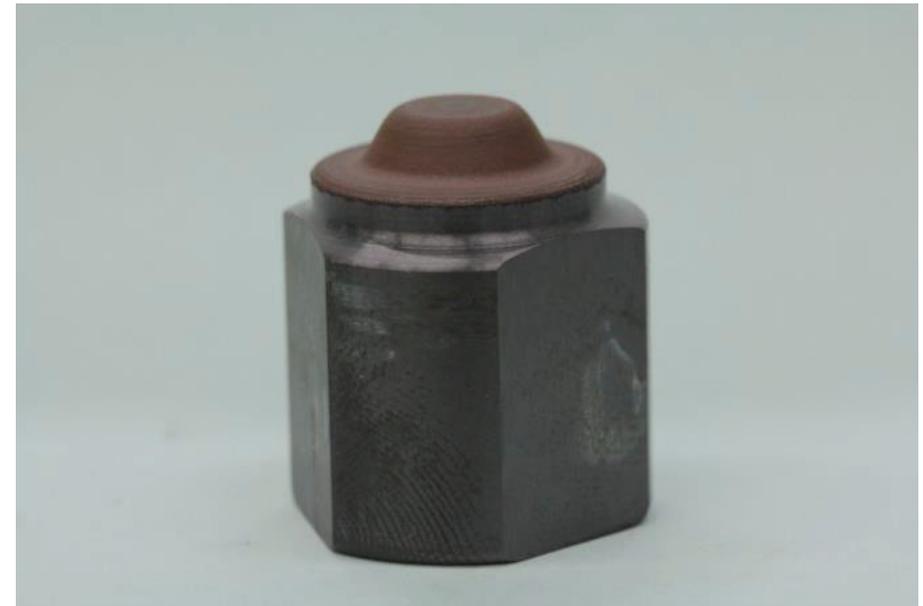


Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
Sohnstr. 65
40237 Düsseldorf



fosta@stahlforschung.de
www.stahlforschung.de



Einsatz des Rührreibschweißens für das Fügen von Stählen unterschiedlicher Güte in Verbindung mit einer gleichzeitigen Entwicklung entsprechender neuartiger keramischer Werkzeuge

Use of friction stir welding for joining of steels of different grade, in connection to a simultaneous development of appropriate new ceramic tools

Forschung für die Praxis P 1136/ IGF-Nr. 19213 N

Industrielle
Gemeinschaftsforschung **IGF**

Gefördert durch:
 Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Forschungsvereinigung
Stahlanwendung e. V.



Forschungsprojekt P 1136 / IGF-Nr. 19213 N

Einsatz des Rührreibschweißens für das Fügen von Stählen unterschiedlicher Güte in Verbindung mit einer gleichzeitigen Entwicklung entsprechender neuartiger keramischer Werkzeuge

Use of friction stir welding for joining of steels of different grade, in connection to a simultaneous development of appropriate new ceramic tools

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Berlin-Brandenburg GmbH, Berlin
Ralf Boywitt

FGK Forschungsinstitut für Anorganische Werkstoffe - Glas/Keramik - GmbH, Höhr-Grenzhausen
Dr.-Ing. Marcus Emmel

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
Dipl.-Ing. Rainer Salomon

Das IGF-Vorhaben 19213 N der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde von der Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Berlin-Brandenburg GmbH, Berlin, und vom FGK Forschungsinstitut für Anorganische Werkstoffe - Glas/Keramik - GmbH, Höhr-Grenzhausen, durchgeführt.

Beteiligte am Projektbegleitenden Ausschuss:

BCE Special Ceramics GmbH, Mannheim
Carl Cloos Schweißtechnik GmbH, Haiger
Cosma Engineering Europe GmbH, WEIKERSDORF, ÖSTERREICH
Daimler AG, Stuttgart
ESAB Welding & Cutting GmbH, Langenfeld
FCT Ingenieurkeramik GmbH, Sonneberg
Fooke GmbH, Borken
FST Industrie GmbH, Berlin
H.Loitz-Robotik GbR, Hamburg
IMG Ingenieurtechnik und Maschinenbau GmbH, Rostock
Johann Dudek Maschinen- und Metallbau GmbH, Berlin
KUKA Systems GmbH, Augsburg
Merkle Schweißtechnik Berlin GmbH, Berlin
MT Aerospace AG, Augsburg
Outokumpu Nirosta GmbH, Krefeld
Sächsisch-Bayerische Starkstrom Gerätebau GmbH, Neumark
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Duisburg
VauQuadrat GmbH, Offenburg

© 2021 Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf

Bestell-Nr. P 1136
ISBN 978-3-96780-018-0

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung in andere Sprachen, bleiben vorbehalten. Ohne schriftliche Genehmigung der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. sind Vervielfältigungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen nicht gestattet.

Kurzdarstellung

Das wichtigste und erste Entwicklungsziel in dem Vorhaben war die wirtschaftliche Erweiterung des Rührreibschweißens (FSW – Friction Stir Welding) für das Fügen von Stahlwerkstoffen, auch mit hohen Festigkeiten. Viele bisherige Erfahrungen, die in der SLV Berlin- Brandenburg vorhanden sind und auch experimentelle Anwendungen flossen mit in die Bearbeitung des Projektes ein. Aufgrund von Anfragen, hauptsächlich aus den Bereichen Schiffbau, Offshore, Fahrzeugbau und Sonderanwendungen und Forderungen seitens des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) wurden Stahlverbindungen verschiedener Güten geschweißt und untersucht. Zu nennen sind da u.a.: S235, S355, S690, CrNi18-10 und H800. Es wurden Blindnähte, Stumpfstöße und Überlappstöße geschweißt. Bei zwei Stahlsorten wurde der Stumpfstoß auch doppelseitig, zur Erfassung größerer Dicken gearbeitet. Zusätzlich wurde geprüft, ob eine Verwendung von Schutzgas nötig ist und wie man das optimal gestalten könnte (einfache Gasdüse über dem Rührreibwerkzeug, Schleppdüse usw.). Im weiteren Verlaufe des Projektes wurde darauf verzichtet. Es konnten keine signifikanten Vorteile festgestellt werden. Werkstofftechnische Untersuchungen wie Zugprüfungen, Biegeprüfungen, Röntgen usw. bestätigen diese Tendenz. Die getesteten Proben zeigten durchweg Gütewerte, die im Bereich des Grundwerkstoffes liegen.

Der zweite wichtige Punkt des Projektes war die Werkzeugentwicklung. Das ist auch der wesentlichste Umstand dafür, dass FSW an Stählen nicht sonderlich (außer Anwendungen im universitären oder institutionellen Bereich der Forschung) verbreitet ist. Während des Rührreibschweißprozesses bei Stählen sind die Rührreibwerkzeuge enorm hohen Temperaturen $\sim 1200^{\circ}\text{C}$ (bei z.B. Aluminium nur $\sim 500^{\circ}\text{C}$), korrosivem sowie abrasivem Verschleiß ausgesetzt. Hauptsächlich werden bei FSW- Stahlschweißungen Wolfram-Rhenium-Legierungen eingesetzt (WRe05, WRe25), aber auch andere metallische Sonderwerkstoffe, wie z.B. Tantalbasiswerkstoffe und Vollhartmetalle. Eine andere Variante sind Werkzeuge aus polykristallinem kubischem Bornitrid (pcBN).

Eine weitere, vielversprechende und wesentlich wirtschaftlichere Möglichkeit bieten konventionelle keramische Werkstoffsysteme. Speziell diese Systeme wurden im Forschungsvorhaben von der SLV Berlin-Brandenburg und der FGK GmbH aus Höhr- Grenzhäusen untersucht. Wichtig dabei war es die Wechselwirkungen, zu schweißender Werkstoff und keramisches Werkzeug, zu verstehen. In Ableitung aus den Versuchen und den anschließenden labortechnischen Untersuchungen hat sich ein Werkstoffsystem herauskristallisiert, Siliziumnitrid. Dieser Werkstoff, chemische Formel Si_3N_4 , eine Nichtoxidkeramik, hat sich bei allen getesteten Stählen bestens bewährt. Oxidkeramiken, obwohl leichter herzustellen, konnten hingegen nicht überzeugen. Erst im Laufe des Projektes und auch erst gegen Ende konnten hier, durch spezielle geometrische und chemische Anpassungen, an einigen Oxidkeramiken Verbesserungen erzielt werden. Aber auch dies ist ein wichtiges Ergebnis aus dem Forschungsvorhaben: Das Verstehen der Versagensmechanismen und deren Wirkungen auf die verschiedenen keramischen Werkstoffsysteme.

Letztendlich kann aber gesagt werden, der Werkstoff Si₃N₄ hat im Wesentlichen seine Einsatzreife erlangt. Das konnte durch die Ergebnisse in den Referenzversuchen eindeutig belegt und bestätigt werden. Somit ist zumindest ein Werkstoffsystem für das Rührreißschweißen an Stahl verifiziert.

FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Mai 2021

Abstract

The most important and first development goal in the project was the economic expansion of friction stir welding (FSW) for joining steel materials, also with high strengths. A lot of experience, which is available at the SLV Berlin-Brandenburg and also experimental applications were included in the project. Due to inquiries, mainly from the fields of shipbuilding, offshore, vehicle construction and special applications and demands of the project accompanying committee (PA), steel joints of different grades were welded and examined. To name a few of them: S235, S355, S690, CrNi18-10 and H800. Blind seams, butt joints and lap joints were welded. For two types of steel, butt joints were also welded on both sides to cover greater thicknesses. In addition, it was examined whether the use of shielding gas was necessary and how this could be optimally designed (simple gas nozzle above the friction stir tool, drag nozzle, etc.). In the further course of the project, this was dispensed with. No significant advantages could be determined. Material-technical investigations such as tensile tests, bending tests, X-rays etc. confirm this tendency. The tested samples all showed quality values that were in the range of the base material.

The second important point of the project was the tool development. This is also the main reason why FSW on steels is not very widespread (except for applications in the university or institutional field of research). During the friction stir welding process on steels, the friction stir tools are exposed to enormously high temperatures $\sim 1200^{\circ}\text{C}$ (e.g. only $\sim 500^{\circ}\text{C}$ for aluminium), corrosive and abrasive wear. Mainly tungsten-rhenium alloys are used for FSW steel welding (WRe05, WRe25), but also other special metallic materials such as tantalum-based materials and solid carbides are used. Another variant are tools made of polycrystalline cubic boron nitride (pcBN).

Another promising and much more economical option is offered by conventional ceramic material systems. Especially these systems were investigated in the research project by the SLV Berlin-Brandenburg and the FGK GmbH from Höhr-Grenzhausen. It was important to understand the interactions between the material to be welded and the ceramic tool. Derived from the experiments and the subsequent laboratory tests, a material system has been developed, silicon nitride. This material - chemical formula Si_3N_4 , a non-oxide ceramic - has proven to be the best material for all the steels tested. Oxide ceramics, although easier to produce, were not convincing. Only in the course of the project, and only towards the end of it, improvements were achieved on some oxide ceramics through special geometric and chemical adjustments. But this is another important result of the research project: The understanding of the failure mechanisms and their effects on the various ceramic material systems.

Ultimately, however, it can be said that the material Si₃N₄ has essentially reached maturity for use. This could be clearly proven and confirmed by the results in the reference tests. Thus at least one material system for friction stir welding on steel has been verified.

