

# Reibauftragschweißen von NiAl-Bronze – Verfahren und Materialeigenschaften unter Kavitation

Hanke, S. (1); Fischer, A. (1); Beyer, M. (2); dos Santos, J. (2)

**Reibauftragschweißen ist ein Festphase-Fügeprozess, bei dem durch niedrige Schweißtemperatur und hohen Verformungsgrad des Auftragwerkstoffes sehr gute mechanische Eigenschaften der Schicht und des Substrates erzielt werden können. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden artgleiche Reibauftragschweißungen einer NiAl-Bronze an Luft sowie unter Wasser angefertigt. Mikrostruktur und Beständigkeit gegen Kavitationsbeanspruchung des Grundwerkstoffes im warmgewalzten Zustand, sowie der aufgeschweißten Schichten wurden untersucht und verglichen. Das Gefüge der Schicht ist feinkörnig und homogener als das des Ausgangswerkstoffes. Die Anbindung der Schweißlagen war bei allen Proben frei von Defekten. Im Kavitationstest zeigten die reibauftraggeschweißten Schichten eine längere Inkubationsphase und hatten nach 400 min Beanspruchungsdauer im Schnitt um drei Viertel weniger Gewicht pro beanspruchter Fläche verloren, als das Substrat.**

## Einleitung

### Reibauftragschweißen

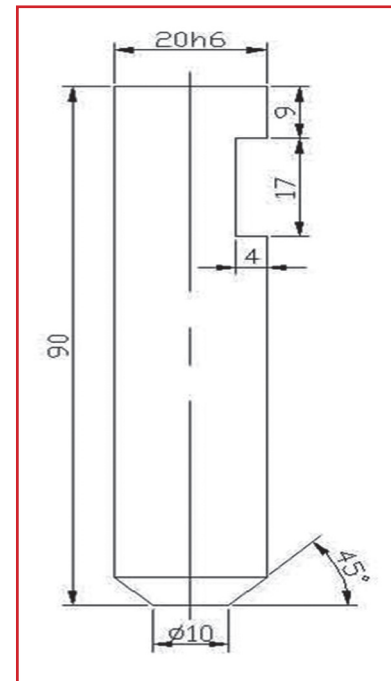
Reibauftragschweißen ist ein Festphase-Fügeprozess, bei dem ein rotierender Bolzen unter Aufbringung einer Axialkraft auf einem Substratwerkstoff aufgesetzt wird. Durch die entstehende Reibwärme wird das Bolzenmaterial plastifiziert und im Zuge einer translatorischen Bewegung auf das Substrat übertragen. Es gilt hierbei, durch die Wahl geeigneter Parameter (u.a. Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Axialkraft) und evtl. zusätzlicher Maßnahmen zur Beeinflussung des Wärmehaushalts (Sprühkühlung, Luft- bzw. Unterwasserschweißung) von Bolzen und Substrat, die Dicke der Schicht, die Ausbringung sowie die Qualität der Haftung einzustellen [1] [2].

Als Festphase-Fügeprozess - ohne Aufschmelzen des Auftragwerkstoffes - [3], weist das Reibauftragschweißen einige entscheidende Vorteile auf. So können z.B. als nicht schmelzschweißgeeignet geltende Werkstoffpaarungen gefügt werden [4] und durch das im Vergleich zum Ausgangswerkstoff deutlich feinkörnigere und homogenere Gefüge der Auftragung ergeben sich oft bessere mechanische Eigenschaften als im Ausgangsmaterial [5] [6].

Beschichtungen von großen Flächen oder dickere Auftragungen können durch die Aufbringung mehrerer Lagen über- bzw. nebeneinander realisiert werden. Eine spezielle Vorbereitung ist dazu im Allgemeinen nicht notwendig [7] [8].

