein spezielle Maschine und das dazugehörige Werkzeug konstruiert und auf die Belange des Kunden zugeschnitten.

Daher gibt es zwar verschiedene Grundtypen von Anlagen und Maschinen, eine Standardisierung zur Kostensenkung der Anlageninvestition, ist jedoch äußerst schwierig und auch nicht immer der entscheidende Faktor für die Konstruktion der Maschine. Die Wirtschaftlichkeit des herzustellenden Teils steht immer im Vordergrund der Überlegungen.

In der jüngeren Vergangenheit ist auch die eigentliche Fügeaufgabe von Teile durch das Fügeverfahren um die Peripheriegeräte wie automatisiertes Aufstecken von Zusatzbauteilen, Handlingsaufgaben, Verkettung von Fertigungsstraßen mit mehreren Verfahren, Roboteranwendungen etc. ergänzt worden und hat einen immer größeren Anteil an der Wertschöpfung gefunden.

5.1 Instrumententafel

Die Instrumententafel und Ihre verschiedenen Funktionsträger werden heute fast ausschließlich aus Kunststoff hergestellt.

Als bevorzugter Kunststoff wird als Basis am häufigsten eine PP-Variation mit Füllstoffen und Zusätzen aus Wirtschaftlichen Gründen gewählt. Einzelne Komponenten werden noch teilweise aus ABS oder POM gefertigt.

Der Aufbau, und damit auch die Schweißaufgabe, ist folgendermaßen:

- Ein **Grundkörper** aus PP wird mit den anderen Funktionsträgern, meist im Ultraschallverfahren verschweißt.
- Zuerst der vordere **Luftausströmer** im Frontscheibenbereich
- Danach die jeweiligen **Luftkanäle**, zur Verteilung der Luftströme an der linken und rechten Seite und im Mittelbereich.
- Die verschiedenen **Abdeckungen (sogen. Pads)** auf der Instrumententafel. Diese Teile dienen zum Einen zur Aufnahme weitere Funktionsteile oder auch nur zur optischen Aufwertung der Instrumententafel.
- Der **Instrumententräger** für Tachometer, Uhr, Drehzahlmesser etc.
- Der sogenannte **Infotainmentträger**, zur Aufnahme des Radios, des Navigationsgeräts, etc meist im Mittelteil der Instrumententafel.
- Der **Handschuhkasten** auf der Beifahrerseite.
- Je nach Ausführung des Fahrzeugs kommen noch einzelne **Baugruppen** oder einzelne **Bauteile**, wie Retainer (zur manuellen Befestigung am Chassis etc.), seitliche Luftausströmer, Metallclipse etc. hinzu.

Die einzelnen Teile werden meist in mehreren Anlage in Linie gefertigt.

Der Anlagen Grundtyp ist meist eine Einzelanlage, mit oder ohne Schiebetisch für eine oder mehrere Stationen oder eine Drehtischanlage mit mehreren Stationen.

Die Anzahl der Schweiß- / Nietpunkte beträgt nicht selten eine Anzahl von mehr als 400 Punkten.

5.2 Türseitenverkleidung

Die meist aus Stahlblech gefertigte Aussentür eines Autos ist mit einem Kunststoffträger in der Innenseite verkleidet. Dieser Träger nimmt, ähnlich wie die Instrumententafel, mehrere Teile und weitere Funktionsträger auf, die im Ultraschallschweiß-/ Nietverfahren miteinander verbunden sind.

- Als Basis wieder der **Grundträger**.
- Meist ein **Insert**, in unterschiedlicher oder gleicher Farbe und unterschiedlichem oder gleichem Material. Das Insert ist zum Beispiel mit verschiedenen Stoffarten oder auch Leder bezogen und dient zur Aufwertung der jeweiligen Ausführung des Autos in z.B. low cost, high cost, Premium-Bereich.
- Die **Kartentasche**, meist mit dem Nietverfahren verbunden
- Die **Brüstung**, an der Oberkante der Türseitenverkleidung.
- Die **Ablagenrückwand**
- Die **Armauflage**

- Mehrere **Retainer** zum Befestigen der Türseitenverkleidung an der Blech Aussentür.
- **Lautsprechergitter**, vernietet, meist aus POM.

Die einzelnen Teile werden meist in einer Anlage mit dem Grundkörper verschweißt und vernietet.

Der Anlagen Grundtyp ist meist eine Einzelanlage, mit Schiebetisch für eine oder mehrere Stationen oder eine Drehtischanlage mit mehreren Stationen. Abhängig ist dies von der zu erreichenden Taktzeit und der Anzahl der zu verschweißenden Punkte, die bis zu ca. 150 betragen kann.

Die Anlagen werden in der jüngeren Vergangenheit auch noch mit Peripheriegeräten wie Roboter, pneumatische Zuführungen von Schraubteilen, Scheiben etc. Handlingsgeräte ausgerüstet, die auch andere Aufgaben zur Komplettierung der Seitenverkleidung übernehmen.

Eine zusätzliche Aufgabe ist auch das Stanzen von Löchern, herkömmlich wie auch mit Ultraschall, zum Einbringen von z. B. Handkurbel, elektrischem Fensterheber, Türverriegelung, Lautsprecheraufnahme etc.

5.3 A-B-C-Säulen

Eine weitere Anwendung des Ultraschallfügens (hier das Verschweißen) ist im Bereich der sogen. A-B-C-Säulen zu finden.

Hier werden meist auf ein Stoff hinterspritzte Teile in einem oder mehreren Segmenten umgebugt, um einen optisch einwandfreien Abschluß des Bauteils zu den anschließenden Teilen wie Instrumententafel, Dachhimmel, anderen Anschlußteilen zu bekommen.

Die hinterspritzten Teile werden in der Ultraschallanlage in eine oder mehrere Aufnahmen gelegt, mit Schiebern umgebugt und der umgelegte Stoff wird auf der Rückseite mit dem Träger im Ultraschallverfahren verschweißt.

Das Ultraschallschweißverfahren wird hier als Alternative zum Kaschieren (mit Verklebung) genutzt und hat den Vorteil, das es in der Regel schneller ist und mit geringeren Betriebskosten betrieben werden kann.

Auch hier werden in der Maschine andere Aufgaben durch peripheren Baugruppen der Anlage erledigt.

5.4 Stoßfänger

Der Stoßfänger, vorn und hinten, gehört zum Bereich Exterieur.

Hier werden die zusätzlichen Bauteile wie

- **Gleitstücke** zum Befestigen des Stoßfänger am Auto
- Andere **Befestigungselement** Stoßfänger Auto
- Distanz-Abstandshalter (Sensoren) zum Einparken des Autos
- Abdeckungen (Blenden) für Anhängerkupplungen, Rückfahrscheinwerfer etc.

Der Anlagen Grundtyp ist meist eine Einzelanlage, mit Schiebetisch für eine oder mehrere Stationen mit mehreren Stationen. Abhängig ist dies von der zu erreichenden Taktzeit und der Anzahl der zu verschweißenden Punkte.

Auch hier werden die Anlagen mit Peripheriegeräten wie Roboter, Aushebeeinrichtungen, . Handlingsgeräte etc. ausgerüstet, die auch andere Aufgaben zur Komplettierung der Stoßfänger übernehmen und das automatische Beschicken und entnehmen der Teile .

5.5. Dämmmaterial im Unterbodenbereich, Radkasten, Motorbereich

Ebenfalls zum Bereich der Exterieurteile gehört wachsende Anteil an Dämmmaterial im Automobilbereich.

Es werden immer mehr Bereich mit sogenannten Dämmstoffen versehen, die im wesentlichen die Aufgabe der Geräuschminderungen haben.

Diese Matten, Spritzteile etc. sind teilweise aus Kunststoff wie POM, teilweise aber auch aus gerissenen Stoffen (Altmaterial), die zu Matten verpresst sind.

Das Ultraschallschweißen hat hier teilweise die Aufgabe nicht schweißfähiges Material (wie übrigens auch Leder im Interieurbereich) mit dem Trägermaterial zu verbinden. Durch eine spezielle Ausführung der Sonotroden wird eine Verklammerung mit dem Träger erreicht und eine dauerhafte Verbindung geschaffen.

Die Anlagen werden im Regelfall auf die zu verarbeitenden Teile ausgelegt und sind wie auch die bisher beschriebenen Anlagen spezielle Sonderausführungen.

6. Ausblick und Vorteile des Ultraschallfügeverfahren für die Zukunft

Die unter Punkt 5 beschriebene Auswahl an Anwendungsmöglichkeiten und Maschinen bzw. Anlagen ist nur eine kleine Auswahl der, zugegeben häufigsten, Einsatzfälle in der Bearbeitung von Teilen der Automobilindustrie. Es gibt eine Vielzahl von Anwendungsfällen, die hier nicht beschrieben worden sind.

Es werden auch, wie unter Punkt 2 beschrieben, andere Verfahren erfolgreich eingesetzt und auch immer weiter entwickelt.

Die unbestrittenen Vorteile des Ultraschallverfahren im Kunststoffbereich sind:

- relativ geringe Energiekosten pro Schweißpunkt
- die ED ist auf den Schweißvorgang begrenzt (im wenigen Sekundenbereich)

- schnelle Verschweißung / Vernietung der einzelnen Punkte
- saubere, fast wartungsfreie Anlagen
- lange Lebensdauer der Sonotroden, meist Lebensdauer der zu verschweißende Teile
- sehr hohe Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu den anderen Fügeverfahren

Das Ultraschallschweißverfahren wird seit Einführung von Kunststoffen im Automobilbau industriell genutzt und hat sich außerordentlich gut bewährt.

Da in der Zukunft eher mit einer Zunahme von Kunststoffteilen im Auto zu rechnen ist, werden auch, trotz immer besserer Spritztechnik, die Fügeverfahren auch einen größeren Anteil in den Produktionslinien bekommen. Durch die Kombination bzw. das Hinzufügen mit anderer Verfahren und Peripheriegeräte mit dem Ultraschallschweißverfahren ergibt sich eine sehr große Einsatzbandbreite.

Als Zusammenfassung kann gesagt werden, das die Ultraschalltechnologie im Automobilbau auch in der Zukunft ihren Platz haben wird und, trotz ihres fast „biblischen Alter“ von über 50 Jahren eine moderne, wirtschaftliche Fertigungsmethode ist.

Beitrag zur Entwicklung eines neuen Fügeverfahrens für Kunststoff und Leichtbaulegierungen

B.Eng, M.Sc. Sergio Amancio, Dr. Jorge F. dos Santos, Institut für Werkstofforschung, GKSS Forschungszentrum GmbH

Einführung

In der Transportbau- und Bauindustrie werden immer häufiger sogenannte Multi-Material-Strukturen eingesetzt, die einerseits Kunststoffe und andererseits Metalle umfassen, wobei die beiden Materialbestandteile kraftschlüssig miteinander verbunden sind. Auf diese Weise werden die Eigenschaften beider Materialien kombiniert, um so einen Makroverbundwerkstoff mit verbesserten Eigenschaften zu erhalten. Um die Kunststoffe und Metalle miteinander zu verbinden, können zunächst mechanische Verbindungen und Klebeverbindungen eingesetzt werden. Die mechanischen Verfahren, wie zum Beispiel, Nieten und Clinchen, weisen die folgenden Nachteile auf. Zum einen treten in den Werkstücken hohe Spannungskonzentration auf. Zum anderen kann es zu einem späteren Lockern der Verbindung infolge von Kriechen, Feuchtigkeit und Relaxation kommen. Klebeverbindungen weisen den Nachteil auf, dass die Festigkeit der Verbindung nur schwer abgeschätzt werden kann.

Andere Probleme bei den Klebeverbindungen sind die lange Herstellungstaktzeiten aufgrund der notwendigen Oberflächenvorbehandlung und Aushärtzeit. Darüber hinaus kommt die Umweltbelastung durch die Emission von Lösungsmitteln in Frage. Neben diesen obengenannten Fügeverfahren sind noch einige Schweißverfahren und Hybrid-Verbindungstechniken (Kombination von einem Fügeverfahren und Kleben) bekannt. Hierbei treten Nachteile auf, wie zum Beispiel der hohe Energieverbrauch zur Verbindungsherstellung, Oberflächenvorbehandlung und geringe Zuverlässigkeit der Verbindungen, sodass sie in sensiblen Bereichen nicht eingesetzt werden können.

Das Reibnieten-Verfahren

Das Reibnieten (entsprechend der englischen Bezeichnung Friction Riveting) ist ein neues Punktverbindungsverfahren (GKSS Patentanmeldung Akt. Nr. 10 2005 056 606.5, Amancio S., Beyer M., Santos, J.F.), welches sowohl auf mechanischer Verbindung (Form- und

Kraftschlüssigkeit) als auch auf Reibschweißtechnik beruht. Ausgehend vom Stand der Technik liegt die Erfindung daher die Aufgabe zugrunde, zuverlässige Verbindungen zwischen Metall- und Kunststoff-Werkstücken in einfacher Weise herzustellen.

Die Fügepartner (Grundmaterialien) werden mit Hilfe eines metallischen Verbindungselements (Bolzen) verbunden. Als Grundmaterialien können polymere und metallische Werkstoffe in verschiedenen Kombinationen verwendet werden. Die Grundmaterialien können verschiedene Formen und Oberflächen aufweisen und in mehreren Schichten angeordnet werden. Der Verbindungselement kann profiliert werden, dabei sind verschiedene Geometrien denkbar. Mehrere Prozessvarianten sind ebenfalls realisierbar. Allerdings wird hier nur das grundsätzliche Prinzip beschrieben, die sogenannte "Point-on-Plate" Verbindung.

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 (Abbildung 1A), welcher vor dem Fügeprozess auf einer Unterlage fixiert werden muss. Während der Anfangsphase dringt der Bolzen in das Grundmaterial ein und es formt sich eine dünne Schicht aus aufgeschmolzen/aufgeweichten Kunststoffmaterial um den Bolzen (Abbildung 1B). Mit Erreichen einer bestimmten Tiefe erhöht sich die Reibleistung signifikant aufgrund der höheren Anpresskraft bedingt durch die höhere thermische Ausdehnung des Kunststoffs im Vergleich zum Bolzenmaterial.

Obwohl der metallische Bolzen die Wärme schnell abführt wird doch mehr Wärme generiert was zu einer steigenden Temperatur im Bolzenmaterial führt. In Folge plastifiziert die Spitze des Bolzens und wölbt sich entsprechend der Temperatur- und Druckverhältnisse auf. Die Bolzenspitze wird in Folge verformt und damit formschlüssig im Grundwerkstoff verankert (Abbildung 1C). Die Festigkeit der Verbindung kann durch eine Profilierung des Bolzens noch verbessert werden, welche nach der Abkühlung und somit Aushärtung des Kunststoffs zur Tragfähigkeit beiträgt. Die endgültige Verbindung ist in Abbildung 1-D dargestellt. Die Position des aufgewölbten Bolzenendes kann in Bezug auf die Tiefe kontrolliert werden. Es ist möglich ohne Durchdringung der Gegenseite eine Verbindung herzustellen.

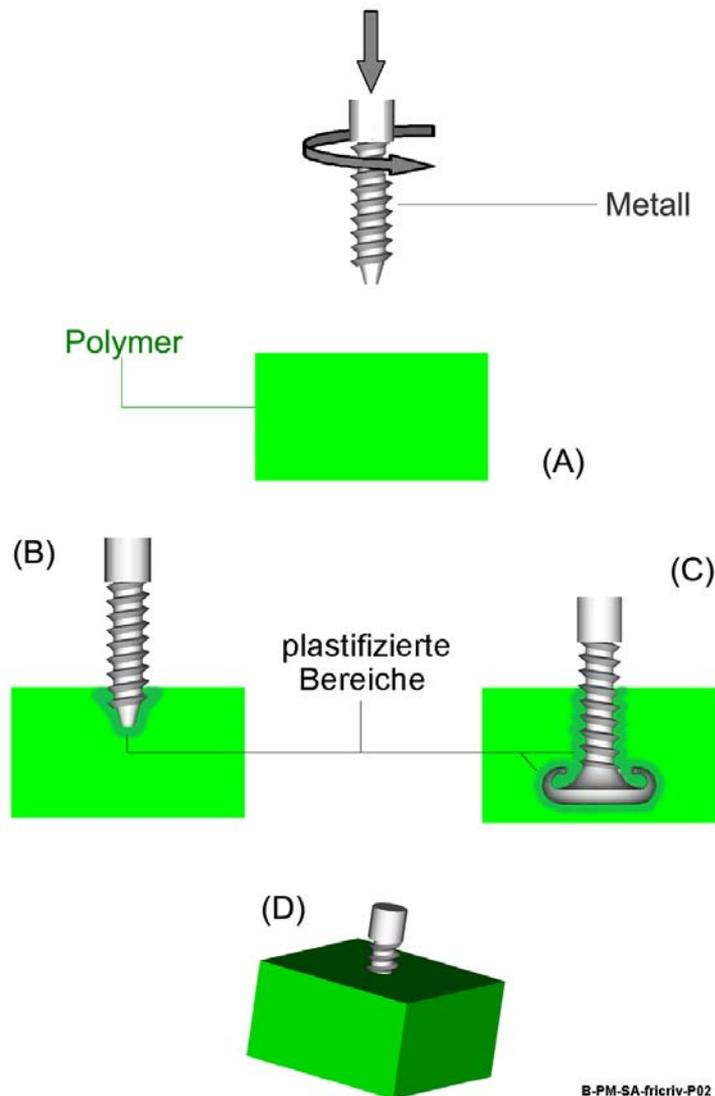


Abbildung1: Das Reibnieten Verfahren als Point-on-plate Verbindung dargestellt.

