



# TU Clausthal

Clausthal University of Technology

## **Potenziale neuartiger Schweißdrahtbeschichtungen in der Prozessgestaltung**

**V. Wesling, A. Schram, K. Treutler**

Technical Report Series

Fac3-15-01



Faculty of  
Mathematics/Computer Science  
and Mechanical Engineering  
Clausthal University of Technology

## Impressum

Publisher: Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau,  
Technische Universität Clausthal  
Am Regenbogen 15, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany

Editor-in-chief: Alfons Esderts

Technical editor: Martina Wächter

Contact: [martina.waechter@tu-clausthal.de](mailto:martina.waechter@tu-clausthal.de)

URL: <http://www.fakultaet3.tu-clausthal.de/forschung/technical-reports/>

ISSN: 1869-8018

## The Faculty of Mathematics/Computer Science and Mechanical Engineering Review Board

Prof. Dr. Frank Endres

Prof. Dr. Alfons Esderts

Prof. Dr. Stefan Hartmann

apl. Prof. Dr. Günter Kemnitz

Prof. Dr. Armin Lohrengel

Prof. Dr. Norbert Müller

Prof. Dr. Hubert Schwarze

Prof. Dr. Volker Wesling

# Potenziale neuartiger Schweißdrahtbeschichtungen in der Prozessgestaltung

Prof. Dr.-Ing. V. Wesling

Dr.-Ing. A. Schram

Dipl.-Ing. K. Treutler

TU Clausthal –

Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren

Institute of Welding and Machining

Agricolastr. 2

38678 Clausthal-Zellerfeld

## Abstract

Durch Nutzung höchstfester Stähle in der Konstruktion steigen die Anforderungen an Schweißzusätze und Prozessführung. Nachfolgend werden erste Untersuchungen zu den Potentialen von gezielt beschichteten Massivdrähten zur Prozessbeeinflussung und dem Einfluss der Beschichtung auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Schweißgutes dargestellt. Es zeigen sich dabei deutliche Einflüsse der Beschichtungselemente auf die Prozesscharakteristika wie Einbrandverhalten und Gefüge des Schweißgutes sowie signifikante Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften.

## 1 Einleitung

Die gestiegenen Anforderungen an Schweißkonstruktionen hinsichtlich Festigkeit und Zähigkeit stellen auch die Zusatzwerkstoffhersteller vor große Herausforderungen. Um den gestiegenen Anforderungen gerecht zu werden, wurden neue Legierungskonzepte für Schweißzusätze entwickelt. Zur Realisierung spezifischer Eigenschaften wurden vermehrt Fülldrähte hergestellt. Durch das Einbringen diverser pulverförmiger Bestandteilen konnten die Eigenschaften von Plattierungen, Panzerungen und Schweißverbindungen gezielt eingestellt werden, u.a. [1], [2], [3]. Im Bereich der Verbindungsschweißtechnik wird hierbei der Fokus auf Schlackenbildung und dem daraus resultierenden Schutz der Schweißnaht vor Umwelteinflüssen, ähnlich der Schlackenbildung bei Stabelektroden, genutzt. Es werden aber auch die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Verbindung durch die Schweißzusätze bestimmt, [4].

Der Modifikation von Massivdrähten, z.B. durch Beschichten, wurde bisher wenig Aufmerksamkeit gewidmet, obwohl sie gegenüber den Fülldrähten verschiedene Vorteile bieten. Der wichtigste Vorteil der Drahtbeschichtung gegenüber dem Befüllen mit Pulverkomponenten ist die homogene Verteilung der zugesetzten Elemente.

Grundlegend soll die Beschichtung von Massivdrahtelektroden drei Kernanforderungen aufweisen, [5]:

- gute Gleiteigenschaften,
- guter Stromübergang,
- guter Korrosionsschutz.

Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass ähnlich zu den Fülldrähten eine Beeinflussung der mechanisch-technologischen Eigenschaften des Schweißgutes durch das Zulegieren von Zusatzelementen vorgenommen werden kann. Zudem ist es möglich, das Auflegieren des Stahles durch die derzeit gebräuchliche Kupferschicht zu vermeiden. Beschichtungen aus Titanitrid und Cr + C weisen gute Gleiteigenschaften in Gleitkontakten auf [6], [7], [8]. Zudem besitzen diese Schichten eine gute Korrosionsbeständigkeit, [9].