FOSTA - Research Association for Steel Application

May 2021

Inhaltsverzeichnis Content

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Einleitung / Introduction | 1 |
| 1.1 | Problemstellung / Problem definition | 2 |
| 1.2 | Motivation / Motivation..... | 3 |
| 1.3 | Zielsetzung / Objective | 4 |
| 2 | Stand der Technik / State of the art | 6 |
| 2.1 | Grundlagen des Rührreißschweißens an Stahl / Basics of Friction Stir Welding on steel (FSW)..... | 6 |
| 3 | Vorgehensweise und Versuchsplanung / Approach and design of experiments | 9 |
| 3.1 | Vorgehensweise / Approach..... | 10 |
| 3.1.1 | Lösungsweg / Solution | 10 |
| 3.2 | Durchgeführte Untersuchungen und Vorversuche / Conducted experiments and preliminary tests | 13 |
| 3.2.1 | Testreihen mit Röntgen und zum Verhalten der Stähle unter Wärmeeinfluss / Test series with X-ray and on the behaviour of steels under the influence of heat..... | 13 |
| 3.2.2 | Rührreißschweißen mit metallischen Werkzeugen / FSW with metal tools | 18 |
| 3.2.3 | Schweißungen an 2,0 mm dicken Blechen | 18 |
| 3.2.4 | Schweißungen an 4,0 mm dicken Blechen | 19 |
| 3.2.5 | Schweißungen an 5,0 mm dicken Blechen | 21 |
| 4 | Entwicklung der keramischen Werkzeuge / Development of ceramic tools | 23 |
| 4.1 | Vorgehensweise und Versuchsplanung / Approach and design of experiments..... | 24 |
| 4.1.1 | Versuchsaufbau und Ergebnisse der Charakterisierung der Keramiken/ Experimental setup and results of the characterization of ceramics | 24 |
| 4.1.2 | Test der Materialien unter realistischen Bedingungen / Test of the materials under realistic conditions | 26 |
| 4.1.3 | Bestimmung des Werkzeugverschleißes / Determination of the tool wear..... | 28 |
| 4.2 | Entwicklung neuartiger Keramikwerkzeugmaterialien/ Development of novel ceramic tool materials | 30 |
| 5 | Durchführung und Auswertung der Rührreißschweißversuche mit keramischen Werkzeugen/ Execution and evaluation of FSW experiments with ceramic tools | 32 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.1 | Erste Schweißversuche mit keramischen Werkzeugen / First welding tests with ceramic tools..... | 33 |
| 5.1.1 | Beschreibung des genutzten Werkzeugs / Description of the tool used..... | 33 |
| 5.1.2 | Ablauf der Schweißversuche, Parameter und Ergebnisse/ Procedure of the welding tests, parameters and results | 34 |
| 5.2 | Schweißversuche mit optimierten keramischen Werkstoffsystemen / Welding tests with optimized ceramic material systems | 37 |
| 5.2.1 | Testschweißungen in der SLV Berlin-Brandenburg..... | 37 |
| 5.2.2 | Testschweißungen bei ESAB in Laxa, Schweden | 42 |
| 6 | Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse/ Evaluation and summary of the results | 54 |
| 6.1 | Fazit aus den Versuchen und Forschungsergebnissen/ Conclusion from the experiments and research results..... | 54 |
| 7 | Literaturverzeichnis / Bibliography | 57 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1-1: Typische Werkzeuge für Rührreibschweißen an Stahl, links pcBN (Quelle ESAB), rechts metallisches Werkzeug (Quelle SLV B-B)..... | 4 |
| Abbildung 2-1: Schweißen eines Stahls (S235JR, t = 5,0 mm), links mit pcBN-Werkzeug und Schutzgasabdeckung (Quelle HZG), rechts WRe-Werkzeug ohne Schutzgas (Quelle SLV B-B)..... | 7 |
| Abbildung 3-1: Methodischer Ansatz..... | 10 |
| Abbildung 3-2: Ablaufplan zur Durchführung des Projektes..... | 11 |
| Abbildung 3-3: Röntgenaufnahme mit Keramikpartikeln, Werkzeug und DIN-Steg..... | 14 |
| Abbildung 3-4: Zugversuch bei Raumtemperatur (S235JR, Test 4)..... | 15 |
| Abbildung 3-5: Zugversuch bei 1200°C (S235JR, Test 3)..... | 15 |
| Abbildung 3-6: Zugversuch bei Raumtemperatur (X5CrNi18-10, Test 7)..... | 16 |
| Abbildung 3-7: Zugversuch bei 1200°C (X5CrNi18-10, Test 9)..... | 16 |
| Abbildung 3-8: Kerbschlagbiegeversuch bei 1100°C (rechts: S235JR, links: X5CrNi18-10)..... | 17 |
| Abbildung 3-9: Rührreibschweißung mit WRe05-Werkzeug..... | 20 |
| Abbildung 3-10: Rührreibschweißung mit Ta-Werkzeug..... | 21 |
| Abbildung 4-1: Optische Quantifizierung des Verschleißes mittels Profilometer..... | 25 |
| Abbildung 4-2: Temperatureinfluss auf die thermochemische Beständigkeit von keramischen Werkzeugwerkstoffen gegen Stahl am Beispiel des Siliziumnitrids..... | 26 |
| Abbildung 4-3: Einfluss des keramischen Werkstoffes auf die thermochemische Beständigkeit gegenüber Stahl..... | 26 |
| Abbildung 4-4: Versuchsaufbau der Testschweißung mit FSW-Anlage (links), Werkzeug mit Halterung (Mitte) sowie dem Testblech (rechts)..... | 27 |
| Abbildung 4-5: Werkzeug und Anlage während einen Versuches..... | 27 |
| Abbildung 4-6: Verhalten der Keramiken unter realen Bedingungen..... | 28 |
| Abbildung 4-7: Werkzeugverschleiß nach ca. 9,5 Meter Schweißnahtlänge..... | 29 |
| Abbildung 4-8: Makroschliff und Zugprüfung (S355JR, t = 8 mm)..... | 29 |
| Abbildung 4-9: Rührreibwerkzeug aus WC-ZrO ₂ | 30 |
| Abbildung 5-1: Zeichnung der ersten Werkzeugeinsätze aus Keramik..... | 33 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 5-2: Keramisches Werkzeug (Werkzeugeinsatz) der ersten Generation..... | 34 |
| Abbildung 5-3: Keramisches Werkzeug mit Rissen (nach dem Schweißen) | 34 |
| Abbildung 5-4: Komplexer Verschleiß, Wirkung von tribo-chemischen Effekten | 35 |
| Abbildung 5-5: Korrosionsfläche (Kontaktfläche mit Stahl)..... | 36 |
| Abbildung 5-6: Keramisches Werkzeug (Werkzeugeinsatz) der zweiten Generation..... | 37 |
| Abbildung 5-7: Einbau des keramischen Werkzeuges in den Werkzeughalter..... | 38 |
| Abbildung 5-8: Keramisches Werkzeug aus Si_3N_4 nach 5,0 Meter Schweißnaht | 38 |
| Abbildung 5-9: FSW-Naht an 8,0 mm S355JR unmittelbar nach dem Schweißen | 39 |
| Abbildung 5-10: Zugprüfung an 8,0 mm S355JR, Versagen im Grundwerkstoff | 39 |
| Abbildung 5-11: Biegeprüfung an 8,0 mm S355JR, ohne Anrisse..... | 40 |
| Abbildung 5-12: Versuch CS-3-6, 28 kN, 1000 mm/min | 41 |
| Abbildung 5-13: Zugversuche FSW Stumpfnahht S185 / Diagramm..... | 42 |
| Abbildung 5-14: Makrountersuchung S185..... | 42 |
| Abbildung 5-15: FSW-Versuchsanlage bei ESAB in Laxa, Schweden | 43 |
| Abbildung 5-16: Versuch 10.3, 32 kN, 240 mm/min | 44 |
| Abbildung 5-17: Zugversuche FSW Stumpfnahht S355MC/ Diagramm | 45 |
| Abbildung 5-18: Makrountersuchung S355MC | 46 |
| Abbildung 5-19: Versuch 13, 39 kN, 240 mm/min | 46 |
| Abbildung 5-20: Zugversuche FSW Stumpfnahht S690QL/ Diagramm | 48 |
| Abbildung 5-21: Makrountersuchung S690QL..... | 48 |
| Abbildung 5-22: Versuch 7, 62 kN, 180 mm/min | 49 |
| Abbildung 5-23: Zugversuche FSW Stumpfnahht X5CrNi18-10 / Diagramm | 50 |
| Abbildung 5-24: Makrountersuchung X5CrNi18-10 | 51 |
| Abbildung 5-25: Versuch 3, 63 kN, 90 mm/min | 51 |
| Abbildung 5-26: Zugversuche FSW Überlappstoß H800 / Diagramm | 53 |
| Abbildung 5-27: Makrountersuchung H800 | 53 |

List of figures

| | |
|---|----|
| Figure 1-1: Typical tools for friction stir welding on steel, left pcBN (source ESAB), right metallic tool (source SLV B-B)..... | 4 |
| Figure 2-1: Welding a steel (S235JR, t = 5.0 mm), left with pcBN tool and shielding gas cover (source HZG), right WRe-tool without shielding gas (source SLV B-B) | 7 |
| Figure 3-1: Methodological approach | 10 |
| Figure 3-2: Schedule for the implementation of the project | 11 |
| Figure 3-3: X-ray image with ceramic particles, tool and DIN bar | 14 |
| Figure 3-4: Tensile test at room temperature (S235JR, Test 4) | 15 |
| Figure 3-5: Tensile test at 1200°C (S235JR, Test 3)..... | 15 |
| Figure 3-6: Tensile test at room temperature (X5CrNi18-10, Test 7) | 16 |
| Figure 3-7: Tensile test at 1200°C (X5CrNi18-10, Test 9)..... | 16 |
| Figure 3-8: Notched bar impact test at 1100°C (right: S235JR, left: X5CrNi18-10).... | 17 |
| Figure 3-9: FSW with WRe05-Tool | 20 |
| Figure 3-10: FSW with Ta-Tool | 21 |
| Figure 4-1: Optical quantification of wear with the aid of a profilometer | 25 |
| Figure 4-2: Temperature influence on the thermochemical resistance of ceramic tool materials against steel at the example of silicon nitride..... | 26 |
| Figure 4-3: Influence of the ceramic material on the thermochemical resistance against steel | 26 |
| Figure 4-4: Experimental setup of the test weld with FSW system (left), tool with holder (middle) and the test sheet (right)..... | 27 |
| Figure 4-5: Tool and equipment during a test..... | 27 |
| Figure 4-6: Behavior of the ceramics under real conditions | 28 |
| Figure 4-7: Tool after aprox. 9.5 meters of weld length..... | 29 |
| Figure 4-8: Macroscopic examination and tensile test (S355JR, t = 8 mm) | 29 |
| Figure 4-9: FSW tool made of WC-ZrO ₂ | 30 |
| Figure 5-1: Drawing of the first ceramic tool inserts | 33 |
| Figure 5-2: Ceramic tool (tool insert) of the first generation | 34 |
| Figure 5-3: Ceramic tool with cracks (after welding) | 34 |
| Figure 5-4: Complex wear, effect of tribo-chemical effects..... | 35 |

| | |
|--|----|
| Figure 5-5: Corrosion surface (contact surface with steel) | 36 |
| Figure 5-6: Ceramic tool (tool insert) of the second generation | 37 |
| Figure 5-7: Installation of the ceramic tool in the tool holder..... | 38 |
| Figure 5-8: Ceramic tool made of Si ₃ N ₄ after 5.0 meter weld seam..... | 38 |
| Figure 5-9: FSW seam on 8.0 mm S355JR immediately after welding..... | 39 |
| Figure 5-10: Tensile test on 8.0 mm S355JR, failure in base material | 39 |
| Figure 5-11: Bending test on 8.0 mm S355JR, without cracks | 40 |
| Figure 5-12: Test CS-3-6, 28 kN, 1000 mm/min..... | 41 |
| Figure 5-13: Tensile tests FSW butt weld S185 / chart..... | 42 |
| Figure 5-14: Macro examination S185..... | 42 |
| Figure 5-15: FSW test facility at ESAB in Laxa, Sweden..... | 43 |
| Figure 5-16: Test 10.3, 32 kN, 240 mm/min | 44 |
| Figure 5-17: Tensile tests FSW butt weld S355MC chart..... | 45 |
| Figure 5-18: Macro examination S355MC | 46 |
| Figure 5-19: Test 13, 39 kN, 240 mm/min | 46 |
| Figure 5-20: Tensile tests FSW butt weld S690QL chart..... | 48 |
| Figure 5-21: Macro examination S690QL | 48 |
| Figure 5-22: Test 7, 62 kN, 180 mm/min | 49 |
| Figure 5-23: Tensile tests FSW butt weld X5CrNi18-10 / chart | 50 |
| Figure 5-24: Macro examination X5CrNi18-10 | 51 |
| Figure 5-25: Test 3, 63 kN, 90 mm/min | 51 |
| Figure 5-26: Tensile tests FSW lap joint H800 / chart | 53 |
| Figure 5-27: Macro examination H800 | 53 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 3-1: Wesentliche Inhalte der Versuchsplanung (DoE)..... | 12 |
| Tabelle 3-2: Untersuchte Stähle für diese Versuche | 14 |
| Tabelle 3-3: Ergebnisse Kerbschlagbiegeversuch | 17 |
| Tabelle 4-1: Materialeigenschaften der getesteten Keramiken | 24 |
| Tabelle 4-2: Materialeigenschaften des WC-ZrO ₂ im Vergleich zu pcBN..... | 31 |
| Tabelle 5-1: Parameter für S185, Blechdicke 2,4 mm | 41 |
| Tabelle 5-2: Zugversuche FSW Stumpfnahht S185/ Test mit Extensometer..... | 41 |
| Tabelle 5-3: Parameter für S355MC, Blechdicke 6,0 mm | 44 |
| Tabelle 5-4: Zugversuche FSW Stumpfnahht S355MC/ Test mit Extensometer | 45 |
| Tabelle 5-5: Parameter für S690QL, Blechdicke 6,0 mm | 47 |
| Tabelle 5-6: Zugversuche FSW Stumpfnahht S690QL/ Test mit Extensometer | 47 |
| Tabelle 5-7: Parameter für X5CrNi18-10 Blechdicke 5,0 mm..... | 49 |
| Tabelle 5-8: Zugversuche FSW Stumpfnahht X5CrNi18-10 / Test mit Extensometer | 50 |
| Tabelle 5-9: Parameter für H800, Gesamtblechdicke 5,0 mm..... | 52 |
| Tabelle 5-10: Zugversuche FSW Überlappstoß H800..... | 52 |