Bei dem Reibnieten-Verfahren werden die positiven Verbindungseigenschaften von Nieten und Hybridverbindungsmethoden für Metalle, Kunst- und Verbundkunststoffe erreicht. Mit dem Verfahren sollen die positiven Eigenschaften dieser Konzepte, wie mechanische Zuverlässigkeit, Korrosions- und Alterungsbeständigkeit, Gewichtsersparnis und Verringerung der Produktionskosten miteinander verbunden werden.

Das Reibnieten-Verfahren kann, 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 gleich der für das Reibschweißen und Fräsen sein. Zusätzliches Werkzeug wird nicht benötigt. Der Fügezyklus wird im Vergleich zu herkömmlichen Verbindungen als kürzer und simpler angenommen. Dies kann aufgrund des Wegfalls weiterer Vorbereitungsschritte wie Oberflächenbehandlung, einbringen eines Einsatzes in die Fügestelle und verkürzter Aushärtezeit angenommen werden.

Die Verbindung weist eine höhere mechanische Festigkeit auf, da eine geringere Spannungskonzentration im Kunststoff erwartet werden kann. Der durch die Geometrieangepassung und den innigen Kontakt zwischen Kunststoff und Metall erzeugte Abdichtungscharakter der Verbindung kann die Widerstandsfähigkeit gegen Korrosion und Alterung und damit die Lebensdauer der Verbindung erhöhen. Die Option einfache Technik für die Erzeugung der Verbindungen zu benutzen, plus seine Zügigkeit, Simplizität und umweltfreundlichen Charakter macht das FricRiveting Verfahren preiswert verglichen mit herkömmlichen Verfahren.

Ein Beispiel einer Reibniet-Verbindung zwischen einer Polyetherimide Platte, 13,4 mm Wandstärke und Aluminium 2024-T351 Ø5 mm Verbindungselement ist in Abbildung 2 zu sehen. Die Formschlüssigkeit der Bolzenspitze ist für die hervorragende Verbindungszugfestigkeit von etwa $F_{max} = 10,0$ kN verantwortlich (siehe Abbildung 3A), welche den Wert der Grundlegierung entspricht. In diesem Beispiel fand der duktile Bruch auf der freien Länge der Niete statt, außerhalb des Polymer-Metall Übergangsbereichs der Verbindung. Abbildungen 3B, C, D und E stellen die Bruchoberfläche dar.

Fazit

Dargestellt und beschrieben worden ist ein Verfahren zum Verbinden von Multi-Material Strukturen, das Reibnieten (Friction Riveting). Die Aufgabe, ein Verfahren bereitzustellen, das eine zuverlässige Verbindung von metallischen Werkstücken einerseits und Kunststoff-Werkstücken andererseits ermöglicht, wurde gelöst. Reibnieten hat das Potenzial sich zukünftig in mehreren Industriebranchen durchzusetzen als eine schnelle, kostengünstige und leistungsfähige Verbindungstechnik.

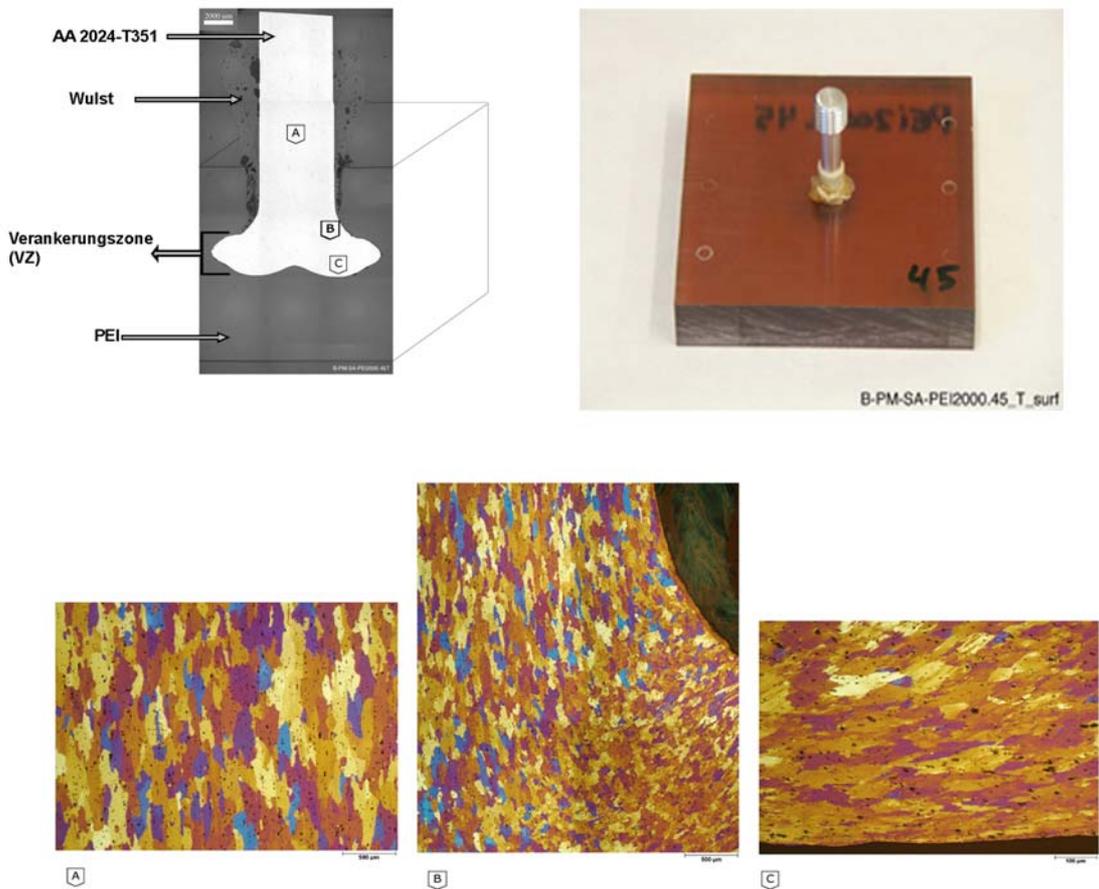


Abbildung 2: Mikrogefüge zonen und Eigenschaften einer Reibniet-Verbindung.

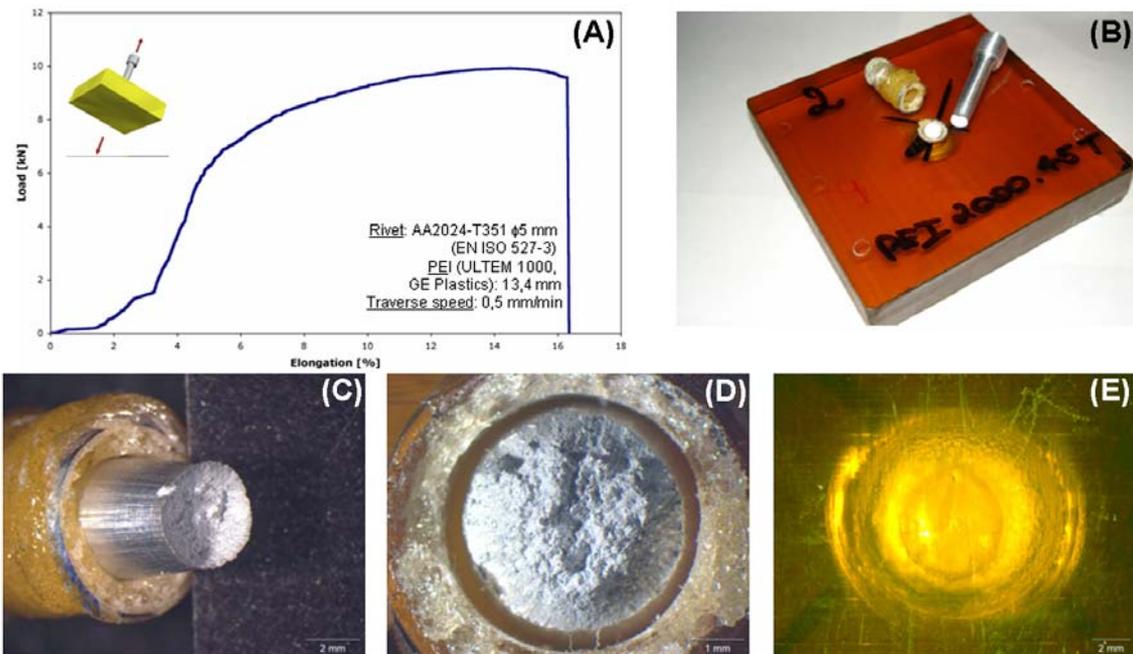


Abbildung 3: Zugfestigkeit einer PEI/AA2024 Point-on-plate Probe. A) Kraft x Dehnung Diagram. B) Getestete T-Pull Zugprobe. C) bis E) Detailansichten des Bruchgebietes.

Ultraschallschweißen von metallischen Werkstoffen

Ultrasonic Metal Welding

Dipl.-Ing. D. Stroh, Schunk Ultraschalltechnik GmbH, Wettenberg

- **Grundlagen der Ultraschalltechnik**
- **Prozesskontrolle**
- **Maschinen und Bedienkonzepte**
- **Anwendungsbeispiele**

Schunk Ultraschalltechnik und STAPLA Ultraschalltechnik sind die Pioniere und Weltmarktführer auf dem Gebiet des Ultraschallmetallschweißens. Innerhalb der Schunk-Gruppe sind sie im Geschäftsbereich Sonosystems zusammengefasst.

Ultraschall-Schweißen ist das zukunftsorientierte Verfahren zum Verbinden von NE-Metallen.

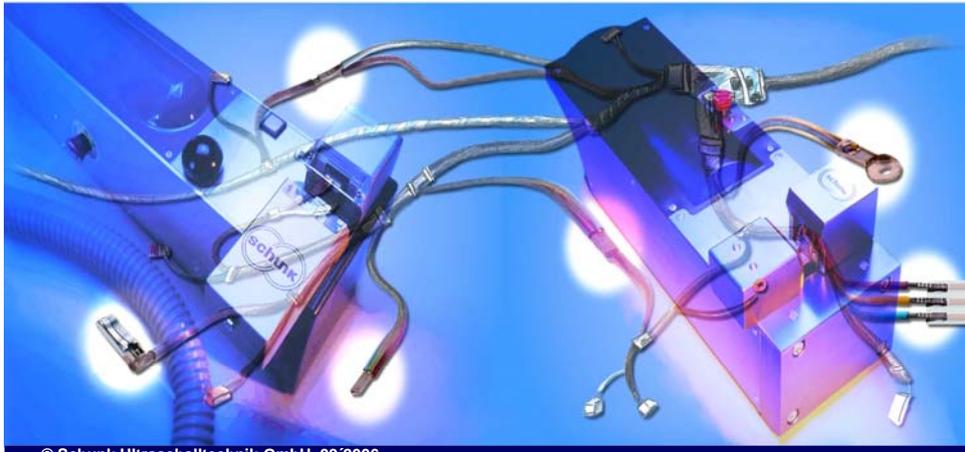
Beim Ultraschall - Schweißprozess wird das Schweißgut überlappt und unter geringem Druck und hochfrequenten mechanischen Schwingungen gegeneinander bewegt. Im Bruchteil einer Sekunde entsteht so eine dauerhafte, feste und metallurgisch reine Verbindung mit exzellenten elektrischen Eigenschaften ohne thermische Belastung der Bauteile. Auch unterschiedliche Materialien wie z. B. Al/Cu oder Al/Ms können sicher miteinander verbunden werden.

Ultraschall-Schweißen ist die qualitativ und wirtschaftlich überlegene Alternative! Sie zeichnet sich aus durch kurze Taktzeiten und geringen Energieverbrauch, benötigt keine Zusatzstoffe und ist umweltfreundlich.

Schunk ist der Pionier auf dem Gebiet des Ultraschall-Metallschweißens. Bereits Ende der 70er Jahre konnte das Unternehmen durch wegweisende Entwicklungen diese neue Technologie zur industriellen Reife führen.

Heute und in Zukunft ist Ultraschalltechnik von Schunk überall dort im Einsatz, wo es auf sichere und effiziente Fertigungsabläufe ankommt, so z. B. in der Kabelbaumherstellung für die Automobilindustrie.

Schunk Ultraschalltechnik ist innovativ. Im ständigen Dialog mit den Anwendern und in Zusammenarbeit mit Hochschulen und Instituten bauen wir unseren Technologievorsprung weiter aus. Zahlreiche internationale Patente und Zertifikate sind der Beleg für die Innovationskraft und den Erfolg dieser Strategie.



© Schunk Ultraschalltechnik GmbH, 09/2006

Effiziente Verbindungstechnik hat einen Namen



Schunk Sonosystems



Schunk Sonosystems



Das ganze Spektrum der Ultraschall-Verbindungstechnik Metall- und Kunststoffanwendungen



2 / 32

Die Schunk Gruppe

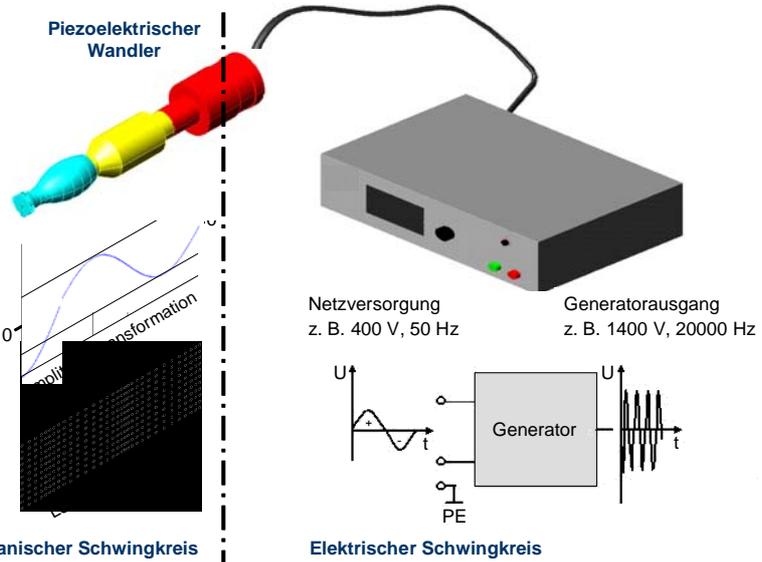
Schunk ist eine global aktive Technologieguppe



- bestehend aus 80 Geschäftseinheiten,
- mit Standorten in ca. 30 Ländern,
- mehr als 7.150 Mitarbeitern und
- einem Umsatz von über 650 Mio. EUR

4 / 32

Grundlagen der Ultraschallverbindungstechnik

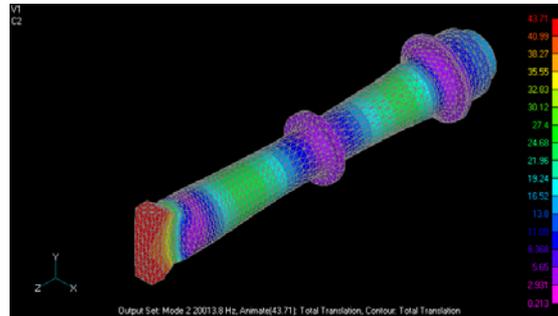


6 / 32

Grundlagen der Ultraschallverbindungstechnik
Schwingersystem einer Ultraschall-Metallschweißanlage