Nachfolgend sind erste Untersuchungen zum Potenzial von Schweißdrahtbeschichtungen zur Beeinflussung der mechanisch-technologischen Eigenschaften des Schweißgutes dargestellt. Als Grundkonzepte werden zwei unterschiedliche Mechanismen zur Beeinflussung der mechanischen-technologischen Eigenschaften herangezogen. Zum einen soll die Feinkornbildung und zum anderen die Phasenumwandlung genutzt werden. Die Feinung des dendritisch erstarrenden Schweißgutes wird durch die Zugaben von Titanitrid gefördert. Hierdurch soll die Anzahl der Dendriten sowie die Verzweigungshäufigkeit durch das Impfen mit Erstarungskeimen erhöht werden, [10].

Im Bereich der Phasenumwandlung wird durch Zugabe von Chrom und Kohlenstoff die Bildung von Zwischenstufengefüge und Martensit erhöht. Zudem kann durch die Entstehung von Chromcarbiden die Anzahl der Keime erhöht werden. Dies fördert die Bildung eines feineren Gefüges.

In beiden Fällen wird eine signifikante Erhöhung der Zugfestigkeit vermutet. Allerdings wird durch Ausscheidungen eine Abnahme der Bruchdehnung erwartet, was aber durch die Feinkörnigkeit teilweise kompensiert werden kann.

## 2 Beschichtung und Probenherstellung

Aufbauend auf einer kupferbeschichteten Standarddrahtelektrode der Güte DIN EN ISO 14341-A G 50 7 M21 4Mo wurden zwei unterschiedliche Schichtsysteme untersucht. Die Schichtsysteme wurden mittels physikalischer Gasphasenabscheidung (PVD – physical vapor disposition) auf den Draht aufgebracht. Zur Beschichtung wurde eine PVD-Anlage der Firma CemiCon des Typs CC 800/9 Custom genutzt, Abbildung 2. Das Beschichtungsverfahren lässt in der angewendeten Form keine industrielle Massenfertigung zu, sondern eignet sich zur Herstellung von beschichteten Drähten Labormaßstab mit exakt definierten Schichteigenschaften und Schichtzusammensetzungen. Die Massivdrahtelektrode wurde für die Beschichtung auf ein rundes, in der PVD-Anlage drehbares Gestell aufgespult und beschichtet. Innerhalb eines Beschichtungsvorganges konnten so bis zu 200 m der Massivdrahtelektrode mit definierter Schicht versehen werden. Da auf die Entfernung der Kupferschicht der Massivdrahtelektrode verzichtet wurde ist davon auszugehen, dass neben den aufgetragenen Elementen auch Kupfer in den jeweiligen Schichten zu finden ist. Es wurden zum einen die Elemente Chrom und Kohlenstoff (ähnlich zu Graphite-IC™ [7], [8]) mit einer Schichtdicke von 2 µm und zum anderen Titanitrid mit einer Schichtdicke von 4 µm aufgebracht, Abbildung 1. Die Prozesse wurden speziell für die Beschichtung von Massivdrahtelektroden entwickelt.