### Gefüge und Eigenschaften von Nickel-Aluminium Bronze

Nickel-Aluminium Bronzen (NAB) sind als Werkstoffe für Schiffspropeller sowie Pumpenläufer weit verbreitet. Sie zeichnen sich besonders durch eine gute Festigkeit und hervorragende Beständigkeit gegen Kavitationserosion und Korrosion in Seewasser aus [9]. Durch einen Gewichtsanteil von bis zu 11% Aluminium, in Verbindung mit einem Gehalt von einigen Prozent Ni und Fe, können NAB ähnlich wie Stahl wärmebehandelt werden. Durch Lösungsglühen und nachfolgendes Abschrecken kann eine martensitische Umwandlung der  $\beta$ -Phase bewirkt werden, welche durch Anlassen weiter modifiziert werden kann [9]. Größere Bauteile aus NAB werden in der Regel gegossen, was ein komplexes, mehrphasiges und inhomogenes Gefüge zur Folge hat, bestehend aus einer kupferreichen  $\alpha$ -Phase, der  $\beta$ -Phase, und verschiedenen Ausscheidungen



**Bild 1: Bolzengeometrie**

( $\kappa_I$  bis  $\kappa_{IV}$ ) welche einen erhöhten Gehalt an Eisen und / oder Nickel aufweisen [10].

Die thermische Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften durch eine Wärmebehandlung der Oberflächen mittels Laser-, Induktions- oder Flamhärten wurde in [11] [12] [13] untersucht. Es wurde in allen Fällen eine Steigerung der Beständigkeit gegen Kavitationserosion beobachtet, was zum einen auf eine höhere Härte zurückgeführt wurde, zum anderen auf die erzielte Homogenisierung des Gefüges [12] [14].

Eine Methode zur mechanischen Behandlung der oberflächennahen Bereiche nach dem Gießen ist das Friction Stir Processing. Bei diesem mit dem Rührreibschweißen verwandten Verfahren wird durch eine thermomechanische Behandlung („Verrühren“) die Werkstoffoberfläche in einer Tiefe von bis zu 6 mm homogenisiert, und Porositäten werden geschlossen [15] [16]. Die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Zugfestigkeit,

Cu	Al	Fe	Ni	Mn	Si	P, Pb, Zn, Sn
81,60	10,10	4,01	3,78	0,30	0,16	

**Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des Substratwerkstoffes**

Cu	Al	Fe	Ni	Mn	Si	P, Pb, Zn, Sn
80,90	10,20	4,60	3,77	0,27	0,17	

**Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung des Bolzenwerkstoffes**

sind denen des gegossenen Zustands überlegen [17].

Die oben beschriebenen Verfahren dienen jedoch nur der Randschichtbeeinflussung und nicht der Beschichtung. Das Schmelzauftragschweißen von NAB mit den üblichen Verfahren kann hierfür eingesetzt werden. Dabei werden mechanische Eigenschaften des aufgetragenen Werkstoffes und der Wärmeeinflusszone nahe denen des Grundwerkstoffes erreicht [18] [19]. Dafür sind jedoch, wie bei Schmelzschweißverfahren üblich, zusätzliche Maßnahmen wie Nachbehandlung und zerstörungsfreie Prüfung erforderlich, da z.B. Eigenspannungen oder Schweißfehler die mechanischen Eigenschaften erheblich verschlechtern können [18] [19].

Das Reibauftragschweißen bietet die Möglichkeit, Material aufzutragen, wobei ein ähnlich feines und homogenes Gefüge wie beim Friction Stir Processing erzeugt wird, ohne die beim Schmelzauftragschweißen durch die flüssige Phase bedingten Nachteile.

In der vorliegenden Veröffentlichung werden der Prozess des Reibauftragschweißens und die damit erzielte Mikrostruktur vorgestellt. Die Beständigkeit der reibauftrageschweißten Schichten gegen Kavitationserosion wurde mittels eines Ultraschall-Kavitationstests untersucht und mit der des Grundwerkstoffes im warmgewalzten Zustand verglichen.