List of tables

| | |
|--|----|
| Table 3-1: Essential contents of the design of experiments (DoE) | 12 |
| Table 3-2: Steels examined for these tests..... | 14 |
| Table 3-3: Results notched bar impact test | 17 |
| Table 4-1: Material properties of the tested ceramics | 24 |
| Table 4-2: Material properties of WC-ZrO ₂ compared to pcBN..... | 31 |
| Table 5-1: Parameters for S185, sheet thickness 2.4 mm | 41 |
| Table 5-2: Tensile tests FSW butt weld S185/ test with extensometer | 41 |
| Table 5-3: Parameters for S355MC, sheet thickness 6.0 mm | 44 |
| Table 5-4: Tensile tests FSW butt weld S355MC test with extensometer | 45 |
| Table 5-5: Parameters for S690QL, sheet thickness 6.0 mm | 47 |
| Table 5-6: Tensile tests FSW butt weld S690QL / test with extensometer | 47 |
| Table 5-7: Parameters for X5CrNi18-10, sheet thickness 5.0 mm..... | 49 |
| Table 5-8: Tensile tests FSW butt weld X5CrNi18-10 / test with extensometer..... | 50 |
| Table 5-9: Parameters for X5CrNi18-10, total sheet thickness 5.0 mm..... | 52 |
| Table 5-10: Tensile tests FSW lap joint H800..... | 52 |

Abkürzungsverzeichnis / Abbreviations and symbols

| | |
|----------------|---|
| % | Prozent |
| ° | Grad |
| °C | Grad Celsius |
| µm | Mikrometer |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | circa |
| ccw | conter clock way |
| CrNi | Chrom-Nickel-Stahl |
| cw | Clock way |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| DoE | Design of experiments |
| et al. | et alii / et aliae; und andere |
| etc. | et cetera |
| FGK | Forschungsinstitut für Anorganische Werkstoffe -Glas/Keramik- GmbH |
| FSW | Friction Stir Welding, Rührreischweißen |
| GSI | Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH |
| HRC | Härte nach Rockwell |
| HV | Härte nach Vickers |
| k _f | Fließspannung |
| m | Meter |
| m/min | Meter pro Minute |
| mm/min | Millimeter pro Minute |
| mm/s | Millimeter pro Sekunde |
| MPa | Megapascal |
| N | Newton |
| N/mm | Newton pro Millimeter |
| NL | Niederlassung |
| Nm | Newtonmeter |
| PA | Projektbegleitender Ausschuss |
| pcBN | polykristallines kubisches Bornitrid |
| R _e | Streckgrenze |
| R _m | Zugfestigkeit |
| s | Blechdicke |
| SLV | Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt |

Verzeichnisse /
Lists

| | |
|-----------------|---|
| SLV B-B | Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Berlin-Brandenburg |
| t | Blechdicke |
| Ta | Tantal |
| Tailored Blanks | Englisch, Maßgeschneidertes Bauteil aus verschiedenen Blechdicken |
| TWI Ltd | The Welding Institute, Great Abington bei Cambridge, UK |
| TZM | Molybdänlegierung (Titan-Zirkonium-Molybdän) |
| u.a. | unter anderem |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| W-Re | Wolfram-Rhenium |
| ZfP | Zerstörungsfreie Prüfung |
| ZP | Zerstörende Prüfung |

1 Einleitung / Introduction

Kurzfassung

Das Rührreibschweißen hat sich in den letzten Jahren als zukunftssträchtiges Schweißverfahren in der aluminium- und magnesiumverarbeitenden Industrie etabliert. Es zeichnet sich insbesondere durch hohe Wirtschaftlichkeit und seine besonders guten Schweißnahtqualitäten aufgrund des nicht schmelzflüssigen Schweißprozesses und daraus resultierenden geringen Wärmeeintrag aus. Das Verfahren ermöglicht es, Werkstoffe ohne besondere Nahtvor- bzw. Nachbearbeitung einlagig problemlos zu schweißen. Ziel dieses Projektes ist es, diese Vorteile auch für allgemeine Baustähle bis hin zu höherfesten Stählen industriell nutzen zu können. Zur wirtschaftlichen Umsetzung an Stählen sind zudem Entwicklungen im Bereich der Rührreibwerkzeuge erforderlich. Die bis dato untersuchten und eingesetzten Werkstoffe zeigen keine ausreichende Beständigkeit bzw. sind nicht in gleichbleibender Qualität verfügbar. Im Projekt werden keramische Werkstoffe auf deren Eignung hin untersucht und durch gezielte Anpassung der Werkstoffeigenschaften Systeme entwickelt, welche den hohen Anforderungen des Schweißprozesses Stand halten. Hierbei wird insbesondere die Wechselwirkung des thermomechanischen Verhaltens der zu schweißenden Stähle auf die Prozessparameter und der Nahtqualität betrachtet. Ziel ist es, der stahlverarbeitenden Industrie neue Fügемöglichkeiten aufzuzeigen und im Werkzeugbereich mit den aktuell besten Rührreibwerkzeugen aus pcBN gleichzuziehen, wobei die Verfügbarkeit und Anschaffungskosten von keramischen Werkzeugen deutlich günstiger sind.

Abstract

Friction stir welding has established itself in recent years as a promising welding process in the aluminum and magnesium processing industry. It is characterized in particular by high efficiency and its particularly good weld seam qualities due to the non-melting welding process and the resulting low heat input. The process enables materials to be welded in a single layer without any special pre-welding or finishing work. The aim of this project is to make industrial use of these advantages also for general structural steels up to higher strength steels. For the economic implementation on steels, developments in the field of friction stir tools are also required. The materials investigated and used so far do not show sufficient resistance or are not available in constant quality. In the project, ceramic materials are examined for their suitability and systems are developed by specific adaptation of the material properties, which can withstand the high demands of the welding process. The interaction of the thermomechanical behavior of the steels to be welded on the process parameters and the seam quality is of particular

interest. The aim is to show the steel-processing industry new joining possibilities and, in the tool sector, to bring them up to par with the best current friction stir tools made of pcBN, whereby the availability and acquisition costs of ceramic tools are significantly lower.

1.1 Problemstellung / Problem definition

Eines der wichtigsten Entwicklungsziele der nächsten Jahre für das Rührreibschweißen (FSW - Friction Stir Welding) ist die wirtschaftliche Erweiterung der Anwendungspalette bis hin zu Stahlwerkstoffen, auch mit hohen Festigkeiten. Die bisherigen Vorteile des Rührreibschweißens gegenüber anderen Schweißverfahren sind aktuell vor allem beim Schweißen von Aluminiumwerkstoffen /1, 2/ anzutreffen. Als Beispiele dazu sollen hier kurz folgende Tatsachen angesprochen werden: Kein Aufschmelzen, geringe thermische Belastung, einlagiges Schweißen auch bei größeren Blechdicken, sehr geringer Verzug bzw. Schrumpfung und umweltpolitisch betrachtet auch keine Emissionen, Rauche, Stäube oder Strahlung. Der wirtschaftliche Aspekt ist ebenfalls nicht zu vernachlässigen. Es kommen im Regelfall keine Hilfsstoffe wie beispielsweise Schweißzusatzwerkstoffe oder Pulver zum Einsatz. Das alles geht mit einer hohen inneren und äußeren Nahtgüte einher, wodurch auch der bis dato eventuell anfallende hohe zeitliche Aufwand einer Nachbearbeitung oder Reparatur (z.B. Lagebindefehler) an den Schweißnähten entfällt. Der sich ausbildende Gefügestand sorgt bei den bereits untersuchten Werkstoffsystemen für eine hohe Festigkeit der Verbindungen. Diese, aber auch andere Vorteile lassen sich durchaus auf Stahlwerkstoffe übertragen. Andere Vorteile wären z.B. der Wegfall von Vorwärmen, Wärmeführung während des Prozesses oder auch aufwendiges Richten (z.B. Flammrichten) nach dem Schweißen was insgesamt zusätzlich Energie verbraucht und damit scheinbar energiearme Verfahren (z.B. MAG-Schweißen) wirtschaftlich gesehen in ein anderes Licht rückt. Beim Verschweißen von großen Stahlblechverkleidungen kommt es nicht zum „Knittern“ oder „Beulen“ an den Bauteilen. Damit sind also auch optische Vorteile, gerade bei größeren Bauteilen, möglich. Zu FSW an Stahl gibt es einige Erfahrungen und bereits experimentelle Anwendungen /3, 4, 5, 6/. Eine wachsende Zahl von Anfragen, hauptsächlich aus den Bereichen Schiffbau, Offshore, Fahrzeugbau und Sonderanwendungen zeigt, dass das Interesse der Industrie auf diesem Gebiet sehr groß ist. Es werden Stahlverbindungen normaler Güten (S235 und S355) angefragt, aber auch Stahlwerkstoffe mit sehr hohen Festigkeiten wie z.B. Feinkornbaustähle der Güten S690 oder S700. Weiter gefragt sind auch Tailored Blanks und Mischverbindungen mit anderen Werkstoffen, z.B. mit Aluminium oder Kupfer /6/. Labortechnisch wurde bisher nicht viel davon umgesetzt und die eigentlich wichtige Umsetzung der bisherigen Erfahrungen in die Industrie fand noch nicht statt. Ein wesentlicher Umstand dafür ist in den für das Rührreibschweißen verwendeten Werkzeugsystemen bzw. Werkzeugwerkstoffen zu sehen. Beim Rührreibschweißen wird durch gleichzeitige Druckbeaufschlagung und Friktion Wärme

erzeugt die zum Erweichen (Plastifizieren) der zu verschweißenden Werkstücke führt. Durch das Rühren des Werkzeuges in dem plastifizierten Metall kommt es zur Verbindung der Bauteile. Während des Rührreibschweißprozesses an Stahl ist das Werkzeug enorm hohen Temperaturen $\sim 1200^{\circ}\text{C}$ (bei z.B. Aluminium nur $\sim 500^{\circ}\text{C}$) und korrosivem sowie abrasivem Verschleiß ausgesetzt. Die Anforderungen in Bezug auf mechanische, chemische und tribologische Beständigkeit bei hohen Temperaturen erfordern Werkstoffsysteme mit herausragenden Eigenschaften. Aktuell kommen neben metallischen Sonderwerkstoffen z.B. Wolfram-Rhenium (WRe), Tantalbasiswerkstoffe (Ta) und Vollhartmetalle (VHM), Werkzeuge aus polykristallinem kubischem Bornitrid (pcBN) zum Einsatz (Abbildung 1-1). Diese pcBN-Werkzeuge sind aber kostenintensiv, kommerziell sehr schlecht verfügbar und zeigen insbesondere durch ihre geringe mechanische Festigkeit und durch das spröde Bruchverhalten nur unzureichende Anwendbarkeit für großtechnische Schweißanwendungen. Auch die metallischen Sonderwerkstoffe sind gegenüber dem pcBN nicht unbedingt preiswerter, sind ähnlich schlecht beziehbar und besitzen nur eine geringe Haltbarkeit von wenigen Metern bei hohen Kosten.

1.2 Motivation / Motivation

Die Problematiken beim Rührreibschweißen von Stahl wurden oben bereits angesprochen, hohe Temperatur bei gleichzeitiger mechanischer, chemischer und tribologischer Belastung. Auch wenn die vorhandenen Werkstoffsysteme sicherlich für das Rührreibschweißen von Stahl unter Laborbedingungen geeignet sind, kann nicht von einer alltäglichen Gebrauchseigenschaft gesprochen werden. Gerade KMU sind heute wettbewerblichen Bedingungen unterworfen, die ständige Verfügbarkeit, einfache Handhabung und sichere Ergebnisse fordern. pcBN, Wolfram, Tantal und auch die Gruppe der Vollhartmetalle können das nicht.