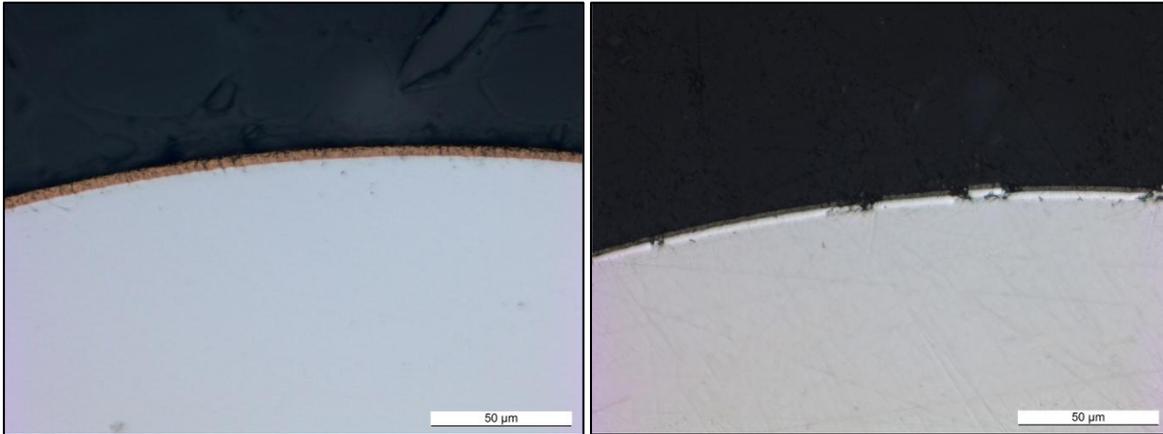


Abbildung 1: TiN (links), Cr+C-Beschichtung (rechts) auf Massivdrahtelektroden

Im Gegensatz zur vorher aufgezeigten Annahme lassen sich mittels senkrecht zur Drahtoberfläche durchgeführter energiedispersiver Röntgenspektroskopie im Rasterelektronenmikroskop keine signifikanten Kupferanteile an der Oberfläche des Drahtes mehr nachweisen. Weiterhin lassen sich auch keine Zwischenschichten im Lichtmikroskop erkennen, Abbildung 1. Das Fehlen der Kupferschicht kann durch Diffusions- und/oder Reinigungsvorgänge (dem Ionenätzen) während der PVD-Beschichtung erklärt werden.



Abbildung 2: PVD Beschichtungsanlage

Mit den beiden beschichteten Elektroden und einer unbehandelten Drahtelektrode als Vergleichsmaterial wurden Blindnähte sowie dreilagige Auftragsschweißungen mit einer Breite von 20mm auf den Substratwerkstoff S700MC mit zwei unterschiedlichen Prozessparameterkombinationen, zur Darstellung unterschiedlicher Abkühlgeschwindigkeiten, geschweißt. Bei der ersten Kombination kühlten die Proben an ruhender Luft ab. In der zweiten Versuchsserie wurde durch eine Substratkühlung die Abkühlgeschwindigkeit signifikant gesteigert. Alle weiteren Prozessparameter wurden bei beiden Kombinationen konstant gehalten. Die Schweißversuche wurden mit Hilfe einer Schweißanlage der Fa. EWM mit Standard Kennlinie für Substratwerkstoff und Gas (Argon) durchgeführt. Zur Charakterisierung des Gefügestandes im Querschliff wurden Einzelraupen auf den Substratwerkstoff aufgebracht. Unter gleichen Prozessbedingungen wurden zur Entnahme von Zugproben dreilagige gependelte Auftragschweißungen mit einer Raupenbreite von 25mm auf das Substrat aufgetragen.

Die chemische Zusammensetzung der eingesetzten Werkstoffe ist in Tabelle 1 dargestellt. Der Substratwerkstoff S700MC ist ein thermomechanisch behandelter Feinkornbaustahl. Die Eigenschaften des Stahles sind in [11] dokumentiert. Der eingesetzte Zusatzwerkstoff ist für das Schweißen von hochfesten und warmfesten Stählen geeignet. An die Probenentnahme schloss sich eine metallografische Analyse der Schweißraupen an.

Die chemische Zusammensetzung der eingesetzten Werkstoffe ist in Tabelle 1 dargestellt. Der Substratwerkstoff S700MC ist ein thermomechanisch behandelter Feinkornbaustahl. Die Eigenschaften des Stahles sind in [11] dokumentiert. Der eingesetzte Zusatzwerkstoff ist für das Schweißen von hochfesten und warmfesten Stählen geeignet. An die Probenentnahme schloss sich eine metallografische Analyse der Schweißraupen an.

Massenanteil in %												
Werkstoff	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Ti	Nb	V
S700MC	0,07	0,26	1,54	0,01	<0,002	0,05	0,11	0,15	0,036	0,05	0,07	0,07
14341-A 4Mo	0,09	0,70	1,95	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des Zusatzwerkstoffes und des Substratwerkstoffes

Die metallografische Charakterisierung umfasste neben der Härtemessung, der Gefügeanalyse auch die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mittels Funkenspektroskopie sowie die Analyse der Gasgehalte im Schweißgut mittels Trägergas-Schmelzextraktionsmethode. Diese Analyse wurde primär zum Nachweis erhöhter Stickstoffgehalte eingesetzt. Zur mechanisch-technologischen Charakterisierung des Schweißgutes wurden Zugversuche durchgeführt.