## Materialien und Experimentelle Methoden

### Parameterentwicklung für das Reibauftragschweißen

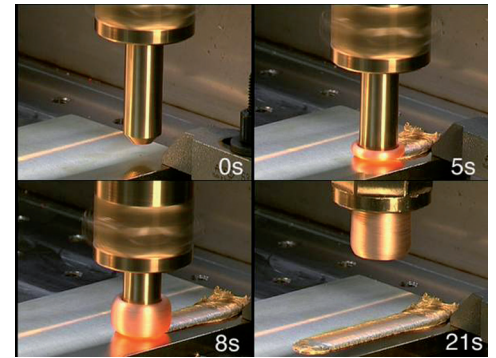
Für die Durchführung der Schweißungen wurden eine Portalschweißanlage

und ein für Unterswasserschweißungen geeigneter Schweißkopf eingesetzt. Für Unterswasserschweißungen wurde eine Wanne in die Maschine integriert, in der das Substrat gespannt werden kann.

Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Materialien für Substrat und Auftragwerkstoff (Bolzen) können Tabelle 1 und 2 entnommen werden.

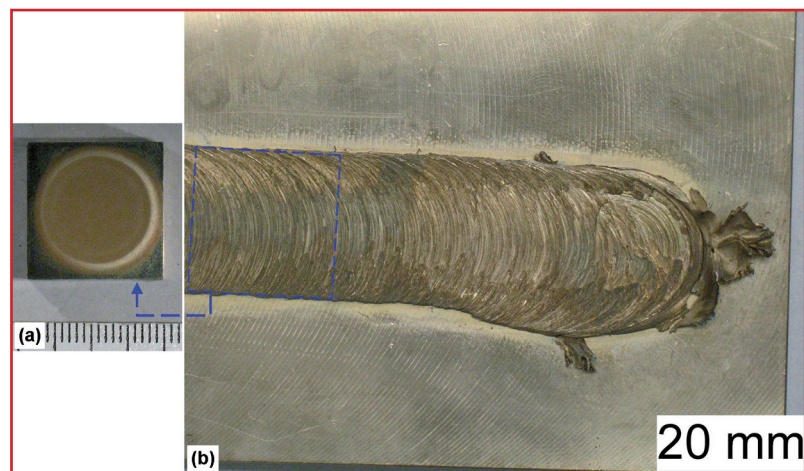
Das Substrat lag in Form von warmgewalzten Platten der Abmessungen 300x100x10 mm vor. Die verwendeten Bolzen hatten einen Durchmesser von 20 mm; ihre Geometrie ist in Bild 1 dargestellt.

Der Prozess des Reibauftragschweißens kann in zwei Phasen unterteilt werden. In der Vorwärmphase wird der rotierende Bolzen auf das Substrat gepresst. Hierbei wird er durch die Reibung erwärmt, die Festigkeit nimmt ab und das auf ihn wirkende Drehmoment bewirkt die beginnende plastische Deformation. Die in Bild 1 erkennbare 45° Phase bewirkt eine kleinere Kontaktfläche zu Beginn des Prozesses, was den Druck lokal erhöht, und das erforderliche Drehmoment senkt. Dieses wäre bei homogenem Querschnitt um ein Vielfaches höher, als beim eigentlichen Schweißprozess, wie für Reibschweißverfahren typisch. Dadurch werden die Prozessreaktionskräfte verringert sowie die Spanntechnik und die Schweißanlage selbst geringer belastet. In der Schweißphase setzt die translatorische Bewegung des rotierenden Bolzens ein. Es stellt sich

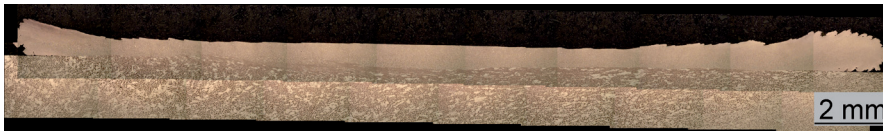


**Bild 2: Darstellung verschiedener Stadien des Prozesses. 0s: rotierender Bolzen kurz vor dem Aufsetzen. 5 s, 8 s: Ablagerung des Bolzenmaterials durch translatorische Bewegung. Entstehung und Anwachsen eines Wulstes am Bolzenumfang sind erkennbar. 21 s: Die Auftragschweißung ist beendet. Die Wulstbildung ist einer der begrenzenden Faktoren für die Ausbringung.**