Keramische Werkstoffsysteme dagegen haben bereits in vielen Bereichen der Stahlherstellung- und Verarbeitung ihr Einsatzpotential und insbesondere ihre Wirtschaftlichkeit unter Beweis gestellt. Ausgehend von den im Bereich der Schmelzmetallurgie eingesetzten Materialien in Ausmauerungen von Hochöfen und Gießanlagen bis hin zu Hochleistungszerspannungswerkzeugen wurde die Leistungsfähigkeit keramischer Werkstoffe in Wechselwirkung mit Stahl nachgewiesen.

Keramische Werkstoffe zeigen ein hohes Potential, das Rührreibschweißen für die Anwendungspalette der Stahlwerkstoffe sowohl technologisch als auch wirtschaftlich zu entwickeln. Neben der generellen Gestaltung des Rührreibschweißprozesses für verschiedene Stahlwerkstoffe war die Entwicklung keramischer Rührreibwerkzeuge einer der Motivationsgründe für dieses Projekt.



Abbildung 1-1: Typische Werkzeuge für Rührreisschweißen an Stahl, links pcBN (Quelle ESAB), rechts metallisches Werkzeug (Quelle SLV B-B)

Figure 1-1: Typical tools for friction stir welding on steel, left pcBN (source ESAB), right metallic tool (source SLV B-B)

1.3 Zielsetzung / Objective

Die Zielsetzung des Projektes war in zwei Bereiche unterteilt und wurde von den beiden Forschungseinrichtungen in Kooperation erarbeitet.

Zielsetzung des durch die SLV hauptverantwortlich bearbeiteten Bereiches, gleichzeitig auch das übergeordnete Ziel, war die Übertragung des Rührreisschweißprozesses hinein in die Anwendungspalette der Stahlwerkstoffe und hier im Wesentlichen auf die folgenden geplanten Werkstoffsysteme:

Gruppe 1 Baustähle

- S235JR / 1.0038 (unlegierter Baustahl nach DIN EN 10025-2, Referenzmaterial für vergleichende Schweißungen).
- S460NL / 1.8903 (normalgeglühter Feinkornbaustahl nach DIN EN 10025-3).
- S690QL / 1.8928 (vergüteter hochfester Feinkornbaustahl nach DIN EN 10025-6).
- S700MC / 1.8974 (hochfester Stahl nach DIN EN 10149-2, geeignet zum Kaltumformen, thermomechanisch gewalzt).

Gruppe 2 Nichtrostende austenitische Stähle:

- X5CrNi18-10 / 1.4301 (bekanntester der austenitischen Chrom-Nickel-Stähle, genormt nach EN 10088-3, gute Verarbeitbarkeit, attraktives Aussehen, polierbar).
- X6CrNiMoTi17-12-2 / 1.4571 (CrNi-Stahl nach DIN EN 10088-3, höherwertig als 1.4301, sehr gute Korrosionsbeständigkeit, minimierte Empfindlichkeit bei schweißtechnischer Verarbeitung, nicht polierbar).
- X2CrNiMoN22-5-3 / 1.4462 (austenitisch-ferritischer (DUPLEX) Stahl nach DIN EN 10088-3, hohe Korrosionsbeständigkeit bei guter Festigkeit).

Gruppe 3 Dualphasenstähle:

- HCT600X (prEN 10338 :2009, kaltgewalzt, besonders für Fertigung von Struktur-und Sicherheitsbauteilen, Automobilbau).
- HDT580X (prEN 10338 :2009, warmgewalzt, aufgrund seiner hohen mechanischen Werte an Strukturteilen Gewichtseinsparungen, Automobilbau).

Diese Planung beinhaltet weiterhin die Definition von Standardparametern zur Durchführung gängiger Schweißverbindungen (z.B. Stumpfstoß) der ausgewählten Stähle in Abhängigkeit von deren Werkstoffdicken. Für dieses Forschungsprojekt wurden ursprünglich zwei Werkstoffdicken vorgesehen, 2,0 und 6,0 mm. Bei sinnvoll erscheinenden Ausnahmen konnte auch davon abgewichen werden. Im Laufe des Projektes wurden deshalb teilweise die Stahlsorten bzw. die Werkstoffdicken geändert. Das geschah in Absprache o.a. auf Forderung des PA. Grundsätzliche Parameter für eventuell andere Werkstoffdicken lassen sich später aus dem dann vorhandenen Wissen ableiten.

Die Zielsetzung des zweiten Teilbereiches, die Entwicklung keramischer Werkzeuge mit hohen Prozessstandzeiten für das Rührreischweißen von Stahlwerkstoffen, wurde unter der Verantwortung des FGK in Höhr-Grenzhausen bearbeitet. Ausgehend von einer phänomenologischen Betrachtung des Schweißprozesses und annähernden Definition des Anforderungsprofils (thermisch, mechanisch und chemische Anforderungen) wurden gezielt Werkstoffsysteme und deren prinzipielles Einsatzpotential abgeschätzt.

Die Identifizierung und Entwicklung eines geeigneten Werkstoffsystems für die Werkzeuge des Rührreischweißens von Stahl war hier eine zwingend erforderliche Maßnahme zur wirtschaftlichen Umsetzung des FSW-Prozesses und damit für den Erfolg des Forschungsvorhabens.

Alle Annahmen und Hypothesen wurden wissenschaftlich bewiesen bzw. einzelne Entwicklungen verworfen, sodass ein Einzug der Erkenntnisse in Datenblätter, Richtlinien, Normen usw. seriös möglich ist.

2 Stand der Technik / State of the art

Kurzfassung

Rührreibschweißen wurde im Jahr 1991 von TWI (The Welding Institute, <http://www.twi.co.uk>) erfunden und inzwischen so weit entwickelt, dass es in vielen Industriezweigen in der Serienproduktion eingesetzt wird. Zum Beispiel werden aus Strangpressprofilen große Paneele, die u.a. im Schiff- und Schienenfahrzeugbau eingesetzt werden, mittels des FSW-Verfahrens hergestellt. Die Automobilzulieferindustrie verwendet das Rührreibschweißen für die Großserienfertigung von z.B. Kraftstofftanks, Türen, Hauben, Leichtmetallfelgen, Spurstangen und Rücksitzlehnen. In der Raumfahrt sind werden große Raketentanks aus hochfesten Aluminiumlegierungen rührreibgeschweißt. Flugzeugbauer setzen das Verfahren u.a. beim Bau von Transportflugzeugen und Hubschraubern ein. Zwischenzeitlich konnten auch Anwendungen für Kupfer und Magnesium gefunden werden. Als Verfahren für das Schweißen von Stählen konnte sich das Rührreibschweißen bisher noch nicht etablieren. Dieses Forschungsvorhaben leistet dazu einen Beitrag, auch hier Möglichkeiten und zukünftige Geschäftsfelder aufzuzeigen.

Abstract

Friction stir welding was invented in 1991 by TWI (The Welding Institute, <http://www.twi.co.uk>) and has since been developed to such an extent that it is used in series production in many branches of industry. For example, the FSW process is used to produce large panels from extruded profiles, which are used in shipbuilding and rail vehicle construction, among other applications. The automotive supply industry uses friction stir welding for the large series production of e.g. fuel tanks, doors, hoods, light alloy rims, tie rods and rear seat backs. In space travel, large rocket tanks made of high-strength aluminum alloys are friction stir welded. Aircraft manufacturers use the process in the construction of transport aircraft and helicopters, among other things. In the meantime, applications for copper and magnesium have also been found. Friction stir welding has not yet established itself as a process for welding steels. This research project contributes to the identification of possibilities and future business areas.

2.1 Grundlagen des Rührreibschweißens an Stahl / Basics of Friction Stir Welding on steel (FSW)

Das Rührreibschweißen (FSW, Friction Stir Welding) wurde 1991 am TWI Ltd (The Welding Institute, Great Abington bei Cambridge) in Großbritannien entwickelt und ist mittlerweile ein weltweit verbreitetes Verfahren zum Schweißen von Aluminium- und

Kupferstrukturen. Das Verfahren besteht dabei durch die hohen Schweißnahtqualitäten bei gleichzeitig geringstem Aufwand der Nahtvorbereitung und Nachbearbeitung. Zudem sind Schweißnähte bei hohen Blechdicken bis 50,0 mm wirtschaftlich im einlagigen Prozess realisierbar /7, 8, 9, 10/.

In zahlreichen Untersuchungen wurde bereits die Übertragbarkeit von FSW auf das Schweißen von Stahlstrukturen untersucht. Neben den klassischen Baustählen /10, 11/ wurde auch die prinzipielle Schweißbarkeit bei verschiedenen Stahlsystemen nachgewiesen, u.a. an nichtrostenden austenitischen Stählen (Chrom-Nickel-Stahl) /12, 13/ und Dualphasen-Stählen /14/.



Abbildung 2-1: Schweißen eines Stahls (S235JR, t = 5,0 mm), links mit pcBN-Werkzeug und Schutzgasabdeckung (Quelle HZG), rechts WRe-Werkzeug ohne Schutzgas (Quelle SLV B-B)

Figure 2-1: Welding a steel (S235JR, t = 5.0 mm), left with pcBN tool and shielding gas cover (source HZG), right WRe-tool without shielding gas (source SLV B-B)

Aufgrund der höheren Schweißtemperatur während des Prozesses (Abbildung 2-2) und der damit einhergehenden höheren Belastung der Schweißwerkzeuge sind Anwendungen dieser Schweißungen aktuell nur eingeschränkt umsetzbar. Somit kommt der Belastung des Werkzeuges und deren Wechselwirkung mit dem zu schweißenden Werkstück eine besondere Bedeutung zu /15/. Als aktueller Standard wird die Nutzung von pcBN-Werkzeugen (Werkzeugeinsätze aus polykristallinen kubischem Bornitrid) angesehen /16, 17/. pcBN weist auf Grund seiner atomaren Struktur eine sehr hohe Härte und damit einhergehende exzellente Verschleißbeständigkeit auf, besitzt jedoch die für keramische Hartstoffe übliche Sprödigkeit, weshalb es während des Einsatzes bei Überlast zum Bruch dieser Einsätze kommt. Erschwerend hinzu kommen die hohen Werkzeugkosten (3.000,- bis 4.000,- Euro pro Werkzeug) in Verbindung mit den fertigungsbedingten Qualitätsschwankungen. Zur Reduzierung der Werkzeugbelastung wurden im Rahmen des EU-Projektes SOLVSTIR /18/ Untersuchungen zur Erhöhung der Lebensdauer der eingesetzten Werkzeuge durch lokale Vorwärmung durchgeführt. Ähnliche Untersuchungen gab es im Rahmen eines Forschungsprojektes /5/ auch in der SLV Berlin-Brandenburg. Zudem wurde dort der Einsatz hochschmelzender metallischer Werkstoffsysteme (z.B. W-Re oder Ta) untersucht /19/. Hierbei konnten keine Erhöhung der Standzeit im Vergleich zum pcBN erzielt werden. Neben der Werkzeuggeometrie wurden zum Teil Verbundstrukturen wie TZM-Schulterwerkstoff (Molybdänbasislegierung) und WRe-Schweißstiftwerkstoff untersucht. Damit konnten

zwar leichte Verbesserungen der Standzeiten erzielt werden, jedoch stellte sich identisch zum pcBN ein großer Einfluss des Werkzeugverschleißes auf die Nahtqualität ein /20, 21, 22/. Somit ist es zwingend erforderlich den Verschleiß an den Rührreibwerkzeugen und die damit einhergehenden Faktoren einer Verschlechterung der Schweißnahtqualität wesentlich zu reduzieren. Derartige Maßnahmen würden entscheidend zur Kostenreduzierung und wirtschaftlichen Umsetzung des FSW-Verfahren an Stählen beitragen. Hierbei stehen sowohl die Prozessparameter und damit das Verständnis über die Abhängigkeit der Schweißparameter vom zu schweißenden Werkstoffsystem (Stahl) sowie die Beständigkeit der eingesetzten Werkzeugwerkstoffe im Vordergrund. Trotz Wichtigkeit wurde diese Problematik bislang noch nicht ausreichend wissenschaftlich untersucht, so dass noch keine ausreichenden fundierten Erkenntnisse und Untersuchungen vorliegen.