7 / 32



Ultraschall-Metallschweißen
Verfahrensprinzip



10 / 32



- Sonderverfahren des Kaltpreßschweißens gemäß DIN 8593 und DIN 1910
- Zugeordnet dem „Schweißen in fester Phase“
- Reibgeschwindigkeit ca. 0,8 m/s bis 2,0 m/s

Grundprinzip:

- Annähern der Fügeflächen und Aufbau der Schweißkraft
- Plastifizierung – einebnen der Oberflächenrauigkeiten und -welligkeiten
- Aufbrechen bestehender Oxidschichten / Beseitigung von Verunreinigungen
- Aktivierung der Oberflächen
- Bei Annäherung auf atomare Abstände kommt es zum Elektronenaustausch
- Generierung einer metallischen Verbindung **ohne schmelzflüssige Phase**
- Kristallerholung/Spannungsabbau durch Platzwechselforgänge im Metallgitter

Ultraschall-Metallschweißen

Schweißbare Materialien und Materialkombinationen

Vorzugsweise NE-Metalle und deren Legierungen wie z. B.:

- Kupfer
- Aluminium
- Silber
- Gold
- Platin
- Bronze
- Nickel
- Messing

Schweißbarkeitsschaubild nach Prof. Dr.-Ing. habil. J. Wodara Fachbuchreihe Schweißtechnik; Ultraschallfügen und -trennen; DVS Verlag, Düsseldorf, 2004

Ag - Silber	Al - Aluminium	Be - Beryllium	Bz - Bronze	Co - Kobalt	Cu/Ni - Kupfer/Nickel	Fe - Eisen	Fe/Ni - Eisen/Nickel	Ge - Germanium	Ir - Iridium	Mg - Magnesium	Mo - Molybdän	Ms - Messing	Nb - Niob	Ni - Nickel	Pb - Blei	Pd - Palladium	Pt - Platin	Re - Rhenium	Si - Silizium	Sn - Zinn	unl. St. - unleg. Stahl	rostf. St. - rostfreier Stahl	Ta - Tantal	Ti - Titan	U - Uran	V - Vanadium	W - Wolfram	Zn - Zink	Zr - Zirkonium	Glas - Glas	Ker. - Keramik
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

■ ultraschallschweißgeeignet
 ⊗ nicht ultraschallschweißgeeignet
 □ nicht untersucht

11 / 32

Ultraschall-Metallschweißen

Prozessparameter

- Amplitude
- Frequenz
- Druck / Kraft
- Energie
- Zeit
- Ausgangsgeometrie und
- Endgeometrie des Schweißgutes



Kompaktiermaß überschritten



Kompaktiermaß unterschritten



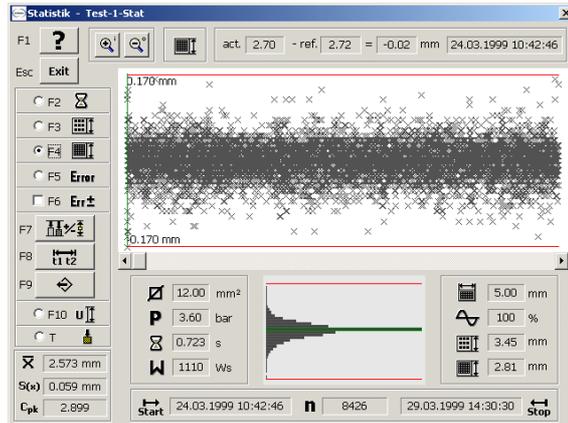
Schweißzeit überschritten



Schweißmaß unterschritten

13 / 32

Ultraschall-Metallschweißen
Prozeßdokumentation – Statistik



15 / 32

Ultraschall-Metallschweißen
Bandbreite der Schweißparameter

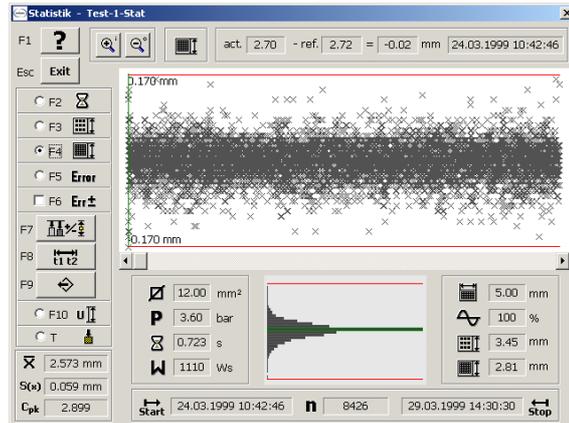


Amplitude: 10 μm – 30 μm
 Frequenz: 20 kHz – 40 kHz
 Schweißkraft: 0,1 kN – 5 kN
 Energie: 0,01 kJ – 6 kJ
 Zeit: 0,1 s – 2 s



16 / 32

Ultraschall-Metallschweißen
Prozeßdokumentation – Statistik



15 / 32

Ultraschall-Metallschweißen
Bandbreite der Schweißparameter



Amplitude: 10 μm – 30 μm
 Frequenz: 20 kHz – 40 kHz
 Schweißkraft: 0,1 kN – 5 kN
 Energie: 0,01 kJ – 6 kJ
 Zeit: 0,1 s – 2 s



16 / 32

Ultraschall-Metallschweißen

Schweißbare Materialien und Materialkombinationen

Vorzugsweise NE-Metalle und deren Legierungen wie z. B.:

- Kupfer
- Aluminium
- Silber
- Gold
- Platin
- Bronze
- Nickel
- Messing

Schweißbarkeitsschaubild nach Prof. Dr.-Ing. habil. J. Wodara Fachbuchreihe Schweißtechnik; Ultraschallfügen und -trennen; DVS Verlag, Düsseldorf, 2004

Ag - Silber	Al - Aluminium	Be - Beryllium	Bz - Bronze	Co - Kobalt	Cu/Ni - Kupfer/Nickel	Fe - Eisen	Fe/Ni - Eisen/Nickel	Ge - Germanium	Ir - Iridium	Mg - Magnesium	Mo - Molybdän	Ms - Messing	Nb - Niob	Ni - Nickel	Pb - Blei	Pd - Palladium	Pt - Platin	Re - Rhenium	Si - Silizium	Sn - Zinn	unl. St. - unleg. Stahl	rostf. St. - rostfreier Stahl	Ta - Tantal	Ti - Titan	U - Uran	V - Vanadium	W - Wolfram	Zn - Zink	Zr - Zirkonium	Glas - Glas	Ker. - Keramik	
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

■ ultraschallschweißgeeignet
 ⊗ nicht ultraschallschweißgeeignet
 □ nicht untersucht

11 / 32

Ultraschall-Metallschweißen

Prozessparameter

- Amplitude
- Frequenz
- Druck / Kraft
- Energie
- Zeit
- Ausgangsgeometrie und
- Endgeometrie des Schweißgutes



Kompaktiermaß überschritten



Kompaktiermaß unterschritten



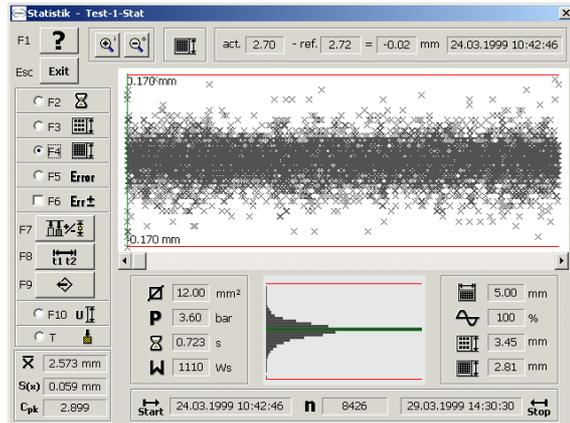
Schweißzeit überschritten



Schweißmaß unterschritten

13 / 32

Ultraschall-Metallschweißen
Prozeßdokumentation – Statistik



15 / 32

Ultraschall-Metallschweißen
Bandbreite der Schweißparameter



Amplitude: 10 µm – 30 µm
Frequenz: 20 kHz – 40 kHz
Schweißkraft: 0,1 kN – 5 kN
Energie: 0,01 kJ – 6 kJ
Zeit: 0,1 s – 2 s



16 / 32

Ultraschall-Metallschweißen

Schweißbare Materialien und Materialkombinationen

Vorzugsweise NE-Metalle und deren Legierungen wie z. B.:

- Kupfer
- Aluminium
- Silber
- Gold
- Platin
- Bronze
- Nickel
- Messing

Schweißbarkeitsschaubild nach Prof. Dr.-Ing. habil. J. Wodara Fachbuchreihe Schweißtechnik; Ultraschallfügen und -trennen; DVS Verlag, Düsseldorf, 2004

Ag - Silber	Al - Aluminium	Be - Beryllium	Bz - Bronze	Co - Kobalt	Cu/Ni - Kupfer/Nickel	Fe - Eisen	Fe/Ni - Eisen/Nickel	Ge - Germanium	Ir - Iridium	Mg - Magnesium	Mo - Molybdän	Ms - Messing	Nb - Niob	Ni - Nickel	Pb - Blei	Pd - Palladium	Pt - Platin	Re - Rhenium	Si - Silizium	Sn - Zinn	unl. St. - unleg. Stahl	rostf. St. - rostfreier Stahl	Ta - Tantal	Ti - Titan	U - Uran	V - Vanadium	W - Wolfram	Zn - Zink	Zr - Zirkonium	Glas - Glas	Ker. - Keramik	
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

■ ultraschallschweißgeeignet
 ⊗ nicht ultraschallschweißgeeignet
 □ nicht untersucht

11 / 32

Ultraschall-Metallschweißen

Prozessparameter

- Amplitude
- Frequenz
- Druck / Kraft
- Energie
- Zeit
- Ausgangsgeometrie und
- Endgeometrie des Schweißgutes



Kompaktiermaß überschritten



Kompaktiermaß unterschritten



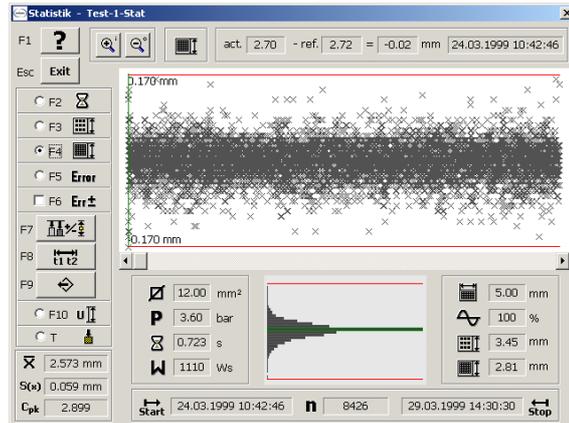
Schweißzeit überschritten



Schweißmaß unterschritten

13 / 32

Ultraschall-Metallschweißen
Prozeßdokumentation – Statistik



15 / 32

Ultraschall-Metallschweißen
Bandbreite der Schweißparameter



Amplitude: 10 µm – 30 µm
 Frequenz: 20 kHz – 40 kHz
 Schweißkraft: 0,1 kN – 5 kN
 Energie: 0,01 kJ – 6 kJ
 Zeit: 0,1 s – 2 s



16 / 32

Strategien zur Erhöhung der Bauteilfunktionalität durch Diffusionsschweißen

Strategies for an enhancement of functionality by diffusion bonding

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. J. Wilden, **Dr.-Ing. J. P. Bergmann**, Dipl.-Ing. S. Jahn, TU Ilmenau, Fachgebiet Fertigungstechnik, Ilmenau

Kurzfassung

Der heutige Trend zur Erhöhung der Bauteilfunktionalität erfordert beispielsweise metallische Bauteile mit komplexen 3-D Innenstrukturen. Dies ist sowohl im Makro- bis Mikrobereich der Fall, wobei zum einen die äußeren Abmaße als auch die Strukturgrößen die genannten Dimensionen aufweisen. Mittels des lamellaren Aufbaus können entsprechende Komponenten gefertigt werden. Nur durch ein vollflächiges stoffschlüssiges Verbinden kann gewährleistet werden, dass die aus strukturierten und gestapelten Lamellen erzeugten Bauteile dicht sind. Als Fügeverfahren bietet sich hierfür das Diffusionsschweißen an, da bei diesem im Allgemeinen keine flüssige Phase auftritt, die zu einem Füllen der Strukturen führen kann. Die in der Literatur aufgeführten Prozessgrenzen hinsichtlich maximaler Außendimensionen und minimaler Strukturgrößen sind heute deutlich erweitert und werden in diesem Beitrag dargestellt.

Abstract

The actual function integration trend requires parts with integrated complex threedimensional structures. This include both macroscopic and microscopic dimension with scaling of allowance and inside structures. Such components can be manufactured with a lamellar assembling. For the tightness of parts, made of structured and stacked metal sheets, a metallurgical bond is necessary. Diffusion bonding is a joining procedure, which fulfils the requirements. Because of the lack of a liquid phase, structures cannot be filled with material., so that the fluid can flow in the channels. The published restrictions regarding exterior allowance and minimal structure size inside are significantly enhanced today.

1. Einleitung

Heutzutage besteht ein zunehmender Bedarf an funktionellen Bauteilen, die beispielsweise durch komplexe 3-D Innenstrukturen gekennzeichnet sind.. Die Komplexität bezieht sich hierbei sowohl auf den Querschnitt als auch den Verlauf der Strukturen im Inneren. Bei wachsenden Außendimensionen werden die Innenstrukturen in den Mikrobereich skaliert.

Somit kann die Effizienz von Temperierbauelementen gesteigert werden, da die Austauschfläche zwischen Wärme- bzw. Kälteerzeuger und Transportmedium erhöht wird. Aufgrund der Vergrößerung des Oberflächen-Volumenverhältnisses bei Verkleinerung von Kanalstrukturen, steigt die Wärmeaustauschfläche bei der Parallelschaltung entsprechend dimensionierter Kanäle. Der bei kleinen Querschnitten auftretende Druckverlust wird ebenfalls durch eine Vielzahl parallel verlaufender Mikrokanäle ausgeglichen. Ferner ist diese Art der Schaltung notwendig, wenn hohe Durchflussraten erzielt werden müssen.

Eine weitere Effizienzsteigerung ergibt sich aus der Verkürzung der Wege innerhalb der Strömung aufgrund des kleinen Querschnittes. Die kurzen Wege zwischen Kernströmung und Strömungsrandschicht werden unter anderem genutzt um Medien innerhalb von kurzen Fließstrecken zu Vermischen. Unter dem Aspekt Sicherheit kann aufgeführt werden, dass aufgrund der kleinen Reaktionsvolumina eine Erhöhung der Sicherheit beim Einsatz von hochreaktiven Substanzen stattfindet. Ein Beispiel für die Anwendung von Mikrokanälen ist der so genannte H-Filter, mit dem aus Lösungen Moleküle oder Zellen sowie Bakterien herausgefiltert werden können. Das Bild 1 enthält eine Prinzipskizze des H-Filters.

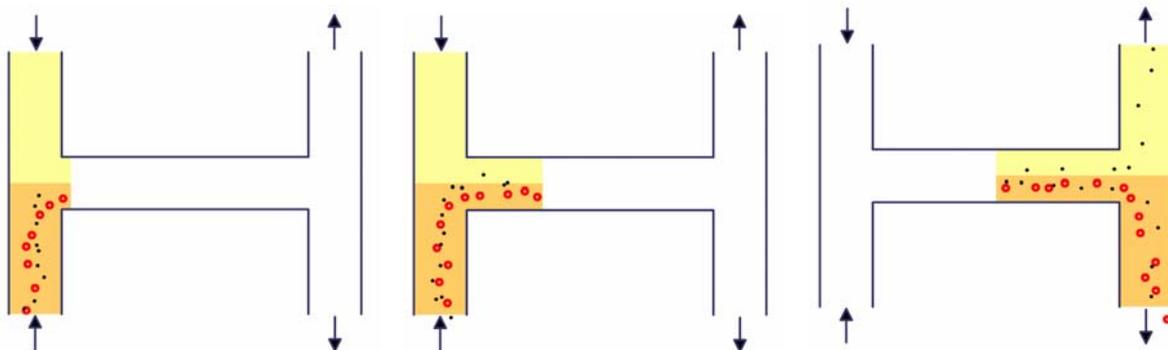


Bild 1: H-Filter [Mic06]

Um die Funktion zu gewährleisten sind die Mikrokanäle mit sehr hohen Genauigkeiten anzufertigen.

Kanäle mit kleinen Querschnitten werden neben der Mikrosystem- und Verfahrenstechnik auch in Fertigungsmitteln benötigt. Ein Beispiel sind Werkzeuge, beispielsweise Spritzgieß- oder Prägwerkzeuge, mit denen Mikrobauteile hergestellt werden.