ein quasistationärer thermischer Zustand ein. Translationsgeschwindigkeit, Rotationsgeschwindigkeit und Axialkraft bestimmen die geometrischen Dimensionen und die Qualität der Auftraglage. Ist die gewünschte Länge erreicht, werden die translatorische und rotatorische Bewegung angehalten, während die Normalkraft weiterhin wirkt, um eine gute Anbindung des Endes der Auftraglage an das Substrat sicherzustellen (Bild 2). Aufgrund der Einfachheit dieses von mechanischen Kenngrößen bestimmten Prozesses ist das Reibauftragschweißen weitgehend unabhängig von den Umgebungsbedingungen.



**Bild 3: (a) Probe nach 410 min Kavitationsbeanspruchung, (b) Draufsicht auf eine einlagige Reibauftragschweißung. Das eingezeichnete Quadrat markiert den Bereich, welcher als Probe für den Kavitationstest entnommen wurde.**



**Bild 4: Querschliff einer Unterwasserschweißung mit den typischen Unterscheidungen an beiden Seiten**

Zur Auftragschweißvorbereitung wurde die Oberfläche des Substrates mit 120er Schleifpapier geschliffen und anschließend mit Aceton gereinigt. Die Auftragungen wurden mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,3 m/min, einem mittleren Anpressdruck von 1,86 MPa und einer Rotationsgeschwindigkeit zwischen 3.000 und 4000 min<sup>-1</sup> durchgeführt.

**Kavitationstests**

Es wurden aus einlagig reibauftraggeschweißten Platten und aus dem Grundmaterial rechteckige Proben mit den Abmessungen 20 x 20 mm entnommen (Bild 3) und untersucht. Die Dicke der Platten beträgt ca. 10 mm. Die Oberflächen aller Proben wurden mit 800er Schleifpapier plan geschliffen und anschließend mit einer Diamantsuspension bei einer Körnung von 3 µm poliert.

Kavitationstests wurden an einem Prüfstand in Anlehnung an ASTM G 32 – 03 durchgeführt. Hierbei wird eine Sonotrode mittels Ultraschall zur Schwingung angeregt. Diese verfügt über eine zylindrische Spitze mit einem Durchmesser von 16 mm, welche 0,5 mm oberhalb der zu beanspruchenden Probe positioniert wird. Die Probe

befindet sich in einem mit destilliertem Wasser, temperiert auf 25 °C ± 3 °C, gefüllten Behälter. Dabei beträgt die Eintauchtiefe der Probe 12 - 15 mm.

Für die Erzeugung der Kavitation im Spalt zwischen Sonotrodenspitze und Probe wurde eine Schwingung mit einer Frequenz von 20,1 kHz und einer Amplitude von 19 µm eingesetzt. Nach definierten Intervallen wurden die Proben entnommen, im Ultraschallbad mit Aceton gereinigt, getrocknet und gewogen, um den Gewichtsverlust zu ermitteln.

**Ergebnisse und Diskussion**

**Schweißnahtgeometrie und Mikrostruktur**

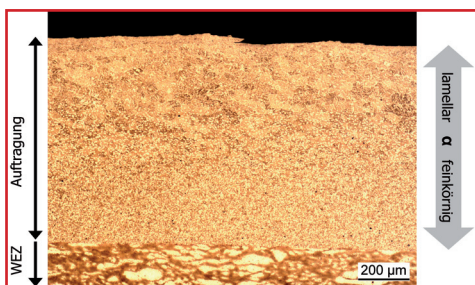
In Bild 4 ist ein Querschliff einer Unterwasserschweißung dargestellt. Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung erzeugten Schweißlagen sind, je nach Schweißparametern, in der Schweißnahtmitte zwischen 600 und 820 µm dick und weisen eine Breite von etwa 20 mm auf. Unterwasserschweißungen weisen bei ähnlichen Schweißparametern eine geringere Dicke auf als Schweißungen an Luft. Die Anbindung der Auftragungen an das Substrat war in allen Fällen defektfrei. Durch die ungleichmäßige Druckverteilung (äußere Bereiche des Bolzens werden aufgrund höherer Relativgeschwindigkeit wärmer und somit auch weicher und damit zur Kraftübertragung weniger geeignet) kommt es während des Auftragsprozesses zu einer parameterabhängigen, seitlichen Unterscheidung der Beschichtung.