3 Vorgehensweise und Versuchsplanung / Approach and design of experiments

Kurzfassung

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes gliederten sich in mehrere Abschnitte. Zunächst wurde der Lösungsweg durchdacht und festgelegt. Dazu wurde zuerst ein methodischer Ansatz erarbeitet. Dieser Ansatz ist dann in Folge zu einem Ablaufplan erweitert worden, der dann kontinuierlich in enger Rücksprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses an die Bedürfnisse der Wirtschaft angepasst wurde. Als nächstes wurde eine statistische Versuchsplanung erstellt, um den zeitlichen, personellen und technischen Rahmen besser einschätzen zu können. Sämtliche Arbeiten und Untersuchungen beider Forschungseinrichtungen liefen dann auch nach diesen Plänen ab. Die SLV Berlin-Brandenburg und das FGK in Höhr-Grenzhausen informierten sich entsprechend über die erreichten Ergebnisse, legten die weiteren Entwicklungsschritte fest, so dass letztlich aus den ersten Versuchen Parameter entstanden, die sowohl für die Entwicklung der keramischen Werkzeuge entscheidend waren, aber auch die eigentlichen Schweißungen der einzelnen Stähle wesentlich beeinflussten. Darüber hinaus beinhaltet dieses Kapitel die Ergebnisse aus sämtlichen schweißtechnischen Vorversuchen.

Abstract

The investigations within the framework of this project were divided into several sections. First of all, the solution path was thought through and determined. For this purpose, a methodical approach was first developed. This approach was then expanded into a schedule, which was then continuously adapted to the needs of the economy in close consultation with the members of the project-accompanying committee. Next, a statistical experimental design was drawn up in order to better estimate the time, personnel and technical framework. All the work and investigations of both research institutions then proceeded according to these plans. The SLV Berlin-Brandenburg and the FGK in Höhr-Grenzhausen informed themselves accordingly about the results achieved, defined the further development steps, so that in the end, parameters emerged from the first tests which were decisive for the development of the ceramic tools, but also had a significant influence on the actual welding of the individual steels. In addition, this chapter contains the results of all preliminary welding tests.

3.1 Vorgehensweise / Approach

3.1.1 Lösungsweg / Solution

Um den Lösungsweg möglichst genau zu definieren, wurde ein methodischer Ansatz entwickelt, Abbildung 3-1. Dieser zeigt grob die einzelnen Arbeitsschritte und verschaffte den Forschungsstellen den notwendigen Überblick.



Abbildung 3-1: Methodischer Ansatz

Figure 3-1: Methodological approach

Dieser methodische Ansatz wurde zu einem detaillierten Ablaufplan (Abbildung 3-2) weiterentwickelt. Alle weiteren Arbeiten stützten sich im Wesentlichen darauf. Durch regelmäßige Absprachen unter den Forschungseinrichtungen und den Mitgliedern des PA konnten dadurch praxisnahe und für die Wirtschaft wichtige Problemstellungen erfolgreich bearbeitet werden.

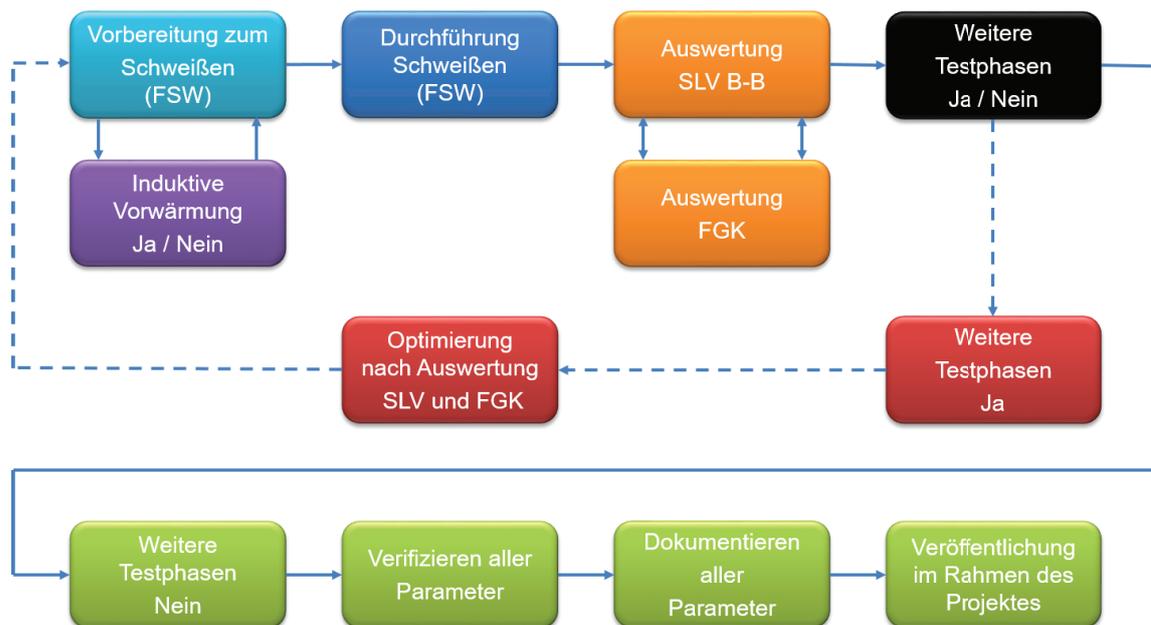


Abbildung 3-2: Ablaufplan zur Durchführung des Projektes

Figure 3-2: Schedule for the implementation of the project

Mit einer statistischen Versuchsplanung (DoE) wurde im Anschluss mit wenigen Versuchen der Wirkzusammenhang zwischen Einflussfaktoren und Zielgrößen beim FSW von Stahl möglichst genau ermittelt. Da auch diese Versuche schon endliche Ressourcen benötigten (Zeit, Personal, Geräte usw.), war es notwendig einerseits die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der erwarteten Ergebnisse und andererseits dem dazu notwendigen Aufwand genau zueinander abzuwägen. Dazu wurden dazu kurze Versuchspläne für die einzelne Stähle erstellt. Es wurde vor allem darauf geachtet hier keine umfangreiche Parameterstudie zu planen, sondern nur auf eine Ermittlung sicherer Grundparameter (unter Einbeziehung des wirtschaftlichen Aspektes) abgezielte Schweißversuche durchzuführen, die letztlich für die angestrebten Forschungsergebnisse, sowohl für das Rührreibschweißen von Stählen als auch für die hierzu notwendige Entwicklung der keramischen Werkzeuge, eine entscheidende Wirkung entwickeln könnten.

Die aufzustellenden Inhalte der DoE (Tabelle 3-1) haben folgende Punkte erfasst: Präzisierung der Stahlsorten und Dicken (Änderungen wurden in Absprache mit dem PA vorgenommen), der Probenumfang, Rührreibwerkzeuge für das FSW, Probenplan der Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP, z.B. Durchstrahlungsprüfung), Probenplan der Zerstörungen Prüfung (ZP, z.B. Zug- und Biegeprüfung, Schliffe). Den Abschluss bildete hier die schweißtechnische Herstellung eines Referenzbauteiles in Absprache mit dem PA, (geschweißtes Blech, $t = 8,0$ mm, S355, beidseitig geschweißt).

Tabelle 3-1: Wesentliche Inhalte der Versuchsplanung (DoE)
 Table 3-1: Essential contents of the design of experiments (DoE)

| Stahlsorte (t = 2 mm) | Anzahl d. Pro5ben je Tool- Werkstoff | ZfP | ZP | FSW-Tool Werkstoff |
|--------------------------|--|---------------|-------------------|-----------------------|
| S235 | 4 | Sicht/Röntgen | Zug/Biege/Schliff | WRe05 |
| CrNi18-10 | 4 | Sicht/Röntgen | Zug/Biege/Schliff | WRe05 |
| Auswertung | Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse und Wertung | | | |
| Stahlsorte t = 4 mm | | | | |
| S235 | 4 | Sicht/Röntgen | / | WRe05 / Ta |
| S355 | 4 | Sicht/Röntgen | Zug/Biege/Schliff | WRe05 / Ta |
| CrNi18-10 | 4 | Sicht/Röntgen | Zug/Biege/Schliff | WRe05 / Ta |
| Mischverbindung | 4 | Sicht/Röntgen | / | WRe05 / Ta |
| Auswertung | Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse und Wertung | | | |
| Stahlsorte t = 5 mm | | | | |
| S235 | 2 | Sicht/Röntgen | Zug/Biege/Schliff | Ta |
| S355 | 4 | Sicht/Röntgen | Zug/Biege/Schliff | Ta |
| CrNi18-10 | 4 | Sicht/Röntgen | Zug/Biege/Schliff | Ta |
| Mischverbindung | 4 | Sicht/Röntgen | Zug/Biege/Schliff | Ta |
| Auswertung | Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse und Wertung | | | |

Um dem FGK gesicherte Daten für Entwicklung der keramischen Werkstoffe zu liefern, wurde für diese Untersuchungen mit den metallischen Sonderwerkstoffen Wolfram-Rhenium und einer Tantalbasislegierung gearbeitet. Um die DoE nicht mit zu vielen Fakten, Ergebnissen usw. nicht zu überfrachten wurde Folgendes berücksichtigt:

- Die Anzahl und die Art der zu untersuchenden Faktoren ist auf das für eine statistische Sicherheit unbedingt Notwendigste zu beschränken.
- Die für die späteren keramischen Werkzeuge wichtigen Parameter (Drehzahl, Axialkraft, Schweißgeschwindigkeit) sind herauszuarbeiten.
- Auf bestehende Informationen der beiden Forschungsstätten, Literatur, Normen oder Werkstoffblätter und dem Wissen aus den Reihen des PA ist vorrangig zurückzugreifen.

Diese Informationen betrafen in erster Linie die geplanten Stahlwerkstoffe (siehe Kapitel 1.3, Zielsetzung) und deren Verhalten beim Fügen (unabhängig vom Fügeprozess) bzw. die werkstofftechnischen Kennwerte und vorhandene Kenntnisse über FSW an Stahl. Es wurden daraus allgemeine Kenntnisse generiert, die so zum Gesamtverständnis der auftretenden Problematiken während des Projektes beitragen konnten. Alle Ergebnisse, positive sowie negative, wurden ans FGK weitergeleitet. Dort

konnte an Hand dieser Daten mit der Entwicklung bzw. mit der Vorsortierung aller in Frage kommenden Werkstoffsysteme begonnen werden.

Die keramischen Werkstoffe und ihre Eigenschaften werden vom FGK gesondert beschrieben (Kapitel 4).

3.2 Durchgeführte Untersuchungen und Vorversuche / Conducted experiments and preliminary tests

3.2.1 Testreihen mit Röntgen und zum Verhalten der Stähle unter Wärmeeinfluss / Test series with X-ray and on the behaviour of steels under the influence of heat

Ziel dieser Versuche war die Aufstellung von Hypothesen, deren Bearbeitung und Auswertung um daraus im Anschluss eine wissenschaftlich fundierte Aussage zu dem späteren Schweißverhalten (FSW) der einzelnen Stähle zu formulieren. Dazu wurde eine Bestimmung der Elastizitätsgrenze R_e , der Zugfestigkeit R_m , der Bruchdehnung A und der Brucheinschnürung Z in Abhängigkeit von der Temperatur vorgenommen. Es wurden Proben bei Raumtemperatur und bei 1200 °C (die Schweißtemperatur beim Rührreißschweißen von Stahl liegt bei ca. 1100-1200 °C) untersucht. Von jeder so geprüften Stahlsorte und Dicke wurden Zugversuche an Grundwerkstoffproben durchgeführt. Der Probenumfang dafür wurde in Absprache mit dem FGK festgelegt. Die aus der anschließenden Bearbeitung und Auswertung gewonnenen Erkenntnisse sollten zum Verständnis beitragen, inwieweit der sich ergebende unterschiedliche Plastifizierungsgrad Einfluss auf die Eigenschaften des Stahls hat und ob sich daraus eine verschleißfördernde Wirkung auf die zu entwickelnden keramischen Werkstoffsysteme für die neuartigen Rührreibwerkzeuge ergeben könnte.

Zusätzlich wurde in den Vorversuchen untersucht, ob sich mittels Röntgen eine Werkzeugabnutzung nachweisen lässt.

3.2.1.1 Röntgenuntersuchungen Stahl / Keramik

Zweck dieser Untersuchung war Abschätzung einer Nachweisführung, inwiefern Keramikpartikel im Stahl beim Rührreißschweißen sichtbar werden. Damit könnte ein Zusammenhang zur Werkzeugabnutzung und damit zur Lebensdauer hergestellt werden. Dazu wurden zuerst optimale Einstellungen der Röntgenparameter erarbeitet:

- Kontrasterstellung zwischen Stahl/Keramik.
- Verwendung DIN-Steg / Erkennbarkeit des DIN-Steges.
- Bewertung der Aussage.