Problematisch gestaltet sich das Ausnutzen der wissenschaftlich hinterlegten Größeneffekte. Dies bezieht sich vor allem auf die Fertigung entsprechender Bauteile. Bisher kommen dafür Verfahren aus der Elektronikproduktion zum Einsatz, die jedoch zwei wesentliche Nachteile

aufweisen. Zum einen ist die Werkstoffauswahl stark begrenzt. Die Werkstoffe der Elektrotechnik und Elektronik decken die neuen Anforderungen nur eingeschränkt ab. Zum zweiten resultieren aus den Fertigungsprozessen geometrische Beschränkungen. Beides steht im Gegensatz zu den Anforderungen wie freie Geometriewahl, höhere Verschleißbeständigkeit und Lebensdauer.

In den aufgeführten Anwendungen kann die mögliche Funktionalität heute nicht vollständig ausgenutzt werden, da es an einer ganzheitlichen Technologie zum prozesssicheren Herstellen von Komponenten aus metallischen Werkstoffen mit integrierten Strukturen wie sie für das Temperieren beim Mikrospritzgießen oder das Kühlen von Mikroprozessoren sowie in der Verfahrenstechnik benötigt werden, mangelt. Es sind deshalb Strategien zu entwickeln, die es gestatten die Bauteilfunktionalität auf Basis der genannten Effekte zu erhöhen.

3. Lameller Aufbau von Bauteilen

Ein Ansatz zum Generieren von entsprechenden Bauteilen, und damit der Erhöhung der Bauteilfunktionalität, bietet der lamellare bzw. schichtweise Aufbau. Im Bereich des Rapid Prototyping ist dieser Ansatz mit dem Werkstoff Papier als Laminated Object Manufacturing (LOM) bekannt. Dabei wird das zu erzeugende Bauteil nach der Konstruktion in einzelne Schichten entsprechend der Rohstoffdicke zerlegt und diese anschließend ausgeschnitten. Im nächsten Arbeitsschritt werden die Einzelteile durch Kleben gefügt und das Bauteil abschließend endbearbeitet.

Hinsichtlich der Innenstrukturen ist durch den lamellaren Aufbau keine wesentliche geometrische Beschränkung vorhanden. Diese können beliebig im Bauteil verlaufen, beispielsweise elliptisch oder spiralförmig. Die Innenstrukturen können dabei die unterschiedlichsten Querschnitte erhalten. Neben dem annähernd kreisförmigen sind auch elliptische, recht- oder mehreckige Querschnitte herstellbar. Die Innenstrukturen sind somit beliebig an den jeweiligen Anwendungsfall anpassbar.

Die vorgestellte Technologie bietet neben den gestalterischen Freiheiten bezüglich der Innenstrukturen wie sie als Temperierkanäle für Formwerkzeuge [Wil06] oder in der Verfahrenstechnik benötigt werden einen weiteren wesentlichen Vorteil. Bei der Einzelteilerfertigung können auch die Außenseiten schon endkonturnah bearbeitet werden. Nach dem Fügeprozess ist nur noch ein geringer Anteil Material abzutragen, um das einsatzfertige Bauteil zu erhalten. Daraus resultiert eine Verkürzung der Fertigungszeit weshalb die Formwerkzeugfertigung aus Lamellen den „Rapid Tooling“-Verfahren zugeordnet wird [Him05].

In Bild 2 ist die Technologiekette des lamellaren Aufbaus von metallischen Bauteilen vereinfacht schematisch dargestellt. Beim dem Überführen der Technologie hin zu metallischen

Werkstoffen sind in den ersten beiden Prozessschritten keine wesentlichen Änderungen notwendig. Ausgehend von einem an Technologie und Werkstoff angepasstem Konstruktionsmodell erfolgt wiederum das Zerlegen in Einzellamellen (Slicen). Dabei müssen die Lamellen keine konstanten Höhen aufweisen. Nach dem Erzeugen von CNC-Programmen erfolgt die Fertigung der Einzelteile mittels unterschiedlichsten konventionellen Verfahren wie beispielsweise erosives Draht- oder Laserstrahlschneiden bzw. Präzisionsfräsen. Die Fertigung von Einzelteilen mit mikroskopischen Dimensionen ist heute technisch möglich.

Um aus den einzelnen Teilen wiederum einen kompakten Körper entsprechend der Konstruktion zu erzeugen, muss ein vollflächiges stoffschlüssiges Verbinden der Lamellen erfolgen. Nur dadurch kann erreicht werden, dass das Endprodukt Eigenschaften vergleichbar dem Grundwerkstoff aufweist. Ein Problempunkt der in Bild 2 vorgestellten Prozesskette stellt jedoch das Fügen der Einzelteile dar. Um die, für die beschriebenen Anwendungen erforderliche Dichtheit zwischen den Lamellen gewährleisten zu können, ist eine vollflächige stoffschlüssige Verbindung unumgänglich. Mit einer derartigen Verbindung kann eine hohe Druckbelastbarkeit der Bauteile ebenfalls sichergestellt werden. Vor dem Einsatz können nach dem Fügen klassische Nachbearbeitungsverfahren wie Wärmebehandlung, Polieren oder Anbringen von Anschlusselementen erfolgen.

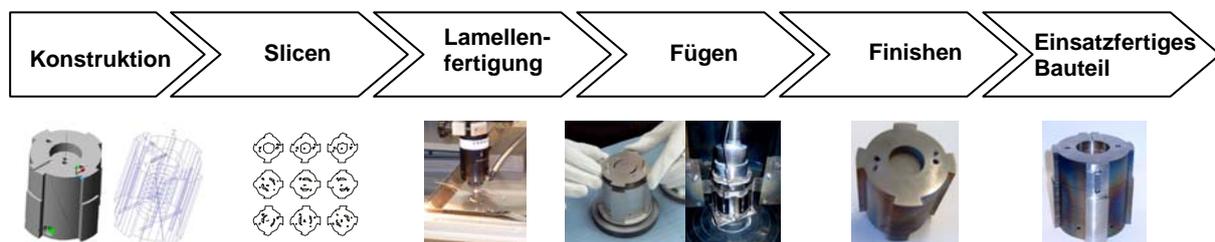


Bild 2: Prozesskette lamellarer Aufbau

3. Fügen von Lamellen

Bekannt sind für das Fügen von Lamellenaufbauten kraft- und stoffschlüssige Verfahren. Die im Laboreinsatz genutzten Varianten des Klemmens oder Verschraubens führen zu kurzzeitig dichten, vollflächigen Verbindungen. Jedoch ist besonders bei dynamischer Temperaturführung aufgrund der Wärmeausdehnung eine Dichtheit nicht zu gewährleisten und deshalb eine Anwendung im industriellen Umfeld auszuschließen. Eine 100%-dichte Verbindung kann nur durch Stoffschluss gewährleistet werden. Das stoffschlüssige Fügen kann dabei sowohl linienförmig als auch vollflächig erfolgen. Für Anwendungen, die keine vollflächige Verbindung erfordern, werden Laser- und Elektronenstrahlschweißverfahren eingesetzt. Da-

bei werden die Einzelteile nur linienhaft miteinander verschweißt. Die Nachteile einer nicht vollflächig ausgebildeten Verbindung sind geringere Wärmeübertragungs- und Druckbelastbarkeitskennwerte.

Zum Erzielen von hohen mechanischen Eigenschaften ist es deshalb notwendig, die einzelnen Elemente vollflächig stoffschlüssig ohne Spalte und Fehlstellen zu verbinden. Mit den Verfahren Kleben, Löten und Diffusionsschweißen können derartige Verbindungen erzeugt werden.

Klebeverfahren werden gegenwärtig im industriellen Umfeld schon zum vollflächigen Verbinden von Metallen eingesetzt. Negativ im Hinblick auf die beschriebenen Anwendungen, sind jedoch die geringe Druckfestigkeit und die niedrige Temperaturstabilität der heute kommerziell verfügbaren Klebstoffe. Die maximal kurzzeitig zulässige Temperatur liegt derzeit bei 300° C. Dies schließt einen Einsatz des Klebens in der Verfahrenstechnik beispielsweise zur Wasserstofferzeugung aus. Zusätzlich besteht beim Fügen die Gefahr, dass Klebstoff in die Mikrostrukturen eindringt und damit das Bauteil funktionsuntüchtig wird. Ebenso ist eine Langzeitbeständigkeit der Verbindung noch nicht hinreichend gesichert.

Durch Löten werden ebenso wie beim Kleben stoffschlüssige Verbindungen erzielt, wobei wiederum unterschiedlichste Werkstoffe vollflächig gefügt werden können. Mit einer zunehmenden Verkleinerung der Strukturgrößen nimmt die Kapillarkraft zu. Bei Lötprozessen wird dies im Allgemeinen ausgenutzt, um Lötspalte zu füllen. Nachteilig beim Fügen von mikrostrukturierten Bauteilen ist jedoch, dass die Kapillarkraft auch in den Bereichen der Mikrostrukturen auftritt. Bis zu einem minimalen rechteckigen Querschnitt von 1 x 1 mm² können durch Vakuumlöten befriedigende Verbindungen erzielt werden, ohne dass die Kanalstrukturen mit Lot gefüllt werden. Sind die in den Bauteilen vorhandenen Strukturen kleiner, besteht gleichermaßen wie beim Kleben die Gefahr des Verschließens der Mikrokanäle mit flüssigem Zusatzwerkstoff. Negativ für die Funktion wirkt sich auch die erhöhte Korrosionsanfälligkeit gelöteter Verbindungen, aufgrund der unterschiedlichen elektrochemischen Spannungspotentiale von Grund- und Lotwerkstoff, aus.

Für das Fügen von mikrostrukturierten Lamellen bietet sich letztendlich das Diffusionsschweißen an, da bei diesem Verfahren keine schmelzflüssige Phase auftritt, wodurch die Mikrogeometrien gefüllt und somit verschlossen werden. Das Diffusionsschweißen wird im Allgemeinen über die Prozessparameter Flächenpressung (p), Schweißzeit (t) und -temperatur (T) sowie Schweißatmosphäre geregelt. Beeinflusst wird die Parameterauswahl vor allem durch die Werkstoffzusammensetzung. Aber auch die Oberflächenvorbereitung und die geometrischen Dimensionen müssen berücksichtigt werden.

Eine Skalierung zu immer kleineren Dimensionen ist deshalb ohne entsprechende Prozessentwicklung nicht ohne weiteres möglich. Wie bei der Miniaturisierung des Zerspanens treten auch beim Diffusionsschweißen Effekte in den Vordergrund, die beim Fügen von Makroteilen vernachlässigbar sind.

4. Skalierungsbedingte Prozessanpassung

Aufgrund der Innenstrukturen mit Querschnitten 1 mm^2 und kleiner sind skalierungsbedingte Anpassungen am Diffusionsschweißprozess notwendig. Das Schweißen mit Parametern, die im makroskopischen erfolgreich eingesetzt werden, führt zu Deformationen, die die Funktion beeinträchtigen bzw. zu einem Ausfall führen. Dies ist zum einen auf die hohen Flächenpressungen von bis 20 N/mm^2 zurückzuführen. Zum anderen wird die Flächenpressung während des Erwärmens, aber deutlich unterhalb der Schweißtemperatur, erhöht, so dass eine hohe Umformung stattfindet. Bei makroskopischen Dimensionen führt dies dazu, dass lokal die Streckgrenze überschritten wird und es zu plastischen Verformungen nur im Kontaktbereich der einzelnen Lamellen kommt. Bei Lamellenstärken von $1,0 \text{ mm}$ und kleiner sinkt jedoch das höhenabhängige Biegezugmoment so ab, dass die Verformung sich über die gesamte Lamellenhöhe auswirkt. Weiterhin wirkt sich eine Verformung von $10 \text{ }\mu\text{m}$ bei herkömmlichen makroskopischen Bauteilen nur unwesentlich auf die Funktion aus.

5. Ergebnisse und Diskussion

Um die gewünschten Formgenauigkeiten zu erzielen wurden zuerst grundlegende FEM-Berechnungen durchgeführt und danach durch experimentelle Untersuchungen verifiziert.

Eine Maßnahme zur Verringerung der Verformung ist der Verzicht auf das Anformen bzw. die Druck- oder Flächenpressungserhöhung beim Aufwärmen der Fügeteile. Allein durch den Wegfall der Flächenpressungsverdopplung konnte die Verformung in Krafteinleitungsrichtung von $5,0 \pm 1,0 \text{ }\mu\text{m}$ auf $2,4 \pm 0,6 \text{ }\mu\text{m}$ halbiert werden. Trotzdem konnte die Formtoleranz nicht prozesssicher eingehalten werden.

Eine Verringerung der Flächenpressung auf Werte unterhalb von 6 N/mm^2 führte zum Ziel bezüglich der Formgenauigkeit. Mit $0,6 \text{ N/mm}^2$ Flächenpressung (Bild 3) wurde jedoch eine fehlerfreie Verschweißung nicht erzielt. Die Fehlstellen sind schon im ungeätzten Zustand im Querschliff zu erkennen. Nach dem Ätzen fällt auch auf, dass kein Kornwachstum über die Fügezone hinaus erfolgte. Für die Anwendung in der Verfahrttechnik führt die fehlerbehaftete Anbindung zu Funktionsstörungen. Um die Anbindung zu erhöhen, ist eine deutliche Verlängerung der Schweißzeit notwendig, welches unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten jedoch nicht zielführend ist. Erfolgt die Schweißung mit 6 N/mm^2 Flächenpressung, so

sind sowohl im geätzten als auch im ungeätzten Zustand die Fügeebenen aufgrund des Kornwachstums nicht mehr zu erkennen. Jedoch wird dabei auch die Konturtreue verringert.

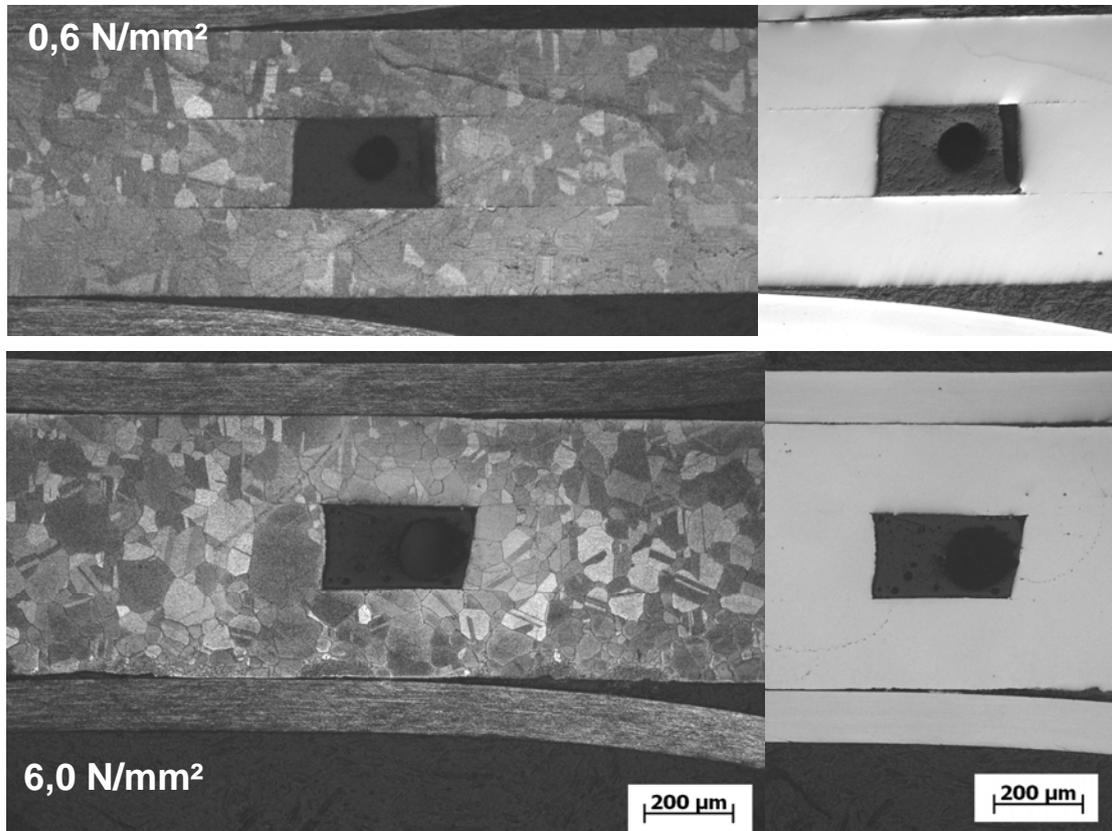


Bild 3: Querschliffe von diffusionsgeschweißten Mikrokanälen (1.4301, $T = 1100^\circ \text{C}$, $t = 90 \text{ min.}$)

Aus den Untersuchungen zur Prozessfensterermittlung des Diffusionsschweißens von mikrostrukturierten Lamellen kann festgehalten werden, dass die Flächenpressung bei ca. 6 N/mm^2 liegen sollte.