In Bild 5 und Bild 6 sind beispielhaft Querschliffe von Schweißungen an Luft dargestellt. Die Auftragungen weisen ein feinkörniges, gleichmäßiges Gefüge auf mit, abhängig von den Schweißparametern, martensitischen und bainitischen Strukturen, sowie α-Phase zum Teil mit Widmannstätt-

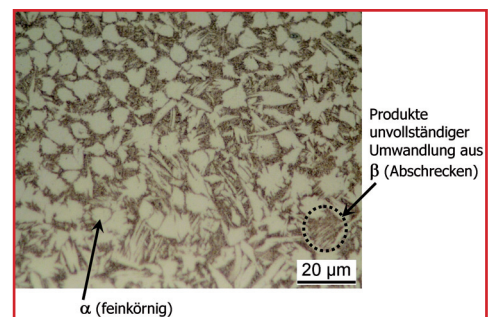
ten-Gefüge [10] [15]. κ<sub>II</sub>- und κ<sub>III</sub>-Phasen aus dem Ausgangszustand sind nicht mehr zu erkennen. Die Bindelinie von Auftragung und Grundwerkstoff ist deutlich sichtbar, was auf die verfahrensbedingte geringe Beeinflussung des Substrats zurückzuführen ist. In der Wärmeeinflusszone unterhalb der Auftragung sind die Bereiche eutektoider Zersetzung (α + κ<sub>III</sub>), welche im Substratwerkstoff vorhanden waren (Bild 7), nicht mehr erkennbar. Es ist daher anzunehmen, dass diese Bereiche unter dem Wärmeeinfluss beim Schweißen in die β-Phase umwandeln, während bei der anschließenden raschen Abkühlung die erneute Ausscheidung der κ<sub>III</sub>-Phase unterdrückt wird [15].

**Beständigkeit gegen Kavitationserosion**

Es wurden drei Proben des Substratwerkstoffs und sechs reibauftraggeschweißte Proben im Kavitationstest geprüft und untersucht. Der gemessene Gewichtsverlust wurde auf die durch Kavitation beanspruchte Fläche bezogen, und der Verlauf über der Versuchsdauer für vier Proben, je zwei aus dem Substrat und mit Reibauftraggeschweißung, in Bild 8 dargestellt. Der Substratwerkstoff weist nach einer anfänglichen Inkubationsphase, d.h. einer Phase plastischer Deformation

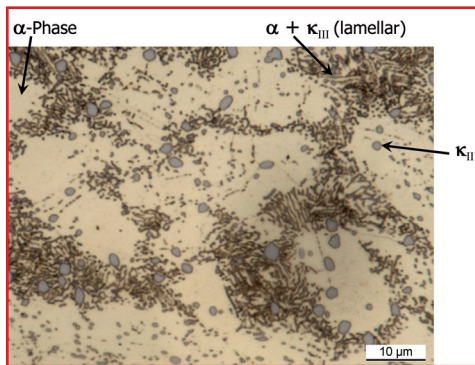


**Bild 5: Querschliff einer Schweißung an Luft; Abbildung in der Mitte der Schweißnaht. In der Auftragung überwiegt nahe der Oberfläche ein lamellares Gefüge, welches zum Substrat hin in ein feinkörniges aus unvollständig umgewandelten Bereichen und darin eingebetteter, feiner α-Phase übergeht.**



**Bild 6: Querschliff einer Schweißung an Luft; Gefüge in der Auftragschweißung (Beispiel). Zwischen feinen α-Körnern sind dunkel angeätzte Bereiche erkennbar, welche durch Abschrecken aus der β-Phase entstanden sind. Die hierin vorhandenen hell angeätzten, nadeligen Strukturen sind α-Kristalle in Widmannstättenscher Anordnung. In [10] und [15] wurden in NAB-Gefügen dieser Art zusätzlich martensitische und bainitische Bestandteile, sowie feine Ausscheidungen nachgewiesen.**