### 3 Ergebnisse

In den Auftragsschweißungen, die mit langsamer Abkühlung hergestellt wurden, konnte durch die Beschichtung aus TiN das Einbrandverhalten wesentlich verändert werden. Ein ausgeprägter Argon-Finger war, im Gegensatz zum verkupferten und mit Cr +C beschichteten Draht, nicht nachweisbar, Abbildung 3. Die Zugfestigkeit und Streckgrenze wurde um ca. 10% gegenüber dem verkupferten Draht gesteigert. Jedoch nahm die Bruchdehnung des Schweißgutes des mit TiN beschichteten Drahtes um 70% ab. Ein Anstieg der Härte konnte bei der Schweißnaht aus dem titannitridbeschichteten Draht nicht festgestellt werden. Sie entsprach der Härte des Schweißgutes aus dem verkupferten Draht. Die Beschichtung mit Cr + C führte zu einem verbesserten Einbrand und einem stabileren Schweißprozess. Die Härte des Schweißgutes wurde durch die Beschichtung gegenüber der Härte des Schweißgutes des verkupferten Drahtes um 100HV gesteigert. Zudem zeigte sich ein etwas ausgeprägter fingerförmiger Einbrand in der Schweißnahtmitte.



Abbildung 3: Nahtausprägung verkupfert (mitte), mit TiN (rechts) und CR + C (links)

An den Auftragssraupen, die mit hoher Abkühlgeschwindigkeit hergestellt wurden, konnte eine leichte Vergrößerung des Einbrandes in der Mitte der Schweißnaht durch die Cr +C Beschichtung festgestellt werden. Im Gegensatz zur Prozessparameterkombination 1 wurde jedoch keine Steigerung der Härte beobachtet. Es zeigte sich, dass eine Steigerung der Zugfestigkeit um 380MPa auf über 1000MPa im Schweißgut durch die Chrom- und Kohlenstoffbeschichtung erreicht werden kann. Weiterhin stieg die Streckgrenze des Schweißgutes von 494MPa auf 700MPa ab. Allerdings nahm die Bruchdehnung um ca. 55% ab. Die Änderung der mechanischen Eigenschaften der Schweißgüter ist in Abbildung 4 im Vergleich zum Schweißgut des verkupferten Referenzdrahtes dargestellt.

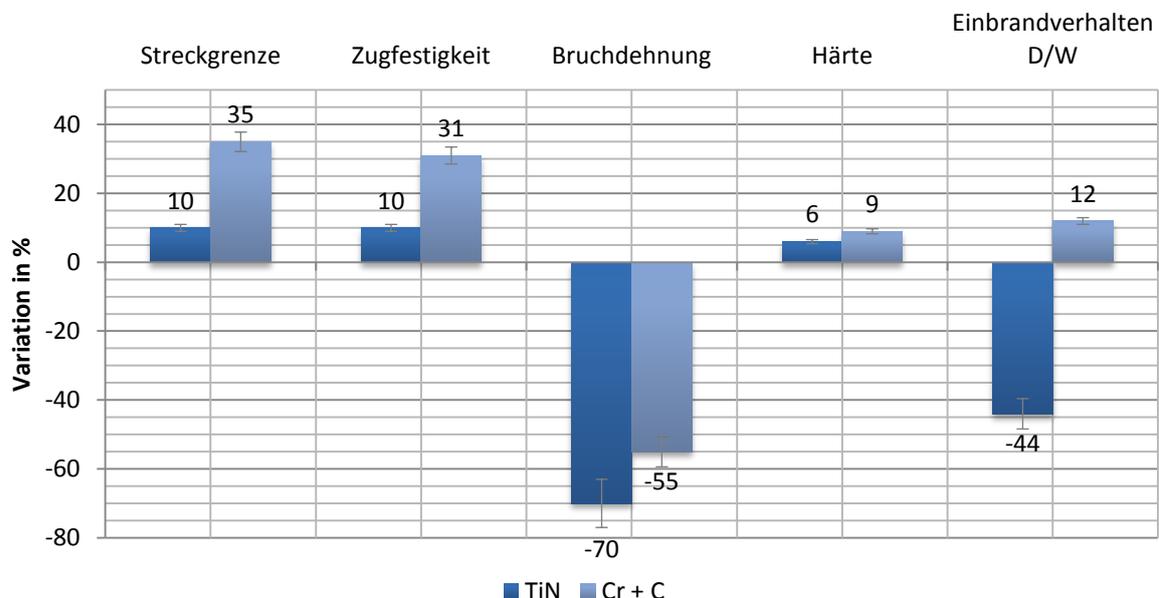


Abbildung 4: Variation der mechanischen Schweißguteigenschaften (schnelle Abkühlbedingungen)

Wie vermutet, konnte durch die Beschichtung des Massivdrahtes mit TiN und Cr + C die Struktur des Schweißgutes verändert werden. Augenscheinlich bildete sich ein feineres dendritisches Gefüge aus, Abbildung 5.