Durch das Integrieren von Ausgleichsflächen, die dem Erzielen von nahezu identischen Flächenpressungen innerhalb des Lamellenstapels dienen, konnte letztendlich die Formgenauigkeit gewährleistet werden. Weiterhin fungieren die Ausgleichsflächen als gezielt eingebrachte Unstetigkeitsstellen zum Aufnehmen von spannungsinduzierten Verformungen.

Es erfolgten Optimierungen dieser Flächen anhand von FEM-Analysen. Bei abruptem Flächenübergängen kann auch über die Ausgleichsflächen eine Kompensation nicht mehr erfolgen (Geometriebeispiel: Bild 4). Um die Verformung, im Wesentlichen ein Durchbiegen der Lamellen in diesem Fall zu verringern, wurde eine Schweißstrategie anhand von Durchbiegungsberechnungen entwickelt. In die Gleichung gehen neben der Lamellenstärke h , die

Flächenpressung p , die nicht aufliegende Breite b sowie der E-Modul ein. Über den Beiwert c_3 wird das Verhältnis von nicht aufliegender Länge zu Breite bei rechteckigen Einspannungen beschrieben.

Als Flächenlast wurden, wie in den Schweißversuchen auch, 6 N/mm^2 eingesetzt. Die Abmessungen für die Berechnungen waren eine freie Fläche von $10 \times 10 \text{ mm}^2$ bei einer Höhe h von $0,1 \text{ mm}$ (einzelne $0,1 \text{ mm}$ Lamellen) bzw. $0,7 \text{ mm}$ (verschweißtes Lamellenpaket). Der E-Modul des Werkstoffes beträgt 210000 N/mm^2 . Die berechnete Durchbiegung beträgt, bei einer Lamellenstärke von $0,1 \text{ mm}$, mehr als das 340-fache ($0,64 \text{ mm}$), im Vergleich zu der Deformation bei einer Blechstärke von $0,7 \text{ mm}$ ($0,00187 \text{ mm}$). Bei konstanten Randbedingungen sinkt die theoretische Durchbiegung mit zunehmender Blechstärke, da die Blechstärke in die Durchbiegungsgleichung kubisch eingeht.

Lamellenstärke:

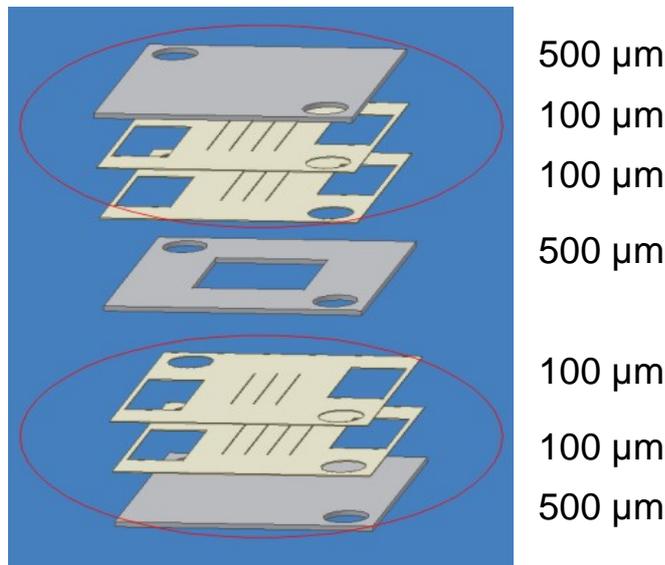


Bild 4: Geometrie der Teststruktur

Daraus ergibt sich eine deutlich geringere Durchbiegung, unter Berücksichtigung der Schweißreihenstrategie, wenn zuerst die einzelnen Lamellen über dem Hohlraum miteinander verschweißt werden (Bild 4). Diese verbundenen Lamellenpakete weisen danach eine Stärke von ca. $0,7 \text{ mm}$ gegenüber $0,1 \text{ mm}$ Stärke der Einzellamellen auf. Mittels Experimenten wurden die theoretischen Ergebnisse der Durchbiegungsberechnungen und der daraus abgeleiteten Strategie bestätigt.

Das Bild 5 beinhaltet links einen Querschliff einer Komplettschweißung (1-stufig) und rechts den einer mehrstufig geschweißten Probe. Während bei der Komplettschweißung die dünnen Lamellen verbogen und nicht verschweißt werden, kommt es bei der Stufenschweißung

zu dem gewünschten Ergebnis. Dies ist auf die höheren Biegekräfte der zuerst erzeugten Lamellenpakete zurückzuführen.

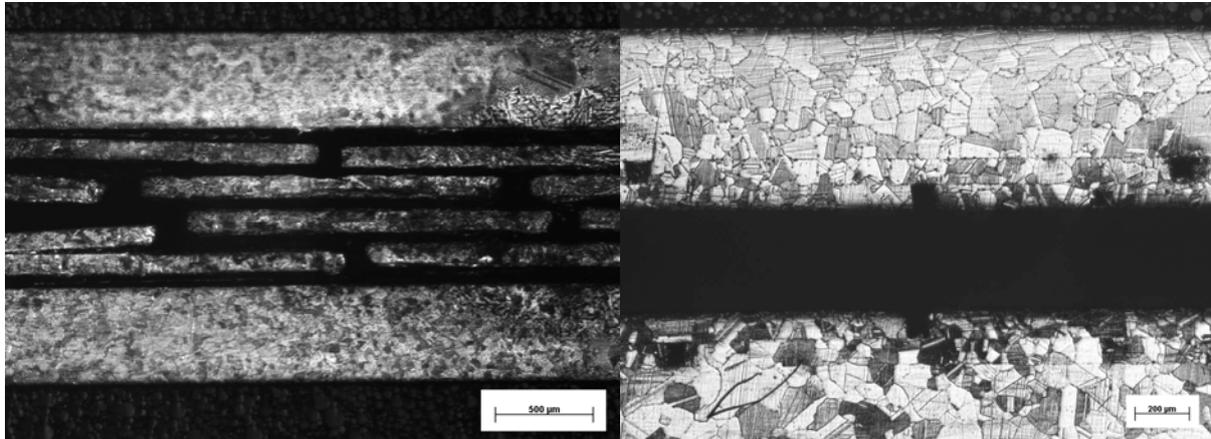


Bild 5: Teststruktur geschweißt in einem Schritt (links) und mit der entwickelten Strategie (rechts), (1.4301, $T = 1100^{\circ} \text{C}$, $t = 90 \text{ min}$, $p = 6 \text{ N/mm}^2$)

Ein weiteres Problemfeld ergibt sich aus den Dimensionen der Innenstrukturen. Aufgrund dieser müssen die Lamellen präzise zueinander ausgerichtet werden, da ansonsten bei Strukturen die die Lamellenebenen kreuzen keine durchgehende Verbindung gegeben ist. Bei makroskopischen Dimensionen wird häufig formschlüssig mittels Passstiften positioniert. Werden Präzisionspassstifte genutzt so können minimal Positioniergenauigkeiten von $\pm 35 \mu\text{m}$ erzielt werden. Die Passstifte gehen dabei aber verloren, da sie ins Bauteil eingeschweißt werden. Auch müssen die Führungsbohrungen eine hohe Maßgenauigkeit aufweisen, um eine Spielpassung im Mikrometerbereich zu gewährleisten und ein Verklemmen der Lamellen zu verhindern.

Bei einem stoffschlüssigen Fixieren der Lamellen mittels Laserstrahlschweißen auf der Außenseite können die Führungsbohrungen entfallen und es werden keine Passstifte benötigt.

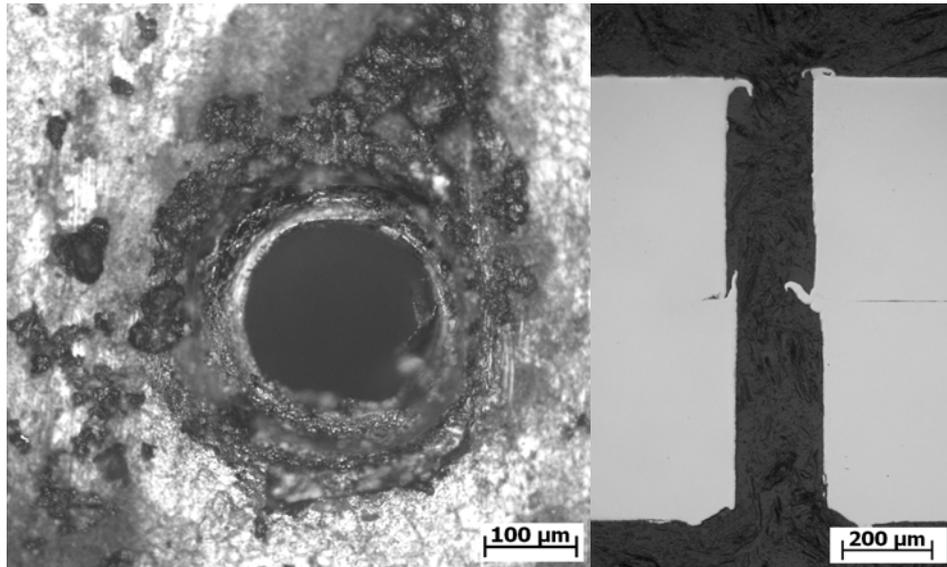


Bild 6: Verschweißte Blechlamellen mit 150 µm Bohrungen; der vorhandene Grat beeinflusst das Schweißergebnis wesentlich (1.4301, T = 1100° C, t = 90 min, p = 6 N/mm²)

Das Ausrichten vor dem Fixieren kann optisch direkt an den Funktionsstrukturen erfolgen. Eine Aufsichtsaufnahme sowie ein Querschliff von zwei diffusionsgeschweißten Blechlamellen ist in Bild 6 enthalten. In dem Querschliff ist auch eine weitere Problematik des Fügens von mikrostrukturierten Lamellen zu entnehmen. Bildet sich bei der Mikrobearbeitung, sei es durch Laserstrahlschneiden oder Mikrofräsen, ein Grat, so muss dieser beseitigt werden. Werden wie dargestellt gratbehaftete Lamellen verschweißt, so führt dies zu zwei Fehlerbildern. Ist der Grat auf der Außenseite vorhanden, so wird er von Kräfteinleitungsstempel in die Struktur gedrückt (oben im Bild 6). Liegt der Grat dagegen in der Fügeebene, so führt dies zu einer fehlerhaften Fügung. Aus den Untersuchungen kann festgehalten werden, dass der Grat deutlich unter 10 µm sein sollte, um das Schweißergebnis nicht negativ zu beeinflussen.

6. Anwendungen

Formgebungsprozesse sowie chemische Reaktion laufen bei erhöhten Temperaturen effizienter ab. In der Verfahrenstechnik wird dadurch die Produktausbeute gesteigert, im Fall der Formgebung können die Abformgenauigkeit beim Spritzgießen oder der Umformgrad beim Tiefziehen von Magnesiumblechen erhöht werden. Ziel von Temperieroptimierungen sind neben der Verkürzung der Temperaturänderungszeit auch das Einstellen einer gleichmäßigen Temperaturverteilung. Besonders beim Spritzgießen von optischen Bauelementen wirkt sich dies auf die Produktqualität aus. Daher muss der so genannte Temperierfehler gering gehalten werden. Im Fall von konventionellen Kanälen versucht man dies, indem der Ab-

stand der Kanalbohrungen größer gewählt wird. Aufgrund der daraus resultierenden Wärmeleitungswege wird die Prozesszeit erhöht. Durch den beschriebenen Ansatz der Parallelschaltung einer Vielzahl kleinquerschnittiger Kanäle kann die Wärmeaustauschfläche erhöht und die Zykluszeit verkürzt werden. Weiterhin können die Kanäle nahe der Kontur positioniert werden, ohne die Steifigkeit des Werkzeuges wesentlich zu verringern. Mittels FEM-Berechnungen wurden verschiedene Kanalgeometrien und Anordnungen bewertet und optimiert. In Bild 7 ist die Temperaturverteilung beim Abkühlen nach erfolgter Erwärmung dargestellt. Die zu temperierende Fläche ist in der Seitenansicht jeweils oben angeordnet. Die Unterseite wird von einem zweiten Kreislauf konstant auf 20° C gehalten. Weiterhin sind die Seitenflächen im Modell thermisch zur Umgebung isoliert. Es ist jeweils die Temperaturverteilung nach 20s Kühlen nach gleichen Startbedingungen abgebildet. Neben der schnelleren Abkühlung durch die „Wärmetauscherstruktur“ wird auch ein geringerer Temperierfehler erzielt.

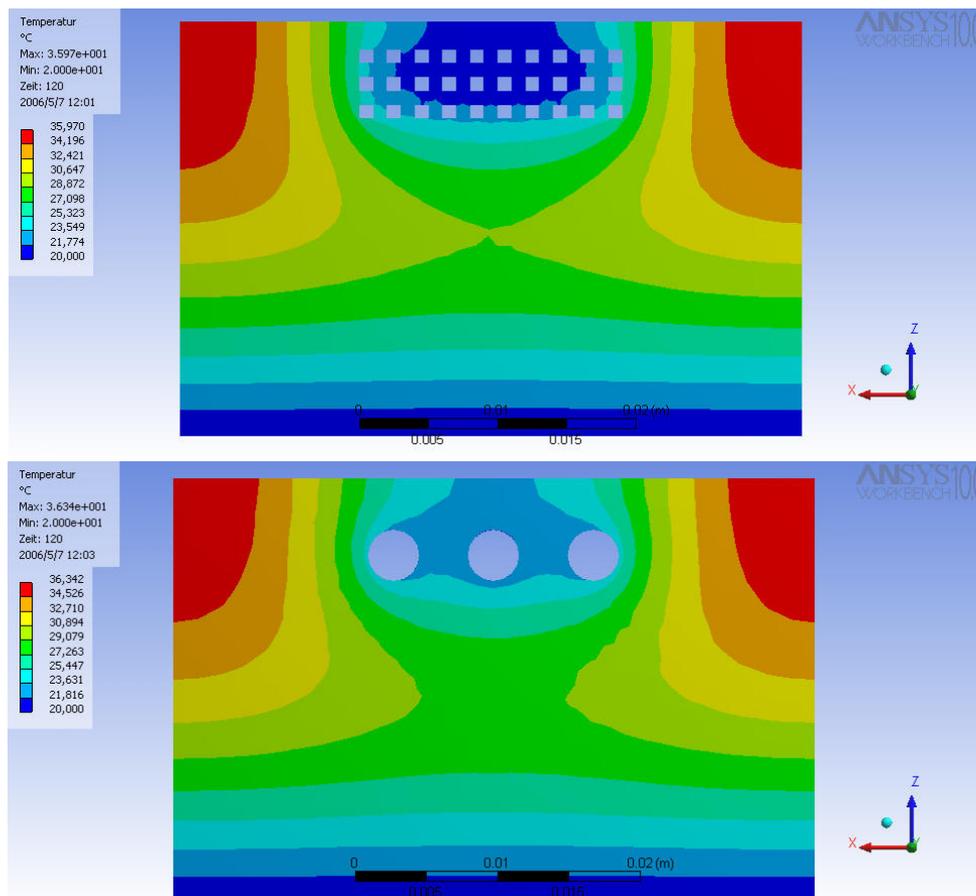


Bild 7: Temperaturverteilung beim Kühlen bei zwei unterschiedlichen Kanalgeometrien

Die berechnete Struktur wurde in einem Formeinsatz integriert (Bild 8), welcher mittels des lamellaren Aufbaus und Diffusionsschweißens erzeugt wurde. Mittels Thermoelementen und Wärmebildkamera wurde der Einsatz bewertet. Die Experimente bestätigten das berechnete thermische Verhalten.