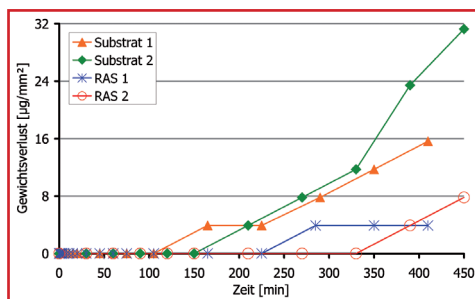


**Bild 7: Gefüge des Substratwerkstoffes im warmgewalzten Zustand**

der Oberfläche (Aufrauung) ohne Materialabtrag, einen kontinuierlichen Materialverlust auf. Bei Probe „Substrat 2“ nimmt dieser im Laufe der Versuchsdauer noch zu (Bild 8).

Für die reibauftraggeschweißten Proben zeigt sich zunächst eine zwischen etwa 100 und 200 min längere Inkubationsphase. Im Anschluss ist bei Probe RAS 1 (Bild 8) der Materialverlust so gering, dass bei Gewichtsmessungen im Abstand von je 60 Minuten die Auflösung von  $10^{-4}$  g der verwendeten Waage nicht ausreichte, um eine Kurve mit kontinuierlicher Steigung zu bestimmen. Nach 400 min Kavitationsbeanspruchung haben die mittels Reibauftragschweißen beschichteten Proben im Durchschnitt  $4,9 \pm 1,7 \mu\text{g}/\text{mm}^2$  Gewicht verloren, die Proben aus dem Substratwerkstoff dagegen  $20,5 \pm 7,5 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ .

Die bessere Beständigkeit der reibauftraggeschweißten Schichten kann auf die Homogenisierung des Gefüges und die anzunehmenden verbesserten



**Bild 8: Gewichtsverlust, bezogen auf die beanspruchte Fläche, in Abhängigkeit der Dauer der Kavitationsbeanspruchung. Es sind exemplarisch die Kurven von 2 Proben aus dem Substrat und 2 Proben mit einer reibauftraggeschweißten Beschichtung (RAS) dargestellt.**

mechanischen Eigenschaften zurückgeführt werden [12] [14] [17]. In [17] wurde gezeigt, dass feinkörnige Gefüge und Gefüge in Widmannstättencher Anordnung, vergleichbar mit den in der vorliegenden Veröffentlichung untersuchten, neben der höheren Härte (Substrat:  $214 \pm 15 \text{HV}_0,1/10 \text{ s}$ ; Auftragung:  $276 \pm 13 \text{HV}_0,1/10 \text{ s}$ ) auch eine im Vergleich zum Gusszustand deutlich höhere Streckgrenze aufweisen (aus [17]; Gusszustand: 214 MPa; Widmannstättenches Gefüge: 572 MPa; Feinkörniges, homogenes Gefüge: 508 MPa). Der positive Effekt der Gefügehomoenisierung wird in [12] und [14] darauf zurückgeführt, dass Risseinleitung und Korrosionsangriff unter Kavitationsbeanspruchung, welche letztendlich zu Ausbrüchen, also Materialverlust führen, sehr oft von Grenzflächen zwischen  $\kappa$ -Ausscheidungen und der  $\alpha$ -Phase ausgehen. In Schliffen von reibauftraggeschweißten Schichten waren  $\kappa$ -Phasen, insbesondere die größeren  $\kappa_{II}$ -Phasen, nur selten erkennbar, im Gegensatz zum Substratwerkstoff.

### Zusammenfassung und Ausblick

Das Erzeugen artgleicher Beschichtungen auf NAB mittels Reibauftragschweißen ist möglich, und hat sich als robuster, reproduzierbarer Prozess erwiesen. Die Einsetzbarkeit des Verfahrens für andere Werkstoffe (Aluminium, Stahl) ist von den Autoren bereits erfolgreich getestet worden.