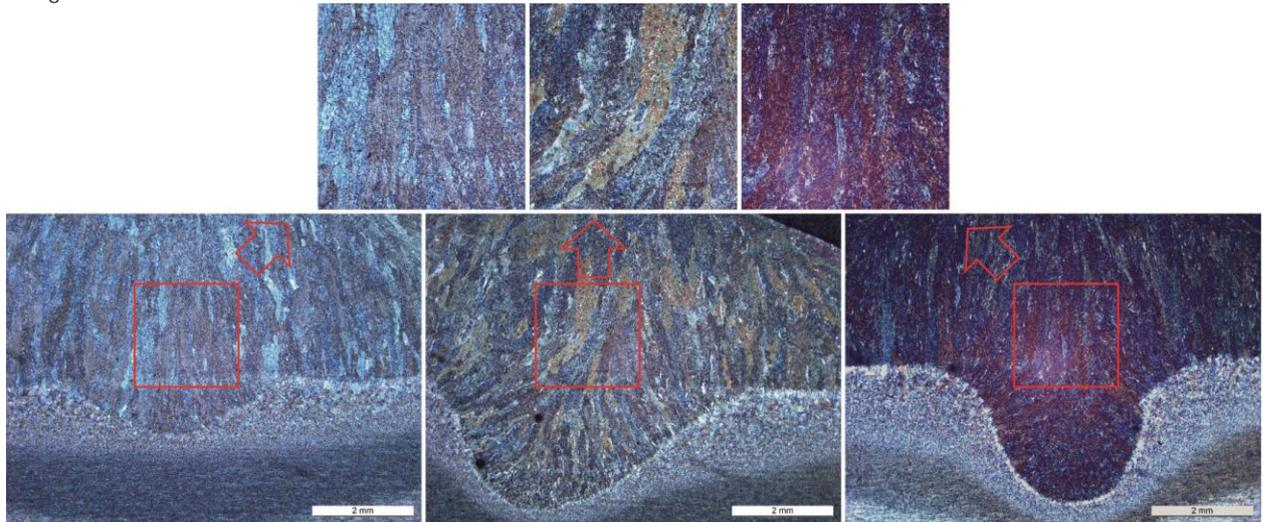


Abbildung 5: Gefüge der Schweißraupen aus TiN-beschichtetem (links), verkupferten (mitte) und mit Cr + C-beschichtetem Massivdraht (rechts)

Durch beide Beschichtungen konnte die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes gegenüber dem Schweißgut aus dem verkupferten Draht signifikant verändert werden.

Die Funkenspektroskopischen Untersuchungen ergaben, dass die Beschichtung aus Cr + C den Chromgehalt von 0,07% auf 0,55% Massenanteil erhöht. Der Kohlenstoffgehalt steigt von 0,087% im Schweißgut des verkupferten Drahtes auf 0,12% im Schweißgut des beschichteten Drahtes.

Die Beschichtung aus TiN erhöht den Massenanteil an Titan von 0,16% auf 0,37%.

Die signifikante Erhöhung des Masseanteils wurde trotz des geringen Anteils an Drahtvolumen erreicht. Bei der TiN-Beschichtung beträgt der Anteil am Drahtvolumen ca. 0,70% respektive ca. 0,35% bei der Cr + C-Beschichtung.

Die Analyse der Gasgehalte durch die Trägergas-Schmelzextraktionsmethode ergab einen um über 300% erhöhten Anteil an Stickstoff in dem Schweißgut aus dem TiN-beschichtetem Draht. Es wurden durchschnittlich 302,7 ppm gemessen. Die beiden anderen Schweißgüter aus dem Cr + C-beschichtetem und dem verkupferten Schweißdraht wiesen sehr ähnliche Stickstoffgehalte von 64 ppm bis 81 ppm auf.

Aufgrund der Stickstoffgehalte und der Gefügeanalyse liegt die Vermutung nahe, dass das TiN im erstarrenden Schweißgut als Keim wirkt und somit die Festigkeitssteigerung auf das feinere Schweißgutgefüge und die Ausscheidungshärtung zurückzuführen ist. Das feinere Gefüge des Schweißgutes aus der mit Cr + C-beschichteten Massivdrahtelektrode lässt den Schluss zu, dass sich Chromcarbide gebildet haben. Der signifikante Anstieg der Zugfestigkeit lässt auf ein Gefüge mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt und auf die Ausscheidungshärtung durch Chromcarbide schließen.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die verschiedenen Beschichtungen der Massivdrahtelektrode konnten die Eigenschaften des Schweißgutes sowie die Prozessausprägung hinsichtlich des Einbrandverhaltens und der Prozessstabilität signifikant verändert werden.