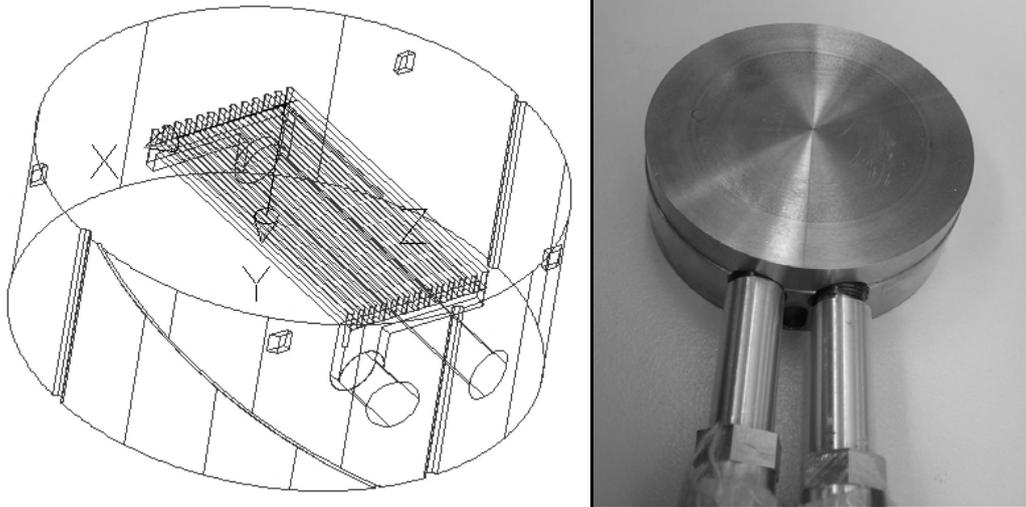


Bild 8: 3D-Modell und angefertigter Formeinsatz mit integrierter Wärmetauscherstruktur

Eine weitere Möglichkeit unter praxisnahen Bedingungen die Funktionalität, in diesem Fall die Temperierungseigenschaften, zu verbessern bietet sich durch den gezielten Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe. Im folgenden Beispiel wird der hohen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und der hohen Festigkeit und Verschleißbeständigkeit von Stahl in einem Bauteil Rechnung getragen. Beim Diffusionsschweißen werden keinerlei Hilfsstoffe benötigt, um Kupfer mit Stahl stoffschlüssig zu fügen. Dadurch wird der Wärmeübergang, im Gegensatz zum Löten, nicht negativ beeinflusst wird.

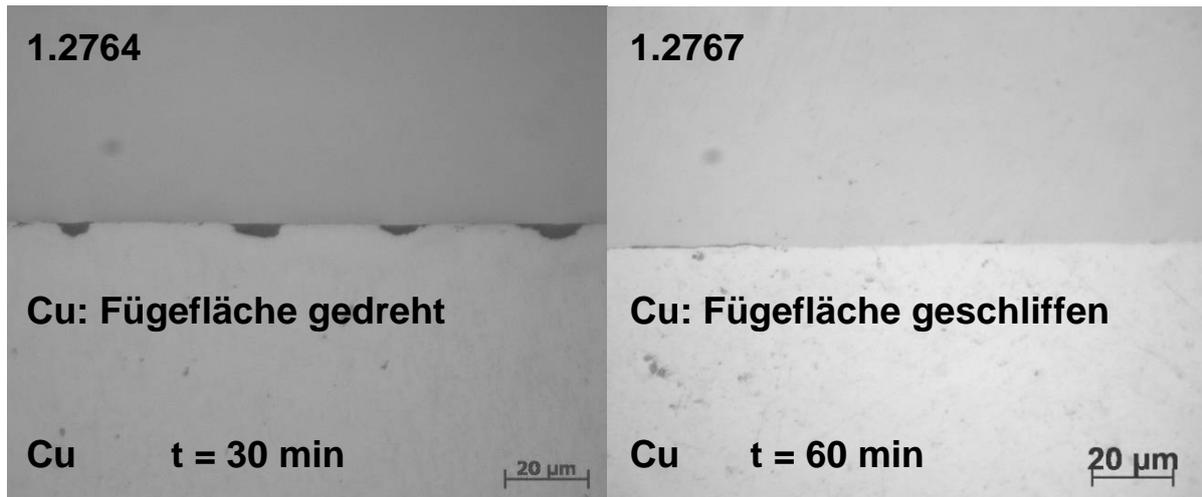


Bild 9: Fügezonen von Stahl – Kupferverbindungen ($T = 680^{\circ} \text{C}$, $p = 7,0 \text{ N/mm}^2$)

Für die genannte Werkstoffkombination wurden Schweißversuche durchgeführt. Die Fügezonen von zwei verschiedenen Stahlwerkstoffen (1.2764 und 1.2767) mit OF-Cu, die bei unterschiedlichen Prozessparametern gefügt wurden, sind in Bild 9 dargestellt.

Die Fügeflächen der Kupferteile, die mit 1.2764 gefügt wurden, waren feingedreht. Dies ist auch in der Schweißzone zu erkennen. Beim Drehen ergibt sich, durch die Prozesskinematik bedingt, ein periodisches Oberflächenprofil. Dieses besteht aus einer Abfolge von Spitzen und Senken. Die Oberflächenstruktur ist auch nach dem Fügen in Form von Fehlstellen noch zu erkennen (Bild 9 links). Die Anbindungen zwischen den Fehlstellen ist vollflächig ausgebildet.

Zur Verringerung der vorhandenen Fehlstellen muss entweder die Temperatur, oder die Schweißzeit erhöht bzw. die Oberfläche durch Schleifen vorbereitet werden. Im Vergleich zum Werkstoff 1.2764 wurde bei den Versuchen mit dem Werkstoff 1.2767 zum einen eine längere Schweißzeit (60 min statt 30 min) eingesetzt. Zum anderen war die Oberflächen des Kupfers geschliffen und nicht feingedreht.

Aus den Versuchen zum Erzeugen von Mischverbindungen zwischen Kupfer und Warmarbeitstählen ist festzuhalten, dass sich aufgrund des höheren Diffusionskoeffizienten von Kupfer, schon bei geringeren Temperaturen nahezu fehlerfreie Verbindungen ausbilden.

7. Zusammenfassung

Die Fertigung von innenstrukturierten Mikrobauteile durch Diffusionsschweißen bedarf neue Strategien, die es ermöglichen die Strukturgrößen prozesssicher zu reproduzieren. Dies schließt neben der Anpassung der Prozessbedingungen, insbesondere auch der Fügestrategie, die konstruktive Optimierung der Einzellamellen mit ein. Im Endergebnis konnten Bau-

teile mit den geforderten Kanaldimensionen und –genauigkeiten der Verfahrenstechnik hergestellt werden. Dabei wurden auch die geringeren Anforderungen für Kühlelemente erfüllt, bei denen höhere Strukturdeformationen die Funktion nicht signifikant beeinflussen.

Die Charakterisierung der so hergestellten Bauteile erfolgte hinsichtlich der Gefügemorphologie, der Formänderung beim Fügen und den Funktionseigenschaften wie zum Beispiel der Temperierung. Im Hinblick auf Formwerkzeuge wurde durch die Integration von Wärmetauscherstrukturen eine konturnahe hochdynamische fluidische Temperierung erzielt. Dabei ist auch die Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung hervorzuheben.

Die Erhöhung der Bauteilfunktionalität wurde durch die Kombination von lamellaren Aufbau und Diffusionsschweißen erzielt. Nur dadurch ist es möglich, die geforderten Innenstrukturen herzustellen, um damit die Funktionen Temperierung oder Medientrennung zu optimieren.

8. Literatur

- [Him05] Himmer, T.: Werkzeugfertigung durch Fügen von Metallblechen, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, 2005
- [Mic06] N.N., Micronics Inc. , Redmond, USA, www.micronincs.net, 2006
- [Wil06] Wilden, J., et al.: Diffusionsschweißen von Replikationswerkzeugen, in: Thüringer Werkstofftag 2006 - Polymere in Thüringen, Verlag Dr. Köster, Berlin, 2006

Thermisches Fügen metallischer Werkstoffkombinationen mit dem Elektronenstrahl

Thermal joining of materials combination with electron beam

Dipl.-Ing. J. Holk, ISF - Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen

Kurzfassung

Die Bedeutung hybrider Strukturen aus artfremden metallischen Werkstoffen wird in Zukunft aus wirtschaftlichen und technischen Gründen weiter steigen. Mit dem Elektronenstrahl im Vakuum und an Atmosphäre steht ein sehr leistungsfähiges und flexibles Werkzeug zum thermischen Fügen von Werkstoffkombinationen zur Verfügung. Damit sind Techniken und Verfahren realisierbar, durch die sich Werkstoffkombinationen, die aus metallurgischen Gründen bisher als nicht oder schwer schweißbar galten, verbinden lassen. In Abhängigkeit der Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien bieten sich verschiedene Fügestrategien für die einzelnen Werkstoffpaarungen besonders an. Diese Fügestrategien umfassen das Fügen durch Aufschmelzen eines der Fügepartner, das Fügen durch Einsatz eines Zusatzwerkstoffes, das Fügen durch Aufschmelzen beider Fügepartner mit sehr hohen Fügegeschwindigkeiten und das Fügen der Werkstoffe im festen Zustand durch Diffusion. Mit diesen Maßnahmen kann die Bildung hochspröder intermetallischer Phasen, die in der Regel zum Bruch der Verbindung führen, auf ein hinsichtlich der Festigkeit unkritisches Maß reduziert werden.

Im Rahmen der beschriebenen Arbeiten wurden günstige Fügestrategien für verschiedene Werkstoffpaarungen verifiziert und deren Umsetzung mit dem Elektronenstrahlverfahren bewertet.

Abstract

Importance of hybrid structures of different materials will increase in future due to economical and technical reasons. With electron beam technology either in vacuum and at atmosphere one has a powerful and flexible tool for thermal joining of materials combination. So techniques and processes are feasible for joining materials combination, which are hardly weldable from metallurgical point of view. Depending on the properties of the materials several joining strategies for each combination are applicable. Strategies include joining by melting only one material, use of filler material, joining by melting both materials with high joining speed and solid state joining by diffusion at elevated

Thermisches Fügen metallischer Werkstoffkombinationen mit dem Elektronenstrahl

Thermal joining of materials combination with electron beam

J. Holk, ISF - Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen

Kurzfassung

Die Bedeutung hybrider Strukturen aus artfremden metallischen Werkstoffen wird in Zukunft aus wirtschaftlichen und technischen Gründen weiter steigen. Mit dem Elektronenstrahl im Vakuum und an Atmosphäre steht ein sehr leistungsfähiges und flexibles Werkzeug zum thermischen Fügen von Werkstoffkombinationen zur Verfügung. Damit sind Techniken und Verfahren realisierbar, durch die sich Werkstoffkombinationen, die aus metallurgischen Gründen bisher als nicht oder schwer schweißbar galten, verbinden lassen. In Abhängigkeit der Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien bieten sich verschiedene Fügestrategien für die einzelnen Werkstoffpaarungen besonders an. Diese Fügestrategien umfassen das Fügen durch Aufschmelzen eines der Fügepartner, das Fügen durch Einsatz eines Zusatzwerkstoffes, das Fügen durch Aufschmelzen beider Fügepartner mit sehr hohen Fügegeschwindigkeiten und das Fügen der Werkstoffe im festen Zustand durch Diffusion. Mit diesen Maßnahmen kann die Bildung hochspröder intermetallischer Phasen, die in der Regel zum Bruch der Verbindung führen, auf ein hinsichtlich der Festigkeit unkritisches Maß reduziert werden.

Im Rahmen der beschriebenen Arbeiten wurden günstige Fügestrategien für verschiedene Werkstoffpaarungen verifiziert und deren Umsetzung mit dem Elektronenstrahlverfahren bewertet.

Abstract

Importance of hybrid structures of different materials will increase in future due to economical and technical reasons. With electron beam technology either in vacuum and at atmosphere one has a powerful and flexible tool for thermal joining of materials combination. So techniques and processes are feasible for joining materials combination, which are hardly weldable from metallurgical point of view. Depending on the properties of the materials several joining strategies for each combination are applicable. Strategies include joining by melting only one material, use of filler material, joining by melting both materials with high joining speed and solid state joining by diffusion at elevated

temperatures. By this formation of brittle intermetallic phases which often lead to ductile dip cracking can be reduced to an uncritical quantity concerning the strength.

This project verifies applicable strategies for different combination and their implementation with electron beam technology.

Elektronenstrahlschweißen im Vakuum

Grundlagen des Elektronenstrahlschweißens

Zur Elektronenstrahlerzeugung wird in der Regel ein Triodensystem, bestehend aus Kathode, Anode und Steuerelektrode, das sich im Strahlerzeuger befindet, eingesetzt. Im Strahlerzeuger ist dazu ein Hochvakuum erforderlich. Die zur Erzeugung des Elektronenstrahls erforderlichen Elektronen werden mittels thermischer Emission aus der Wolframkathode herausgelöst, so dass sich eine Elektronenwolke aus freien Elektronen vor der Kathode bildet. Durch Anlegen eines Hochspannungsfeldes zwischen Kathode und der gegenüber angeordneten Lochanode werden die Elektronen beschleunigt. Die Steuerelektrode dient zur präzisen Steuerung des Strahlstromes bei anliegender Beschleunigungsspannung. Nach dem Passieren der Lochanode haben die Elektronen ihre Endgeschwindigkeit erreicht, und der Elektronenstrahl kann mittels elektromagnetischer Linsen berührungslos justiert, fokussiert und abgelenkt werden. Diese Ablenkung ermöglicht die Anwendung der sog. Parallelkapillartechnik. Dabei kann durch ein sehr schnelles Ablenken des Strahles zwischen zwei oder mehreren unterschiedlichen Positionen ein Anschmelzen des Werkstoffs zwischen den Positionen vermieden werden. Wird dabei eine ausreichend hohe Ablenkfrequenz gewählt, können gleichzeitig mehrere Dampfkapillaren offen gehalten werden. Bedingung dafür ist die Rückkehr des Strahles zu den einzelnen Haltepositionen, bevor sich die Kapillare wieder schließt. Für die zeitliche Verzögerung des Schließens der Kapillare ist die mechanische Trägheit des Werkstoffs verantwortlich. Mit Hilfe dieser Technik lassen sich verschiedene Strategien zum thermischen Fügen von verschiedenen Werkstoffkombinationen realisieren.

Elektronenstrahlschweißen von Werkstoffkombinationen am Beispiel Stahl/Aluminium

Die Qualität der mittels Zweikapillartechnik erstellten I-Stoß-Verbindungen zwischen verzinkten Stahlblechen und Aluminiumblechen der Legierung AW-5083 ist in entscheidendem Maße von einer möglichst präzisen Trennung der Kapillaren abhängig. Allein durch die Trennung kann gewährleistet werden, dass nur der niedrig schmelzende Aluminiumwerkstoff an der Fügekante aufgeschmolzen wird. Durch eine gute Spanntechnik und eine geeignete Fügegeschwindigkeit wird die Zinkschicht des Stahls im Bereich der Fügestelle durch das schmelzflüssige Aluminium angeschmolzen, aber nicht verdampft und trägt so zur adhäsiven Anbindung der Fügepartner bei. Die stahlseitige Kapillare erzeugt ein Wärmefeld, das zur Aufbringung von Druckkräften an der Fügestelle beiträgt. Die Strahlmodulationsfigur beeinflusst die geometrische Ausbildung der Nahtoberseite. Eine aluminiumseitige Kreismodulation und eine stahlseitige Linienmodulation, die mittig an der Fügestelle einen Abstand von 0,5 mm voneinander aufweisen, führen zu den besten Verbindungsergebnissen. Hinsichtlich der Modulationsbreite der Zweikapillartechnik liegt ein günstiger Kompromiss zwischen einer geringen oberflächlichen Durchmischung der Fügepartner und einer ausreichenden thermischen Beeinflussung an der Fügekante bei ca. 4 mm. In Abhängigkeit von der Modulationsfigur erweist sich eine Streckenenergie von ca. 20 J/mm bei einer Leistungsverteilung von 50 % : 50 % als optimal für diese Verbindung. Bei Zugversuchen von geometrisch gut ausgebildeten Stumpfstoß-Verbindungen aus unverzinktem Stahl und Aluminium konnten Zugfestigkeiten von bis 72 N/mm² erreicht werden, Bild 1.