Die Mechanismen und der genaue Ablauf der Kavitationserosion von reibauftraggeschweißter NAB wird in weiterführenden Arbeiten näher untersucht werden. Weiterhin muss abgeklärt werden, wie sich das erzeugte Gefüge unter einem Korrosionsangriff in Meerwasser verhält, um das Potenzial dieses Verfahrens für Reparaturschweißungen großer Gussteile für den maritimen Einsatz weiter abzuklären.

### Literatur

[1] T. Shinoda et al.: Effect of process parameters during friction coating on properties of non-dilution coating layers, Surface Engineering, 14 (3), 211-216, 1998.  
 [2] J. Q. Li et al.: Underwater friction surfacing, Surface Engineering, 16 (1), 31-35, 2000.

[3] G. M. Bedford et al.: On the thermomechanical events during friction surfacing of high speed steels, Surface & Coatings Technology, 141, 34-39, 2001.  
 [4] B. M. Jenkins et al.: Hardfacing by low-pressure friction surfacing, Transactions of the Institution of Engineers Australia, 14 (3), 178-185, 1989.  
 [5] H. Sakihama et al.: Mechanical properties of friction surfaced 5052 Aluminium Alloy, Materials Transactions, 44 (12), 2688-2694, 2003.  
 [6] J. Q. Li et al.: Eigenschaften reibauftraggeschweißter Schneidkanten, Schweißen & Schneiden, 52 (5), 278-281, 2000.  
 [7] P. Lambrineas et al.: Areal coverage using friction surfacing, Journal of Ship Production, 8 (3), 131-136, 1992.  
 [8] T. Shinoda et al.: Development of heavy thickness coating process by friction, Proceedings of 6th International Symposium, JWS, Nagoya, 1996.  
 [9] A. M. Russel, K. L. Lee: Structure-Property Relations in Nonferrous Metals, Wiley-Interscience, 311ff., 2005.  
 [10] A. Jahanafrooz et al.: Microstructural development in complex nickel-aluminium bronzes, Metallurgical Transactions A, 14A, 1951-1956, 1983.  
 [11] T. Kawazoe et al.: Erosion characteristics of surface hardened Ni-Al bronze, Surface Engineering, 13 (1), 37-40, 1997.  
 [12] C. H. Tang et al.: Improvement in cavitation erosion resistance of a copper-based propeller alloy by laser surface melting, Surface and Coatings Technology, 182, 300-307, 2004.  
 [13] M. K. Lee et al.: Numerical correlation of the cavitation bubble collapse load and frequency with the pitting damage of flame quenched Cu-9Al-4.5Ni-4.5Fe alloy, Materials Science and Engineering A, 425, 15-21, 2006.  
 [14] A. Al-Hashem et al.: Cavitation corrosion behavior of cast nickel-aluminium bronze in seawater, Corrosion, 51 (5), 331-342, 1995.  
 [15] K. Oh-Ishi et al.: Microstructural modification of as-cast NiAl bronze by friction stir processing, Metallurgical and Materials Transactions A, 35A, 2951-2961, 2004.  
 [16] M. W. Mahoney et al.: Friction stir processing of cast NiAl bronze, Materials Science Forum, 539-543, 3721-3726, 2007.  
 [17] M. W. Mahoney et al.: Microstructural modification and resultant properties of friction stir processed cast NiAl bronze, Materials Science Forum, 426-432 (4), 2843-2848, 2003.  
 [18] T. G. Gooch: Mechanical properties of arc welds in aluminium bronze, Metal Construction, 14 (6), 320-329, 1982.  
 [19] Y. Sasaki et al.: Effects of welding repairs on fatigue strength of marine propellers, Research and Development Kobe Steel Engineering Reports, 33 (3), 69-72, 1983.

(1) St. Hanke, A. Fischer, Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Werkstofftechnik  
 (2) M. Beyer, J. dos Santos, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, Festphase-Fügeprozesse, Geesthacht