Die Beschichtung mit TiN führte zu einer Steigerung der Zugfestigkeit und Streckgrenze um 10%. Das Einbrandverhalten verbesserte sich. Ein fingerförmiger Einbrand wie er sich bei dem verkupferten Draht ausbildet entstand nicht. Die Bruchdehnung wurde negativ beeinflusst.

Die Beschichtung mit Cr + C steigerte die Zugfestigkeit des Schweißgutes signifikant um 50% auf über 1000 MPa. Die Streckgrenze wurde ebenfalls deutlich angehoben. Jedoch wurden das Einbrandverhalten und die Bruchdehnung negativ beeinflusst. Der sich bei verkupferten Drähten ausbildende tiefe fingerförmige Einbrand wurde durch die Beschichtung mit Cr + C verstärkt.

Der signifikante Einfluss der Drahtbeschichtung auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Schweißgutes lässt den Schluss zu, dass durch eine umfassende Charakterisierung der Einflüsse verschiedener Beschichtungselemente die Schweißguteigenschaften beim MSG-Schweißen durch bestimmte Beschichtungssysteme für Drahtelektroden gezielt eingestellt werden könne.

## Literaturverzeichnis

- [1] L. Lau, V. Wesling, R. Reiter und C. Gerk, „Neue Eisenbasispseudolegierungen mit Wolframschmelzkarbid zum Schutz vor schwerer abrasiver Beanspruchung,“ in *9. Fachtagung Verschleißschutz von Bauteilen durch Auftragschweißen*, Halle (Saale), 2012.
- [2] A. Petsch, V. Wesling und R. Reiter, „Untersuchungen von Verschleißmechanismen an verschiedenen Hartauftragschweißungen,“ in *31. Assistentenseminar Füge und Schweißtechnik: Vorträge der gleichnamigen Veranstaltung in Zinnwals-Georgenfeld vom 16. bis 18. September 2010*, Zinnwald-Georgenfeld, 2011.
- [3] V. Wesling, R. Reiter, F. Schreiber, L. Lau, R. Winkelmann und C. Schreuders, „Quasinanostrukturierte Beschichtungen für abrasive und erosive Beanspruchung,“ in *Tagungsband zur 9. Fachtagung Verschleißschutz von Bauteilen durch Auftragschweißen*, 2012.
- [4] L. Orlov, L. Matashova, Y. Gavriljuk und E. Bondarchuk, „Effect of the structure on the mechanical properties of single pass welded joints produced with cored electrode,“ *Welding International*, Bd. 2, Nr. 9, 1988.
- [5] B. Schwarz, „Neues innovatives Drahtoberflächenkonzept für niedriglegierte MAG-Drahtelektroden für warmfeste hochfeste Stähle,“ in *Schweißen und Schneiden, Große Schweißtechnische Tagung*, Aachen, 2006.
- [6] M. El Hakim, M. Abad, M. Abdelhameed, M. Schalaby und S. Vedhius, „Wear behaviour of some cutting tool materials in hard turning HSS,“ *Tribology International*, pp. 1174 - 1181, 2011.
- [7] S. Field, M. Jaratt und D. Teer, „Tribological properties of graphite-like and diamond-like carbon coatings,“ *Tribology International*, Bd. 37, pp. 949 - 956, 2004.
- [8] J. Stallard und D. Teer, „A study of the tribological behaviour of CrN, Graphite-iC and Dymon-iC coatings under oil lubrication,“ *Surface & Coatings Technology*, pp. 525 - 529, 2004.
- [9] V. Wesling, T. Kandelhardt, J. Hamje und A. Petsch, „Dünnschichtbeschichtung bei Korrosionsbeanspruchung von Aluminiumsubstrat,“ *Clausthaler Zentrum für Materialtechnik - Bericht 2011 - 2012*, 2013.
- [10] G. Schulze, *Die Metallurgie des Schweißens*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2004.
- [11] V. Wesling, A. Schram und K. Treutler, „Mechanical treatment of welded and brazed joints,“ in *12. International Conference of Shot Peening*, Goßlar, 2014.