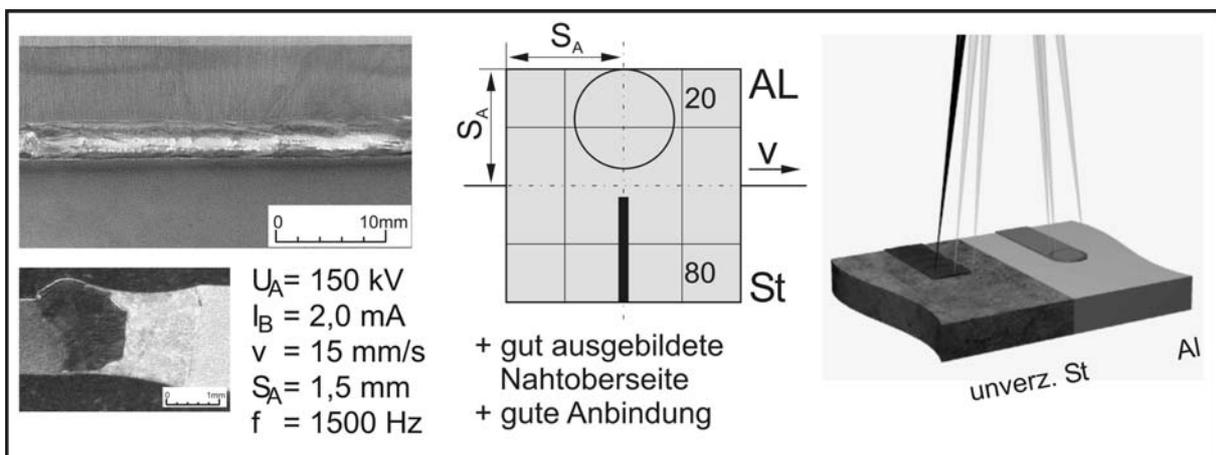


Bild 1: Nahtoberseite, Schliffbild und Strahlmodulation einer I-Stoß-Verbindung der Kombinationen Stahl/Aluminium

Bei den Überlappstoß-Verbindungen dieser Werkstoffpaarung wurde das Aluminiumblech überlappend auf dem verzinkten Stahlblech positioniert. Bei diesen Verbindungen war der Einfluss der Fügegeschwindigkeiten auf die Nahtqualität dominant. Geschwindigkeiten zwischen 3,5 mm/s und 4 mm/s führten zu hohen Nahtqualitäten mit einer gleichmäßigen Anbindung des Aluminiumwerkstoffs an den Stahlfügepartner. Im Gegensatz zu den I-Stoß-Verbindungen war der Einfluss der Strahlmodulation aufgrund der durchgehenden Aluminiumschmelze im Strahlmodulationsbereich von untergeordneter Bedeutung. Die Verbindungen aus verzinktem Stahlblech mit Aluminium im Überlappstoß wiesen Zugfestigkeiten bis zu 155 N/mm^2 auf, Bild 2.

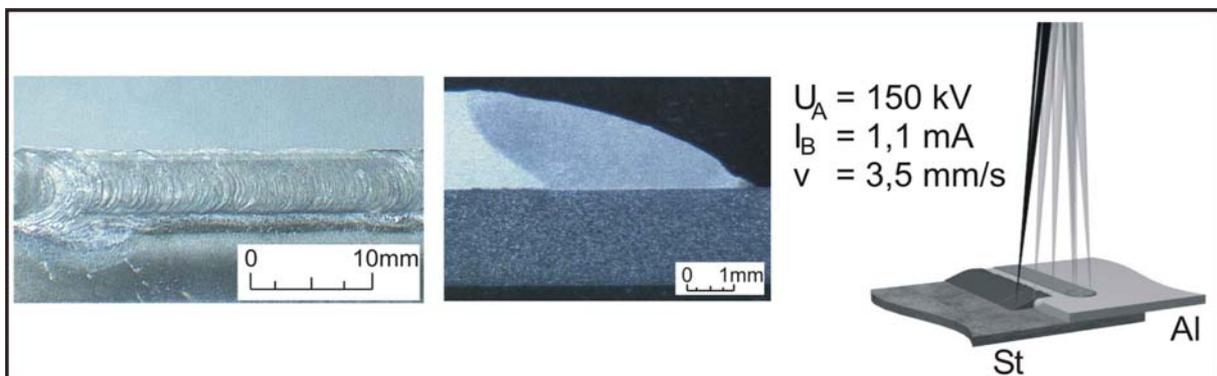


Bild 2: Nahtoberseite, Schliffbild und Strahlmodulation einer Überlappverbindung der Kombinationen verzinkter Stahl/Aluminium

Der sich bei diesen Parametern bildende intermetallische Phasensaum weist eine maximale Dicke von ca. $3,5 \mu\text{m}$ auf, Bild 3.

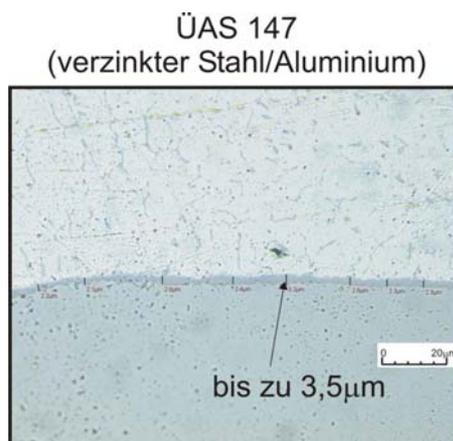


Bild 3: Schichtdicken der sich bildenden intermetallischen Phase bei den verzinkter Stahl/Aluminium-Verbindungen

Werkstoffkombination Stahl/Molybdän

Bei der Werkstoffkombination Stahl/Molybdän erwiesen sich Fügegeschwindigkeiten von 30 mm/s bei einer Strahlleistungsverteilung von stahlseitig 60 % und molybdänseitig 40 % sowie einer der Zweikapillartechnik überlagerten linienförmigen Strahlmodulation als besonders günstig. So konnten Verbindungen erzielt werden, deren mechanisch-technologische Eigenschaften im Zugversuch 80 % der Eigenschaften des Stahlgrundwerkstoffs erlangten. Die Nahtqualität bei der Kombination der Werkstoffe Stahl und Molybdän wird ganz wesentlich von der Fügegeschwindigkeit, der Größe des aufgeschmolzenen Nahtvolumens sowie der Strahlmanipulation bestimmt.

Die o.a. Leistungsverteilung ist durch die wesentlich höhere Schmelztemperatur des Molybdäns gegenüber der des Stahls und durch die große Wärmeleitfähigkeit des Molybdäns in Verbindung mit der geforderten Kapillarausbildung zu erklären. Die dabei reduzierte Wärmeeinbringung und eine optimierte Strahlmodulation führen zu einer molybdänseitigen Schweißkapillare, die innere Druckspannungen im Bereich der Fügestelle aufbaut. Die Druckspannungen und die hohe Temperatur unterstützen die gezielte Diffusion an der Fügekante, ohne dass es zu einem erheblichen schmelzflüssigen Volumenaustausch zwischen den Werkstoffen kommt. Strahlmodulationen der Mehrkapillartechnik im Bereich von 1,5 mm ohne überlagerte Modulation oder mit überlagerten linienförmiger Quermodulation zeigten die besten Ergebnisse, Bild 4.

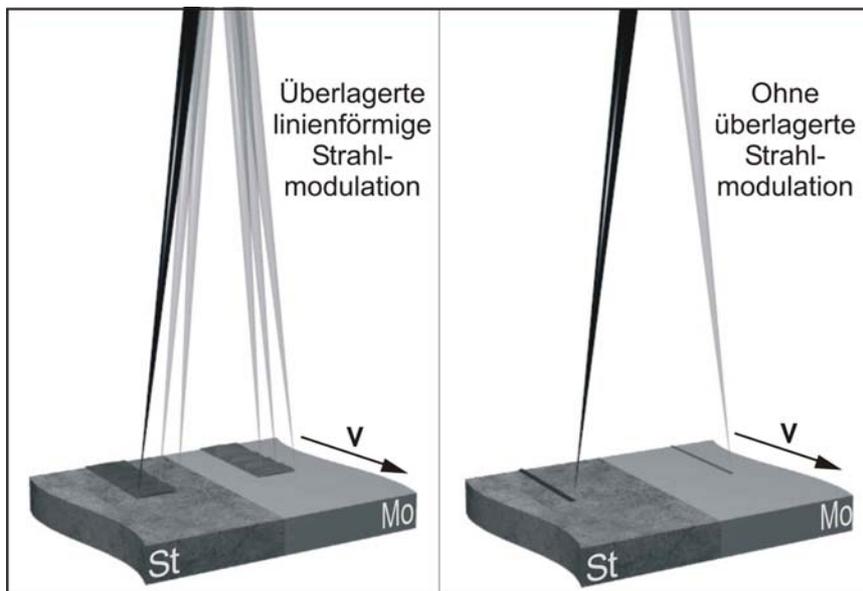


Bild 4: Günstigste Strahlmodulationsvarianten bei der Fügeverbindung Stahl/Molybdän

Werkstoffkombination Stahl/Wolfram

Bei den Stahl/Wolfram-Verbindungen zeigten sich erhebliche Unterschiede in der Verbindungsqualität in Abhängigkeit von der Fügegeschwindigkeit. Die besten Ergebnisse sind mit Vorschubgeschwindigkeiten von 10 mm/s und 20 mm/s erzielt worden. Geschwindigkeiten oberhalb von 20 mm/s führten zu einem verstärkt unruhigen Prozess, so dass es zu Lochbildungen und fehlender Anbindung zwischen den Fügepartnern kam. Höhere Fügegeschwindigkeiten können bei gleicher Modulationsfrequenz dazu führen, dass der Elektronenstrahl nicht mehr ausreichend präzise in die jeweilige Kapillare zurückkehrt. Für eine zuverlässige Verbindung dieser Werkstoffe ist es erforderlich, dass der Wolframwerkstoff an der Fugekante weitgehend im festen Zustand verbleibt, während sich der Stahlwerkstoff im schmelzflüssigen Zustand adhäsiv anbindet. Dazu war bei den eingesetzten Strahlablenkfrequenzen eine Ablenkamplitude von 2 mm zwischen den Kapillaren in Verbindung mit einer darauf abgestimmten Streckenenergie erforderlich. Darüber hinaus führte eine kreisförmige Ablenkung mit einem jeweiligen Durchmesser von 0,4 mm zu den besten Verbindungen (Bild 5).

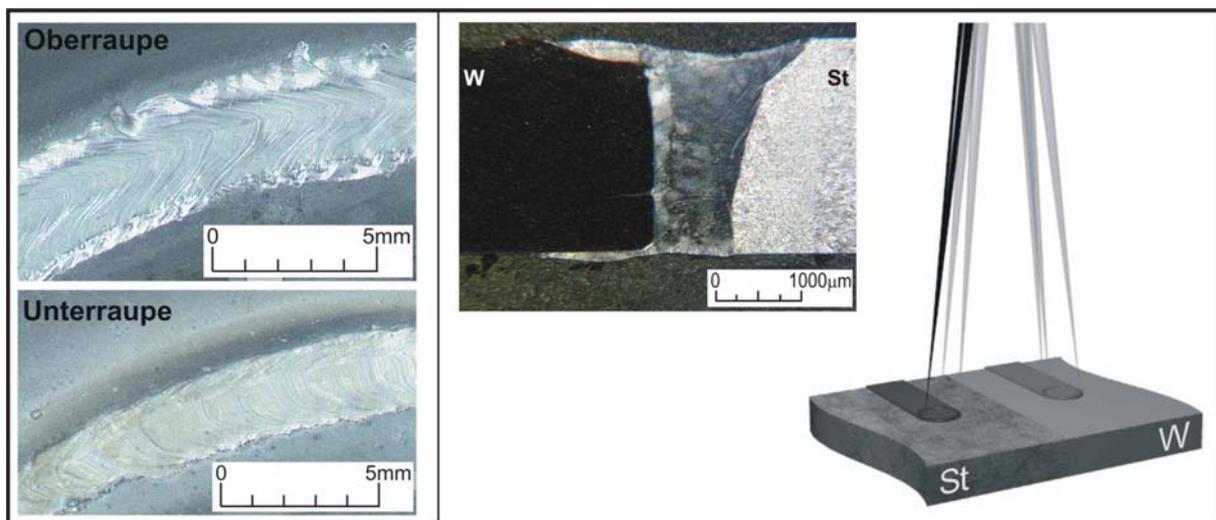


Bild 5: Nahtober- und unterseite, Schliffbild und Strahlmodulation einer Stahl/Wolfram-Verbindung

Beim Einsatz von Kupferzwischenlagen konnte eine sehr gute lötähnliche Verbindung erzielt werden. Dazu wurde eine der Zweikapillartechnik wolframseitige überlagerte Linienmodulation und eine mittig angeordnete Kreismodulation eingesetzt. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Kupfers Verbindung mit der vergleichsweise hohen Wärmeleitfähigkeit des Wolframs erwies sich eine Leistungsverteilung von 80 % wolframseitig und 20 % mittig bei einer Streckenenergie von 280 J/mm als optimal.

Bei diesen Parametern stellte sich eine Verbindung ein, die im Wesentlichen wie eine Lötverbindung ausgebildet war, bei der die beiden Fügepartner Stahl und Wolfram nur sehr oberflächennah angeschmolzen worden sind.

Literatur

- [1] Schultz, H.
Elektronenstrahlschweißen
Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 93
DVS-Verlag, Düsseldorf 2000
- [2] v. Dobeneck, D.
Elektronenstrahlschweißen - Das Verfahren und seine industrielle
Anwendung für höchste Produktivität
Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech 2001
- [3] Dilthey, U.
Schweißtechnische Fertigungsverfahren, Band 2
Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen
3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 2004
- [4] Pohle, C.
Schweißen von Werkstoffkombinationen
Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 140
DVS-Verlag, Düsseldorf 1999
- [5] Sun, Z., Karppi, R.
Electron beam welding of dissimilar metals
VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1544
VTT Offsetpaino, Espoo/ Finnland, 1994
- [6] Crane, C.J.
Diffusion welding of dissimilar metals
Welding Journal 46 (1967), H. 3
- [7] Dupak, J., Michalicka, P., Ustohal, V., Kuchynka, R.
Electron Beam Welding of Stainless Steel with Tungsten, Tantalum
and Molybdenum
Electron Beam Technologies, Varna/ Bulgarien 2003
- [8] Tasak, E., Stankiewicz, M., Gierlicki, R., Ziewiec, K.
Properties of joints welded in dissimilar materials
Welding International 17 (2003), H. 4, S. 293-297
- [9] Maruyama, T.
Arc welding technology for dissimilar joints
Welding International 17 (2003), H. 4, S. 276-281
- [10] Woeste, K.
Elektronenstrahlschweißen von metallischen Werkstoffkombinationen
Dissertation, RWTH Aachen, 2005

Anwendungsbeispiele für das Diffusionsschweißen von Stahl- und Titanwerkstoffen

Dipl.-Ing. W. Beck, Dipl.-Ing. H. Lajain, Formtech GmbH, Weyhe

Abstract

Das Diffusionsschweißverfahren (DB=Diffusion Bonding) ermöglicht die flächige Verbindung von metallischen Werkstücken. Durch Festkörperdiffusion der beteiligten Metalloberflächen ergibt sich ein durchgehendes Werkstoffgefüge. Ein Festigkeitsverlust durch metallurgische Kerben wie beim Schmelzschweißen oder durch weichere Zwischenschichten wie beim Löten ist nicht zu beobachten. Die Festkörperdiffusion wird initiiert durch hohe Prozesstemperaturen, ~0,5 x Schmelztemperatur, geeignete Anpressdrücke und Haltezeiten. Die hohe Temperatur begünstigt die Beweglichkeit der Atome und bewirkt die Beschleunigung des Diffusionsvorganges. Der DB-Prozess ist anwendbar auf eine Reihe von metallischen oder keramischen Werkstoffen. Im Rahmen des Vortrages wird über die Erfahrungen mit Stahl- und Titanwerkstoffen berichtet. Die bekannten Applikationen beinhalten die Verwendung von Stangen, Platten, Blechen und Folien. Die erfolgreichen Anwendungen des DB Verfahren beruhen insgesamt auf der Tatsache, dass es möglich ist, Geometrien und Funktionalitäten zu verwirklichen, die mit alternativen Techniken in gleicher Produktleistungsfähigkeit nicht erreichbar sind.

Beispielsweise ist es bei der Verwendung von Plattenmaterial möglich, interne Kanalsysteme in einer solchen Anordnung herzustellen, z.B. spiralförmig in einem per DB verbundenen, massiven Block, die durch die Zerspanung durch z.B. Bohren von außen unmöglich ist. Die durch DB realisierte, funktionsgerechte und z.B. thermisch angepasste Anordnung der Kanäle bewirkt einen besseren Wirkungsgrad derartiger Komponente, die z.B. als Kühl- oder Heizelemente eingesetzt werden.