Eine weitestgehende Detektierbarkeit war dabei durchaus gegeben (Abbildung 3-3). In der Endkonsequenz musste sich der Untersuchungsansatz bei den späteren realen Schweißungen bewähren. Da das dann aber nicht befriedigend festgestellt werden konnte, wurde als Fazit daraus auf derartige Untersuchungen im weiteren Verlauf des Projektes verzichtet.

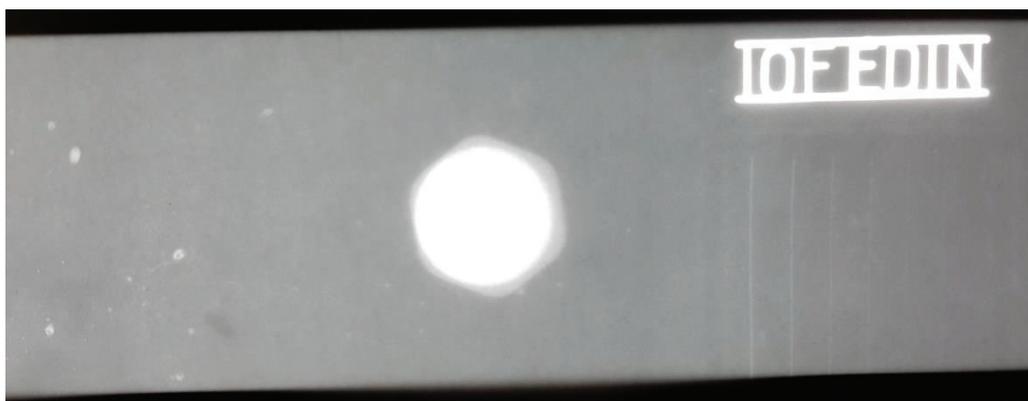


Abbildung 3-3: Röntgenaufnahme mit Keramikpartikeln, Werkzeug und DIN-Steg

Figure 3-3: X-ray image with ceramic particles, tool and DIN bar

3.2.1.2 Zugprüfung unter Vorwärmung

Bei diesen Untersuchungen wurden folgende Stähle überprüft. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3-2 ersichtlich:

Tabelle 3-2: Untersuchte Stähle für diese Versuche

Table 3-2: Steels examined for these tests

| Stahlsorte Dicke t = 4 | Streckgrenze bei Raumtemperatur | | Dehnung bei Raumtemperatur | Streckgrenze bei 1200°C | Dehnung bei 1200°C |
|---------------------------|-------------------------------------|-------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| S235JR | 340 MPa | | 36% | 25 MPa | 3 - 4% |
| | Zugfestigkeit bei Raumtemperatur | | | Zugfestigkeit bei 1200°C | |
| | 460 MPa | | | 13 - 14 MPa | |
| X5CrNi18- 10 | Streckgrenze bei Raumtemperatur | | Dehnung bei Raumtemperatur | Streckgrenze bei 1200° | Dehnung bei 1200°C |
| | 310 MPa | | 36% | 22 MPa | 4% |
| | Zugfestigkeit bei Raumtemperatur | | | Zugfestigkeit bei 1200°C | |
| 620 MPa | | 9 MPa | | | |

Weitere Ergebnisse dazu sind auch beispielhaft in den Abbildungen 3-4, 3-5, 3-6 und 3-7 ersichtlich.



Abbildung 3-4: Zugversuch bei Raumtemperatur (S235JR, Test 4)

Figure 3-4: Tensile test at room temperature (S235JR, Test 4)

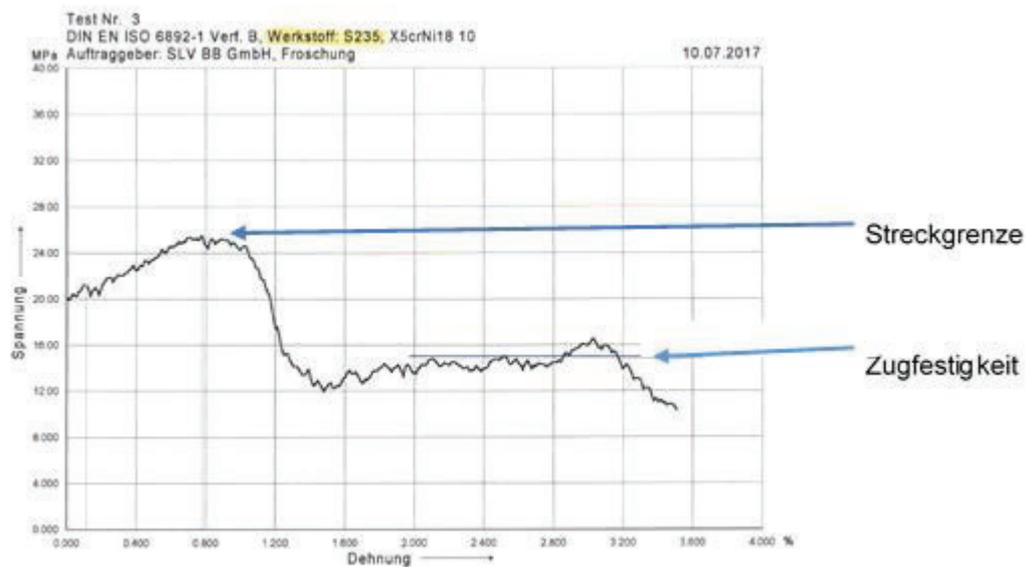


Abbildung 3-5: Zugversuch bei 1200°C (S235JR, Test 3)

Figure 3-5: Tensile test at 1200°C (S235JR, Test 3)

Die Abbildung 3-4 zeigt eine normale Kurve mit den entsprechenden Werten im Zugprüfungsdiagramm für einen S235 bei Raumtemperatur an. In der Abbildung 3-5 ist ersichtlich, wie bei 1200°C diese Werte enorm zurückgehen. Die Schlussfolgerungen, die daraus gezogen werden konnten, waren für das FGK sehr wichtig. Ableitend daraus konnten die Belastungen für die Keramik beim Rührreißschweißprozess im Voraus zumindest in etwa bestimmt werden und damit eine Vorsortierung der keramischen Werkstoffe ermöglichen.



Abbildung 3-6: Zugversuch bei Raumtemperatur (X5CrNi18-10, Test 7)

Figure 3-6: Tensile test at room temperature (X5CrNi18-10, Test 7)

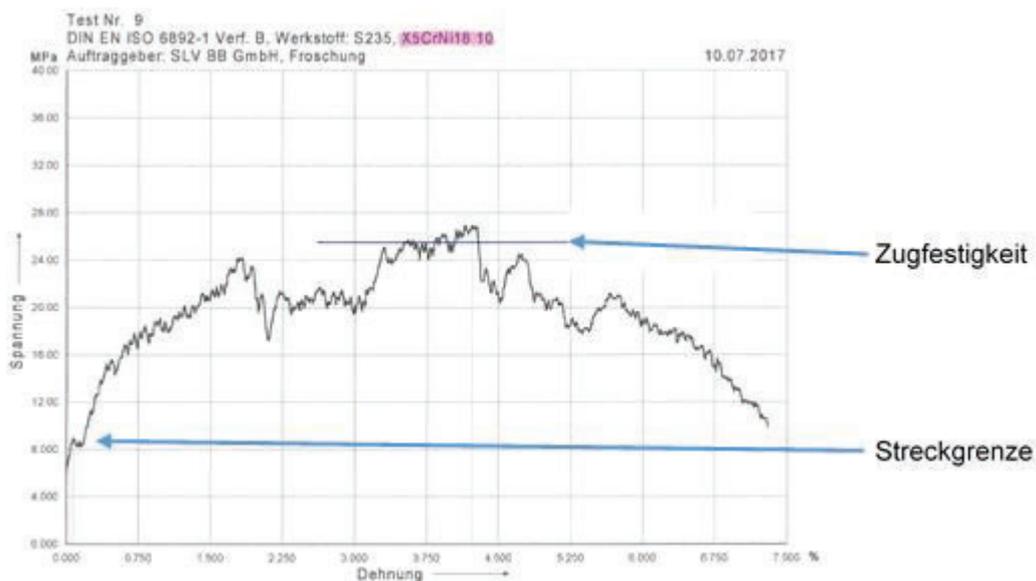


Abbildung 3-7: Zugversuch bei 1200°C (X5CrNi18-10, Test 9)

Figure 3-7: Tensile test at 1200°C (X5CrNi18-10, Test 9)

Die Abbildungen 3-6 und 3-7 zeigen den Verlauf der Kurve für die Zugprüfung bei dem getesteten CrNi-Stahl. Auch hier gehen die Werte bei Temperatureinfluss extrem zurück.

Diese Versuche wurden unter Mitwirkung des PA-Mitgliedes Herrn Vauderwange (Fa. VauQuadrat) realisiert. Alle Werte wurden dem FGK zwecks der Entwicklung der späteren reinen keramischen Werkzeuge zur Verfügung gestellt.

3.2.1.3 Kerbschlagbiegeversuch unter Vorwärmung

Zur Vervollständigung der werkstofftechnischen Analysen für das FGK wurden Kerbschlagbiegeversuche bei Raumtemperatur (RT) und bei 1100°C durchgeführt. Die 1200°C, wie bei den Zugprüfungen, konnten hier verfahrenstechnisch nicht realisiert werden. Als Referenzwerkstoffe dienen wiederum Baustahl S235JR (Stahl) und der X5CrNi18-10 (CrNi). Die gewonnenen Ergebnisse wurden allerdings für das Vorhaben als nicht relevant eingeschätzt und wurden deshalb auch nicht weiterverfolgt bzw. ausgeweitet. Die Tabelle 3-3 die Abbildung 3-8 zeigen exemplarisch einige Versuchsergebnisse an. Eine direkte Ableitung für die Entwicklung von keramischen Werkstoffen war, wie beschrieben, nicht gegeben. Eher zeigten hier die Ergebnisse nur die normalen Verhaltensmuster der Stähle unter diesen Bedingungen an.

Tabelle 3-3: Ergebnisse Kerbschlagbiegeversuch

Table 3-3: Results notched bar impact test

| Werkstoff | Temperatur in °C | Verbrauchte Arbeit in Joule | Bemerkungen |
|-----------|------------------|-----------------------------|------------------|
| Stahl | | | |
| Probe 1 | RT | 7 | Sprödbbruch |
| Probe 2 | 1100 | 156 | Verformungsbruch |
| Probe 3 | 1100 | 129 | Verformungsbruch |
| CrNi | | | |
| Probe 1 | RT | 73 | Mischbruch |
| Probe 2 | 1100 | 88 | Mischbruch |
| Probe 3 | 1100 | 151 | Verformungsbruch |



Abbildung 3-8: Kerbschlagbiegeversuch bei 1100°C (rechts: S235JR, links: X5CrNi18-10)

Figure 3-8: Notched bar impact test at 1100°C (right: S235JR, left: X5CrNi18-10)

3.2.2 Rührreibschweißen mit metallischen Werkzeugen / FSW with metal tools

Der Versuchsplan für das Rührreibschweißen an Stählen wurde mehrmals an neue Erkenntnisse angepasst. Den letztendlich realisierten Versuchsumfang für diese erste Phase des Projektes fasst im Wesentlichen Tabelle 3-1 zusammen. Wie zu ersehen wurde mit 2,0 mm, 4,0 mm und 5,0 mm dicken Stahlblechen gearbeitet. Ergänzt wurden diese Ziele zusätzlich durch einen Vergleich der hier experimentell gewonnenen Ergebnisse mit Werten aus früheren Arbeiten der SLV B-B zum Thema FSW an Stahl. Um die Erkenntnislage noch weiter zu verdichten wurden auch folgende Mischverbindungen geschweißt:

- S235 mit S355 bei den 5,0 mm dicken Blechen.
- X5CrNi18-10 mit S235JR bei den 4,0 und 5,0 mm dicken Blechen.

3.2.3 Schweißungen an 2,0 mm dicken Blechen

Diese erste Probenreihe beinhaltet Schweißungen an S235JR. Wie schon aus Vorarbeiten bekannt, stellte sich sehr heraus, dass die Rührreibwerkzeuge eine möglichst einfache Form besitzen sollten. Das bedeutet, dass auf Förderhilfen wie bei den Werkzeugen für Aluminium, Gewinde oder andere Einfräsungen an Schulter und Rührstift, weitestgehend verzichtet werden muss. Die letztlich bevorzugte Werkzeugform bestand bei diesen Versuchen aus einer glatten, 20,0 mm durchmessenden Schulter und einem leicht keglichen Rührstift mit 7,0 mm Durchmesser am Übergang zur Schulter.

Es wurde teilweise der Eintauchbereich des Werkzeuges vorgewärmt, das stellte sich bei der dünnen Werkstoffdicke als wenig hilfreich heraus. Da sich der Werkstoff bei punktuellen Erwärmungen örtlich ausdehnt und gleichzeitig erweicht, kommt es zu Verwerfungen, die Schulter schneidet unter und es entsteht keine Verbindung der Bleche. Ein weiteres Problem ist, findet die Werkzeugschulter nicht genügend Widerstand im Material, kann sie dieses nicht ausreichend auf die Schweißunterlage drücken und es kommt ebenfalls zu offenen Bereichen in der Schweißnaht. Das Rührreibwerkzeug „fräst“ dann förmlich durch das Material bis wieder genug Gegendruck gebildet werden kann. Auf Schweißungen mit dem CrNi-Stahl wurde nach kurzem Versuch verzichtet. Aufgrund der schlechteren Wärmeleitfähigkeit kam es zu noch mehr Verwerfungen und Überschneidungen im Nahtbereich.

Ergebnisse mit Werkzeugen aus Wolfram-Rhenium, WRe05

- Geschweißte Werkstoffpaarung: S235JR/S235JR.
- Ermittlung von Parametern (teils bekannte Parameter und Erfahrungen konnten bestätigt bzw. erweitert, oder auch verbessert werden).
- Vorwärmung beim Eintauchen ist nur teilweise empfehlenswert.
- Pilotloch ungünstig, Werkzeug kann beschädigt werden oder schert ab.
- Die Belastung des Rührwerkzeuges war hier gering, kein Abtrag von Material an der Schulter und Rührstift.
- Es wurde mit Schutzgas geschweißt.
- Sicht- und Röntgenprüfung: i.O.
- Zug- und Biegeprüfung: i.O., Werte im Bereich des Grundwerkstoffes.
- Schliffbilder: ohne erkennbare Fehler.
- Jeder Versuch wurde 4x wiederholt.

Relevante Daten für das FGK

- Drehzahl des Werkzeuges: 1500 min⁻¹.
- Axialkraft: 18 kN.
- Schweißgeschwindigkeit: 300 mm/min.

3.2.4 Schweißungen an 4,0 mm dicken Blechen

Zielstellung hier war es, eine gut händelbare und reproduzierbare Parametrisierung zu erreichen. Es kamen testweise Werkzeuge aus Wolfram-Rhenium (WRe05) und einer Tantal-Basislegierung (Ta) zum Einsatz. Die Schweißungen am S235JR wurden mit dem WRe05-Werkzeugen durchgeführt. Bei dem S355JR, dem X5CrNi18-10 und bei den Mischverbindungen wurde ausschließlich mit dem Ta-Werkzeug gearbeitet. Diese Maßnahme wurde notwendig, da der erkennbare Verschleiß an dem WRe05-Werkzeug hier zu groß war, um anschließend gesicherte Werte an das FGK liefern zu können.

Ergebnisse mit Werkzeugen aus Wolfram-Rhenium, WRe05

- Geschweißte Werkstoffpaarung: 235JR/S235JR.
- Ermittlung von Parametern (teils bekannte Parameter und Erfahrungen konnten auch hier bestätigt bzw. erweitert, oder auch verbessert werden).
- Vorwärmung beim Eintauchen ist empfehlenswert.
- Pilotloch ungünstig, Werkzeug kann beschädigt werden oder schert ab.
- Das Rührwerkzeug wurde bei den Schweißungen sehr stark belastet (Auswaschungen von Material an der Schulter).
- Es wurde mit Schutzgas geschweißt.
- Sichtprüfung: grobes Nahtaussehen (Abbildung 3-9).
- Röntgenprüfung: i.O.
- Zug- und Biegeprüfung: i.O., Werte im Bereich des Grundwerkstoffes.
- Schliffbilder: ohne erkennbare Fehler.
- Jeder Versuch wurde 4x wiederholt.

Relevante Daten für das FGK

- Drehzahl des Werkzeuges: 700 min⁻¹ (1900 min⁻¹ Eintauchdrehzahl).
- Axialkraft: 20 kN.
- Schweißgeschwindigkeit: 120 - 180 mm/min.



Abbildung 3-9: Rührreibschweißung mit WRe05-Werkzeug

Figure 3-9: FSW with WRe05-Tool

Ergebnisse mit Werkzeugen aus einer Tantal-Basislegierung, Ta

- Geschweißte Werkstoffpaarung: 355JR/S355JR.
- Ermittlung von Parametern (bereits erarbeitete Werte konnten positiv bestätigt und weiterentwickelt werden).
- Die Rührreibwerkzeuge aus der Tantal-Basislegierung ließen sich problemlos mit anderen (effektiveren) Parametern fahren.
- Vorwärmung beim Eintauchen empfehlenswert.
- Pilotloch ungünstiger, siehe Wolfram-Rhenium oben.
- Kein Anhaften an die Unterlage (Blechbeilage mit einer Walzzunderhaut, Standard bei Stahlschweißungen in der SLV Berlin-Brandenburg).
- Es wurde mit Schutzgas geschweißt.
- Sichtprüfung: feines Nahtaussehen bei höherem Vorschub (Abbildung 3-10).
- Röntgenprüfung: i.O.
- Zug- und Biegeprüfung: i.O., Werte im Bereich des Grundwerkstoffes.
- Schlibbilder: ohne erkennbare Fehler.
- Jeder Versuch wurde 4x wiederholt.

Relevante Daten für das FGK

- Drehzahl des Werkzeuges: 700 min⁻¹ (1900 min⁻¹ Eintauchdrehzahl).
- Axialkraft: 20 kN.
- Schweißgeschwindigkeit: 150 - 200 mm/min.

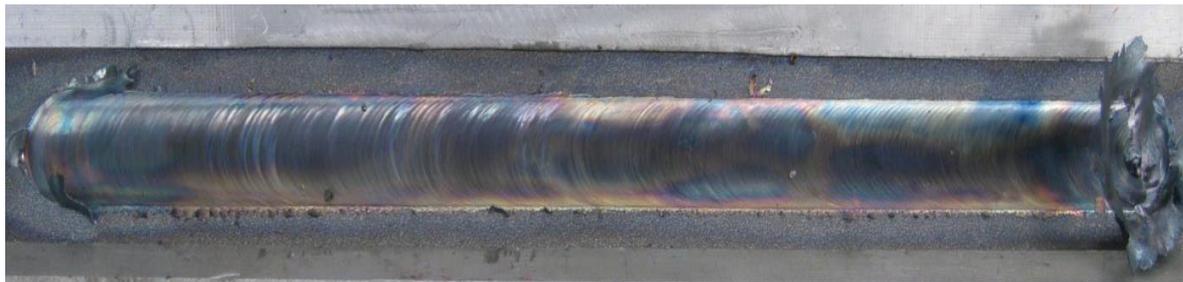


Abbildung 3-10: Rührreibschweißung mit Ta-Werkzeug

Figure 3-10: FSW with Ta-Tool

Zusammenfassung der Maschinenparameter für die 4,0 mm Schweißungen

- Werkzeugposition: -3,8 mm.
- Verharrzeit: 0,5 sek.
- Eindringgeschwindigkeit: 10 mm/min.
- Schweißgeschwindigkeit: 120 – 200 mm/min.
- Axialkraft: 20 kN.
- Drehzahl beim Eintauchen: 1900 min⁻¹.
- Drehzahl beim Schweißen: 700 min⁻¹.
- Es wurde beim Start der Eintauchbereich vorgewärmt.
- Es wurde auf einer Stahlblech-Unterlage mit Walzzunder geschweißt.
- Verwendung von Schutzgas Argon (ca. 15 l/min).
- Werkzeugschaft wassergekühlt.

3.2.4.1 Mischverbindung CrNi/S235

Die Schweißungen an den 4,0 mm-Mischverbindungen X5CrNi18-10/S235JR liefen schon komplizierter ab. Es gelang sehr lange nicht eine geschlossene Naht herzustellen. Die Parameter wurden mehrfach verändert, es wurde asymmetrisch geschweißt (Werkzeug läuft zu ca.90% im weicheren Material, hier S235JR) usw. Erst eine geometrische Veränderung des Werkzeuges brachte wieder brauchbare Ergebnisse. Der Rührstift wurde hierbei schlanker gestaltet. Die vorhergehenden Schweißparameter (siehe oben) wurden im Wesentlichen beibehalten, außer der Schweißgeschwindigkeit, hier musste auf 100 mm/min reduziert werden. Die Überprüfung mit den Röntgen-Verfahren zeigte positive Ergebnisse. Bei den CrNi/S235-Mischverbindungen konnte teilweise nicht komplett durchgeschweißt werden, da der Werkzeugverschleiß relativ hoch war. Deshalb gab es hier auch Schweißungen mit 3,0 mm und Schweißungen mit 4,0 mm Einschweißtiefe.

3.2.5 Schweißungen an 5,0 mm dicken Blechen

Die Werkstoffkombinationen waren hier S235JR/S235JR und S355JR/S355JR. Alle Vorbereitungsarbeiten und die Durchführung der Schweißungen liefen ähnlich den der Schweißungen an den 4,0 mm dicken Blechen ab. Bei den 5,0 mm Blechen wurde ausschließlich mit Ta-Werkzeugen gearbeitet. Die Parameter mussten teilweise neu erarbeitet werden, konnten aber bei beiden Werkstoffen verwendet werden.

Zusammenfassung der Maschinenparameter für die 5,0 mm Schweißungen

- Werkzeugposition: -4,8 mm.
- Verharrzeit: 0,5 sek.
- Eindringgeschwindigkeit: 10 mm/min.
- Schweißgeschwindigkeit: 100 mm/min.
- Axialkraft: 20 kN.
- Drehzahl beim Eintauchen: 1900 min⁻¹.
- Drehzahl beim Schweißen: 600 - 700 min⁻¹.
- Es wurde beim Start der Eintauchbereich vorgewärmt.
- Es wurde auf einer Stahlblech-Unterlage mit Walzzunder geschweißt.
- Verwendung von Schutzgas Argon (ca. 15 l/min).
- Werkzeugschaft wassergekühlt.

Alle Parameter wurde wieder dem FGK zwecks Entwicklung der keramischen Werkzeuge zur Verfügung gestellt.

3.2.5.1 Mischverbindung S235/S355

Bei diesen Schweißungen kam es zu keinerlei Komplikationen, die Parameter aus den Schweißungen S235JR und S355JR (siehe oben) konnten übernommen werden. Die Ergebnisse waren ebenfalls vergleichbar.

3.2.5.2 Mischverbindung CrNi/S235

Die Schweißungen an den 5,0 mm Mischverbindungen X5CrNi18-10/S235JR liefen ebenfalls wesentlich komplizierter ab. Auch hier gelang es sehr lange nicht eine geschlossene Naht herzustellen. Wieder erst eine geometrische Veränderung des Werkzeuges brachte brauchbare Ergebnisse. Der Rührstift musste auch hier schlanker gestaltet werden, was sich dann aber in der Schweißgeschwindigkeit niederschlug. Die anderen Schweißparameter wurden beibehalten, die Schweißgeschwindigkeit musste auf 60 mm/min reduziert werden. Die Überprüfung mit den Röntgen-Verfahren zeigte wieder positive Ergebnisse. Allerdings konnte bei den Mischverbindungen am Anfang die komplette Dicke erfasst werden, zum Ende hin aber nicht mehr komplett durchgeschweißt werden. Der Werkzeugverschleiß war hier enorm hoch, die Werkzeuge wurden vor jeder neuen Schweißung mechanisch nachgearbeitet.

4 Entwicklung der keramischen Werkzeuge / Development of ceramic tools

Kurzfassung

Wie bereits erwähnt, ist der derzeitige Standard beim Rührreißschweißen, neben speziellen Legierungen (z. B. Wolfram-Rhenium, Tantal-Grundmaterialien) und festen Carbiden die Verwendung von pcBN-Werkzeugen. Während metallische Werkzeuge keine ausreichende Verschleißfestigkeit aufweisen, weist pcBN aufgrund seiner atomaren Struktur eine sehr hohe Härte und ausgezeichnete Verschleißfestigkeit auf, zeigt jedoch auch die für harte Keramikmaterialien übliche Sprödigkeit, was das Risiko von Brüchen während des Gebrauchs unter Überlastung erhöht. Darüber hinaus ist aufgrund der hohen Rohstoff- und Produktionskosten und einer begrenzten Anzahl von Herstellern die Verfügbarkeit von Werkzeugen für das FSW von Stählen unzureichend.