Bleche und Folien können als so genannte „Multilayergebilde“ per DB zu einem integren Block gefügt werden. Die Oberflächen der einzelnen Bleche sind in einer solchen Weise strukturiert, dass sich interne, sehr komplexe Kanalsysteme ergeben. Es ist damit möglich hocheffiziente Wärmetauscher und Reaktoren zu konstruieren. Durch den Einsatz der geeigneten Stahl-, Nickel-, oder Titanlegierungen können diese DB-Elemente auch von sehr korrosiven Medien durchströmt werden.

Im Flugzeug- und Turbinenbau hat sich eine weitere Variante der DB-Anwendung etabliert. In Kombination mit dem Superplastischen Umformverfahren (SPF), werden mit dem SPF/DB Verfahren aus dünnen Blechen integralversteifte Sandwichgebilde erzeugt. Diese zumeist aus Titanlegierungen bestehenden Bauteile zeichnen sich durch einen hohen

Komplexitätsgrad aus. Es ist Stand der Technik, die stark gekrümmten Lufteintrittsschaufeln (Wide Chord Fan Blades) mit dem SPF/DB Verfahren herzustellen. Es werden signifikante Kosten- und Gewichtseinsparungen in der Fertigung und dem Einsatz dieser hoch beanspruchten Komponenten erzielt. Bei der Entwicklung von Bauweisen für eine laminarisierte Flügelströmung und von hochtemperaturbelastbaren Panels im Triebwerksbereich und für Hochgeschwindigkeitsflugkörper sind Sandwichstrukturen aus Titanlegierung unverzichtbar.

Das DB Verfahren hat mit einigen Pilotprojekten einen industriellen Stand erreicht, der die reproduzierbare Fertigung von großen Stückzahlen gestattet.

FormTech Activities



ACTIVITIES	PRODUCTS	BRANCHES
<ul style="list-style-type: none"> Key technology: SPF*, SPF/DB, DB** (hot) Sheet metal forming (cold) 	<ul style="list-style-type: none"> R & D <ul style="list-style-type: none"> Bilateral Partner in EC FP's Feasibility Prototyping Production Test facility for SPF-properties 	<ul style="list-style-type: none"> Aircraft Aerospace Engines Automotive Medical General Ind.
<ul style="list-style-type: none"> Agency for: SP - Optimisation of ind. processes - Virtual production SNC - Supply chain in Turkey - Qualification for aerospace - Offset organisation in Turkey ACB - Presses for aerospace IMSP - R&D for SPF Materials 		

* SPF = Super Plastic Forming, ** DB = Diffusion Bonding

2

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

FormTech Processes

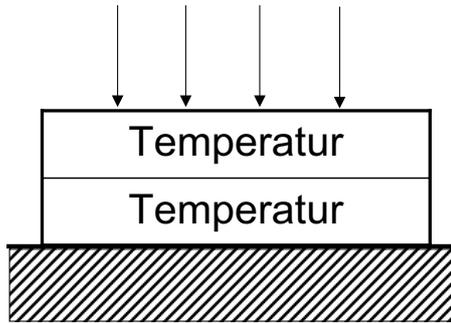


- Sheet metal forming
 - Deep drawing
 - Hot calibration
 - Hot deep drawing
 - Gas pressure forming
 - Superplastic forming
- Diffusion bonding of heavy sections**
- Sandwich structures
 - Superplastic forming/**Diffusion bonding**
 - Superplastic forming/Friction stir welding
 - Superplastic forming/Laserbeam welding

3

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

DB von Metallen



$$dm = Dc/x/Adt$$

dm = Masse an Material transportiert über die Oberfläche

D = Diffusionskoeffizient

c/x = Koeffizient für den Konzentrationsunterschied in Abhängigkeit des Weges

A = Oberfläche

dt = Zeitintervall

Festkörperdiffusion über Grenzflächen hinweg bei geeigneten Temperaturen, Drücken und Haltezeiten

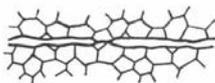
4

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

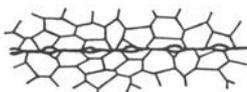
DB Prinzip



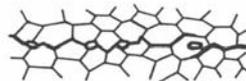
Kontakt



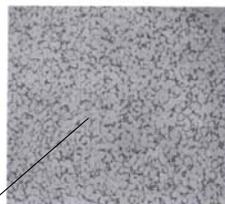
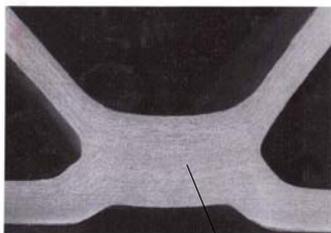
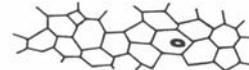
Verformung



Anfang der Diffusion



Volumen Diffusion



DB-Fügestelle

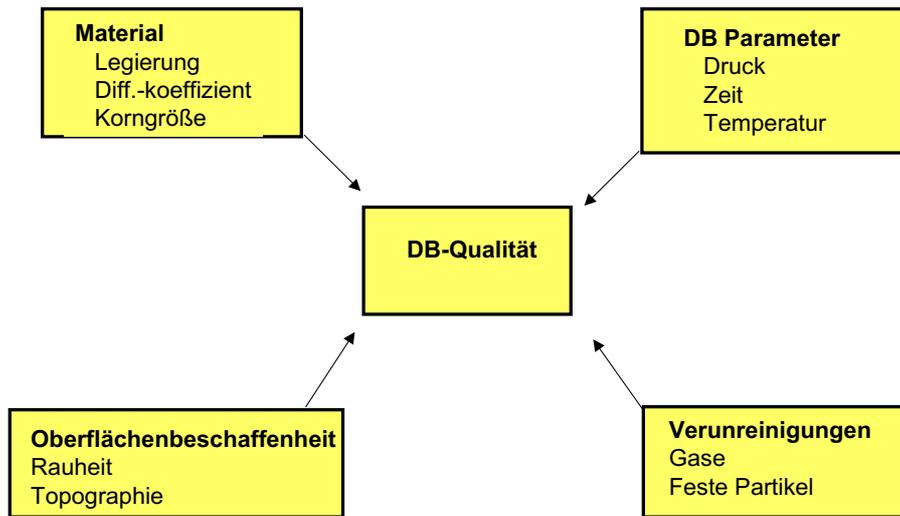
- DB anwendbar für Werkstoff wie Ti, Stahl, Cu, Keramik etc.
- Typische Prozeßparameter für Ti: $t_{DB} \sim 2h$, $p_{DB} \cong 30 \text{ bar}$, $T_{DB} \cong 920^\circ\text{C}$
- Trennmittel verhindert DB wo notwendig
- Trennmittelauftrag mit Siebdruckverfahren

- Festigkeit der Fügestelle identisch zu Grundwerkstoff

1

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

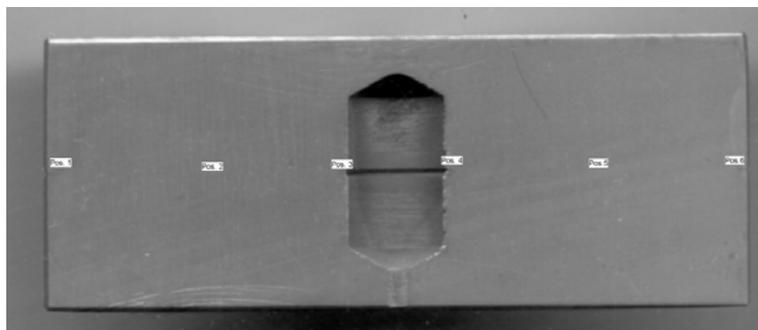
Einflußgrößen DB-Prozeß



2

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

Testbauteil

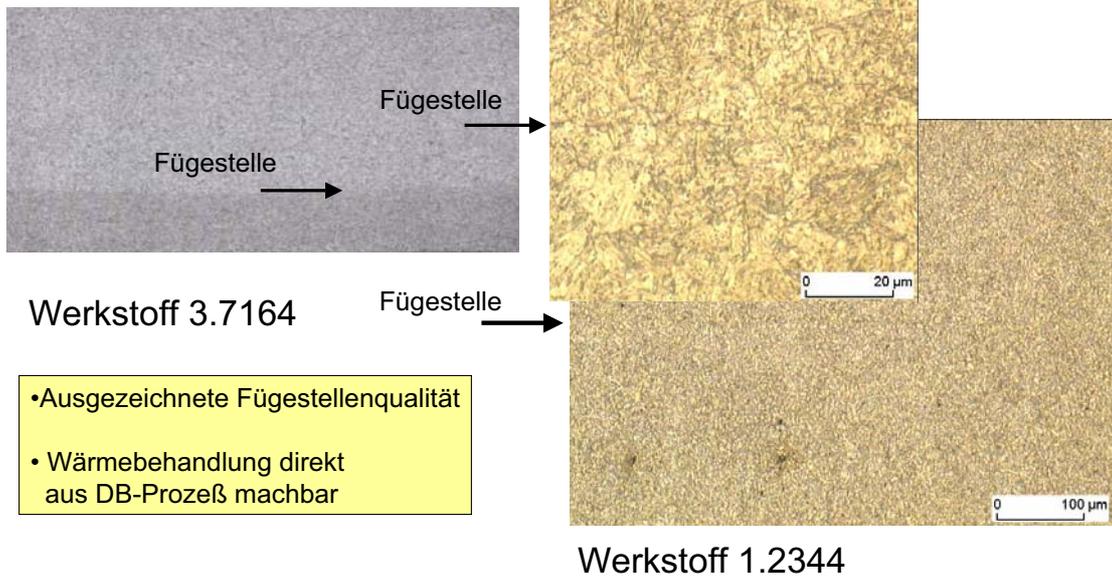


- Werkstoff 1.2344
- Bohrung zur Prüfung interne DB-Güte unter der Wirkung von Restgas

3

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

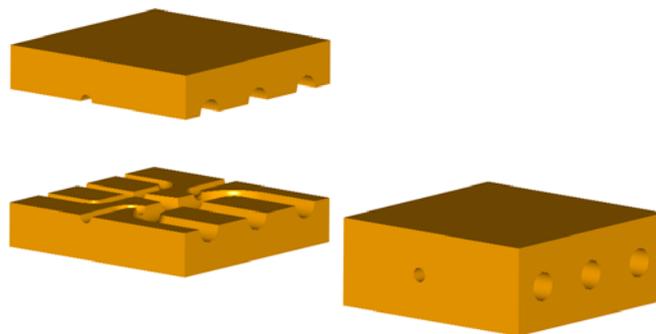
Metallographie



4

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

DB von Platten mit integriertem Kanalsystem



Erster Schritt: Vorbereitung der Oberflächen
Zweiter Schritt: DB-Prozeß

- Herstellung von Elementen mit hocheffektivem, integriertem Kanalsystem
- Identische Innenstrukturen sind durch direkte Zerspannung aus massiver Platte nicht möglich

1

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

Beispielbauteile DB



Verteiler
Spiralförmige Innenstruktur



Makro-Wärmetauscher
Kanalstruktur aus Folienblechen



2

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

Beispielbauteil Siebstruktur



1169d Makro 01.tif 25:1

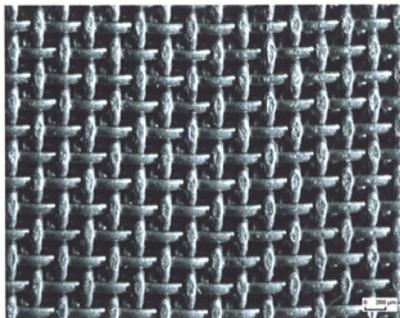


Bild 3: Makroaufnahme der Oberseite

Werkstoff: 1.4301

1169 Pr. 2-3 LM 23.tif 200:1

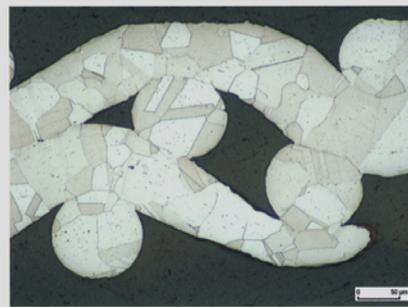
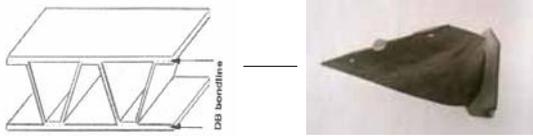


Bild 7

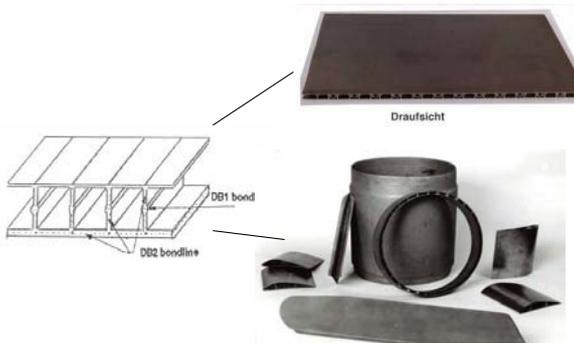
3

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

SPF/DB* Sandwich Design (1)



Hollow blades for fans and compressors
 ⇒ *Weight reduction*



Integrally stiffened sandwich fuselage panel
SST, Sänger
 ⇒ *Weight reduction*
 ⇒ *Performance optimisation*
 ⇒ *Alternative process: SPF/LBW*

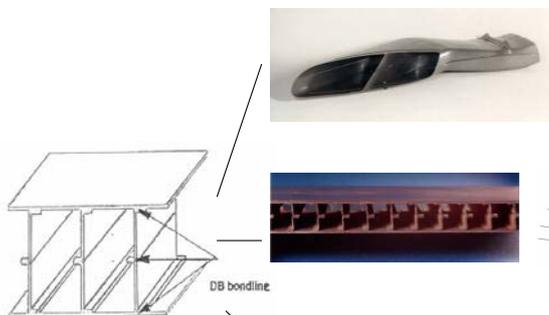
Integrally stiffened skin structure
 for tubes, vanes, wings

*SPF/DB = Super Plastic Forming / Diffusion Bonding

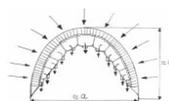
4

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

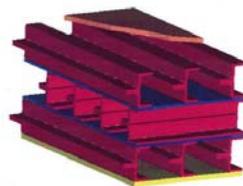
SPF/DB Sandwich Design (2)



Cooler outlet duct
 ⇒ *Cost reduction*
 ⇒ *Weight reduction*



Laminar Flow Control Panel
RaWid**
 ⇒ *Integration of different functions*



Multi-layer sandwich for Heat exchanger

1

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

Titan SPF/DB, Schliffaufnahmen



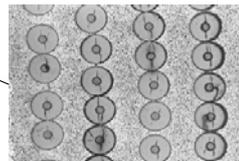
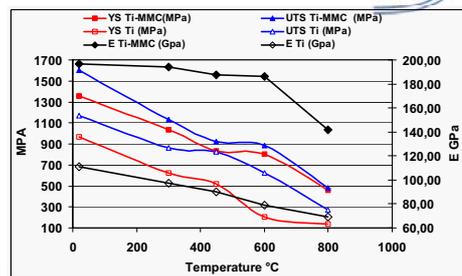
			<ul style="list-style-type: none"> • Drei-Blech Sandwich • Blechdickenverhältnis 3:1 • Optimal Übergangszone
			<ul style="list-style-type: none"> • Vier-Blech Sandwich • Fügezonbreite < 1 mm • Blechdickenverhältnis 1:1 • Typische Fügestellenfehler

- Fügestellenqualität überragend
- Reproduzierbarer Prozeß

2

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

SPF/DB of Ti-based Metal-Matrix Composites



- MMC have higher Young's modulus
- MMC can create textured strength properties

3

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.

Zusammenfassung



- DB Prozess anwendbar für eine Vielzahl von metallischen Legierungen
- Sowohl gleichartige Werkstoffe als auch unterschiedliche Werkstoffe ffügbar
- Kontinuierliche Werkstoffstruktur – keine metallurgische Kerbe in der Fügezone
- Flächige oder linienförmige Fügegeometrie möglich
- Materialdicken von dünn bis dick verarbeitbar. Jede Blechdickenkombination möglich
- Kombination SPF und DB für fortschrittliche Leichtbau-Sandwichstrukturen
- Interne Geometrien in Vollmaterial möglich, z.B. für Wärmetauscher

4

The information contained herein is proprietary to FT and shall not be reproduced in whole or part or used for any purpose except when such user processes direct written authorisation from FT.