Daher sollen im Rahmen des vorliegenden Projektes gängige Keramikmaterialien getestet werden, um einen wirtschaftlicheren und adäquateren Ersatz für pcBN-Werkzeuge zu finden. Keramische Materialsysteme haben bereits in vielen Bereichen der Stahlherstellung und -verarbeitung ihr Anwendungspotential und insbesondere ihre Wirtschaftlichkeit unter Beweis gestellt. Von den im Bereich der Schmelzmetallurgie bei der Auskleidung von Hochöfen und Gießmaschinen verwendeten Materialien bis hin zu Hochleistungsschneidwerkzeugen wurde die Leistung von Keramikmaterialien im Zusammenspiel mit Stahl bereits einschlägig demonstriert.

Abstract

As already described, the current standard is, in addition to special alloys (eg. tungsten-rhenium, tantalum base materials) and solid carbides, the use of pcBN tools. While metallic tools do not show sufficient wear resistance, pcBN, due to its atomic structure, has a very high hardness and excellent wear resistance, but also shows the brittleness that is common for ceramic hard materials, increasing the risk of fractures during use under overload. Moreover, as a consequence of high raw material and production costs and a limited number of manufacturers, the availability of tools for the FSW of steels is insufficient.

Hence, in course of the present work, common ceramic materials are to be tested, in order to find a more economical and adequate replacement for pcBN-tools. Ceramic material systems have already proven their application potential and in particular their cost-effectiveness in many areas of steel production and processing. From the materials used in the field of smelting metallurgy in the lining of blast furnaces and casting machines to high-performance cutting tools, the performance of ceramic materials in interaction with steel has been demonstrated.

4.1 Vorgehensweise und Versuchsplanung / Approach and design of experiments

4.1.1 Versuchsaufbau und Ergebnisse der Charakterisierung der Keramiken/ Experimental setup and results of the characterization of ceramics

Basierend auf den vorausgehend gewonnenen Erkenntnissen der SLV BB und einer umfassenden Materialrecherche wurden für den Versuchsaufbau unter anderem folgende Werkstoffe als Werkzeugmaterial getestet: Al₂O₃, ZrO₂ (beide BCE Special Ceramic GmbH, Deutschland), SiC und Si₃N₄ (beide FCT Ingenieurkeramik GmbH, Deutschland). Die jeweiligen Materialeigenschaften befinden sich in Tabelle 4-1. Bezüglich der Stähle wurden, wie bereits beschrieben, der unlegierte Stahl S235JR / 1.0038 sowie der austenitische Chrom-Nickel-Stahl X5CrNi18-10 / 1.4301 verwendet.

Tabelle 4-1: Materialeigenschaften der getesteten Keramiken
Table 4-1: Material properties of the tested ceramics

| Material property | Al ₂ O ₃ | ZrO ₂ | Si ₃ N ₄ | SiC |
|--|--------------------------------|------------------|--------------------------------|--------|
| Fracture toughness [MPa·√m] | 4,3 | 7 | 6 | 3,5 |
| Hardness [MPa] | 1800 | 1200 | 1600 | 2600 |
| Bending strength [MPa] | 340 | 500 | 990 | 400 |
| Poisson number [-] | 0,22 | 0,3 | 0,26 | 0,15 |
| Young's modulus [GPa] | 380 | 200 | 320 | 400 |
| CTE RT-1000 °C [10 ⁻⁶ K ⁻¹] | 8,5 | 10,5 | 3,0 | 4,5 |
| Thermal conductivity [W/mK] | 30 | 2 | 30 | 140 |
| Thermal shock parameter R2 [W/m] | 0,0025 | 0,0003 | 0,0229 | 0,0264 |

Zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit des jeweiligen Werkzeugmaterials gegenüber Stahl wurde ein Tribologieprüfstand mit einer Stahlscheibe, Durchmesser von 200 mm, und einer Drehzahl von ca. 120 min⁻¹ und einer Kontaktkraft von 10 N verwendet. Die Kontaktzeit zwischen Stahl und Keramik betrug zwei Stunden, um signifikante Unterschiede herausarbeiten zu können. Zur Quantifizierung des Verschleißes wurde ein optisches Profilometer verwendet, das auf einer chromatischen Weißlichtmessung basiert. Die Ergebnisse des Tribologietests sind in Abbildung 4-1 zu sehen.

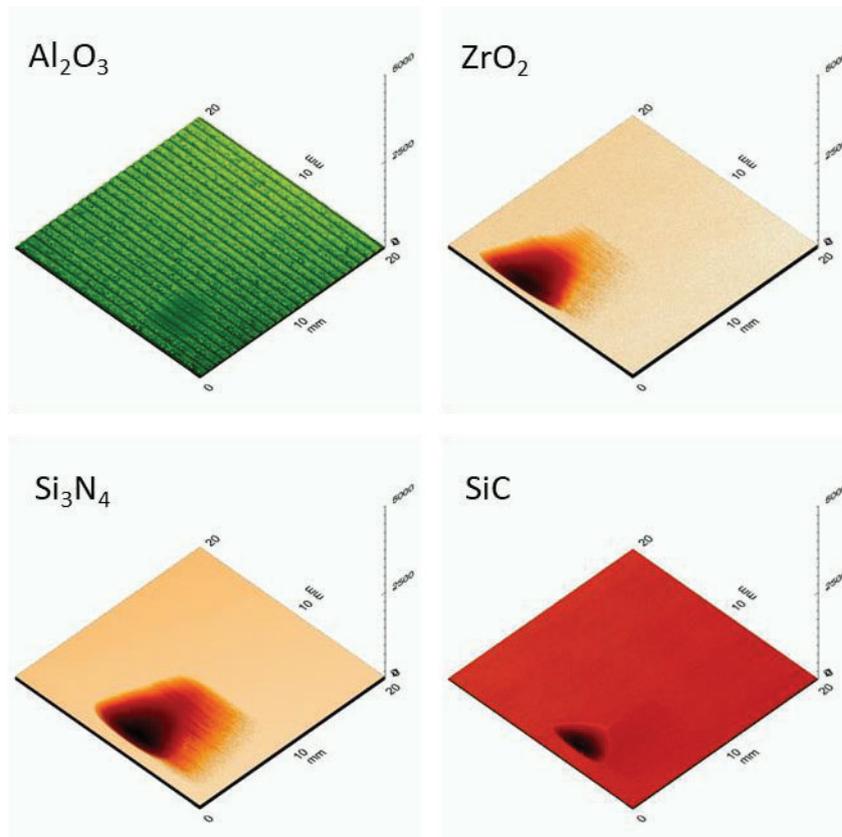


Abbildung 4-1: Optische Quantifizierung des Verschleißes mittels Profilometer

Figure 4-1: Optical quantification of wear with the aid of a profilometer

Es zeigt sich, dass in guter Übereinstimmung mit z.B. der Härte, die Materialien einem unterschiedlichen Verschleiß unterliegen. Daher weisen sowohl Aluminiumoxid als auch Siliziumkarbid gegenüber Stahl eine vielversprechende Verschleißfestigkeit auf. Im Gegensatz dazu zeigen die weniger harten Keramiken Zirkondioxid und Siliziumnitrid stärker tribologisch bedingten Verschleiß. Während des FSW-Prozesses leidet das Werkzeug neben diesen tribologischen Beanspruchungen unter thermisch induziertem Verschleiß. Daher erfolgte die Bestimmung der Beständigkeit der Keramik gegen Stahl bei erhöhten Temperaturen bei 1100, 1200 bzw. 1300°C. Die verschiedenen Stahl- und Keramikkombinationen wurden ohne zusätzliche Kraftbeaufschlagung im Ofen übereinandergelegt. Unter oxidierender Atmosphäre betrug die Verweilzeit fünf Stunden. Der Einfluss der Temperatur auf die thermochemische Beständigkeit von keramischen Werkzeugmaterialien gegen Stahl am Beispiel von Si_3N_4 und Baustahl S235JR ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Reaktivität zwischen Stahl (im festen Aggregatzustand) und den jeweiligen keramischen Werkstoffen mit steigender Temperatur zunimmt. Dieser Trend war bei jeder Kombination zu beobachten, unabhängig von der Art des Stahls sowie des Keramikmaterials. Abbildung 4-3 zeigt den großen Einfluss des Keramikmaterials auf die thermochemische Beständigkeit gegenüber Stahl. Wie deutlich zu sehen ist, ist die Reaktionszone bei oxidischen Werkzeugmaterialien viel weniger ausgeprägt. Im Gegensatz dazu weist das Siliziumnitrid tiefe Durchdringungszonen auf, was den thermomechanischen Verschleiß des Werkzeugs während des Betriebs begünstigt.

Die SiC-Probe führte bereits bei 1200 ° C zur Bildung von Siliziden und zur Senkung des Schmelzpunktes des Stahls und erwies sich daher als ungeeignet.

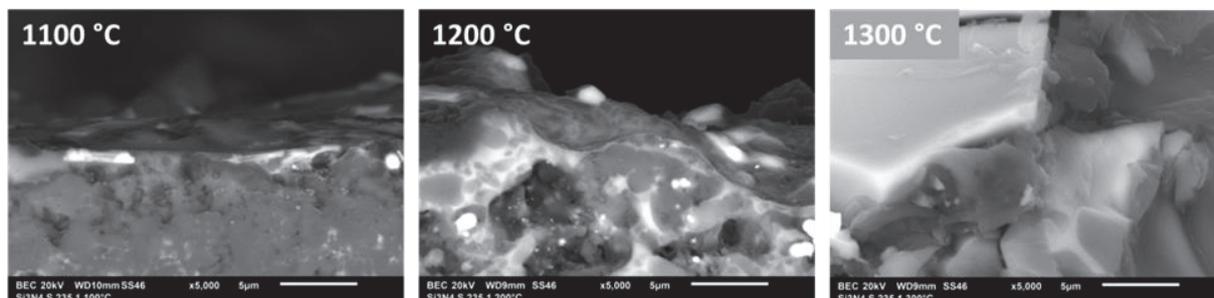


Abbildung 4-2: Temperatureinfluss auf die thermochemische Beständigkeit von keramischen Werkzeugwerkstoffen gegen Stahl am Beispiel des Siliziumnitrids

Figure 4-2: Temperature influence on the thermochemical resistance of ceramic tool materials against steel at the example of silicon nitride

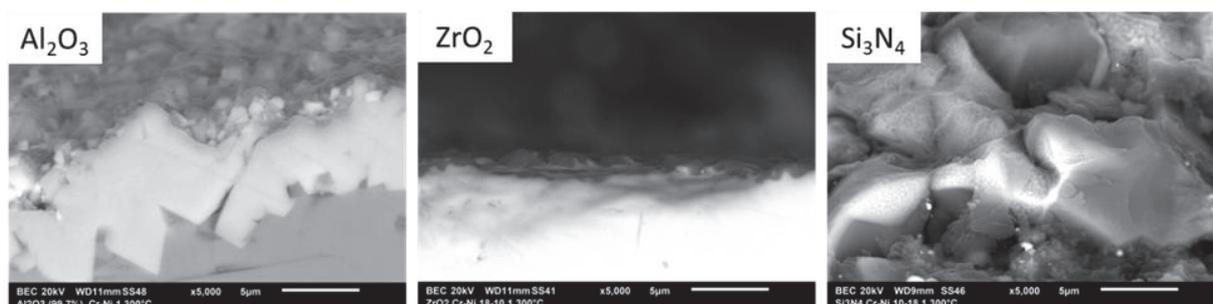


Abbildung 4-3: Einfluss des keramischen Werkstoffes auf die thermochemische Beständigkeit gegenüber Stahl

Figure 4-3: Influence of the ceramic material on the thermochemical resistance against steel

4.1.2 Test der Materialien unter realistischen Bedingungen / Test of the materials under realistic conditions

Für die experimentellen Untersuchungen nach Abschluss der Voruntersuchungen wurden die jeweiligen Werkzeugmaterialien unter realistischen Bedingungen getestet. Dazu wurde der in Abbildung 4-4 gezeigte Versuchsaufbau verwendet, der eine FSW-Maschine (HLR Systems, Deutschland), den Werkzeughalter sowie Teststahlbleche mit einer Abmessung von 200 x 200 x 6 mm³ aus S235JR / 1.0038 respektive X5CrNi18-10 / 1.4301 umfasste. Als Randbedingungen und Schweißparameter wurden eine Kontaktkraft von ca. 25 kN (Kontaktkraft 200 N, Kraftrampe 400 bis 25000 N), Umdrehungszahl von 670 min⁻¹ (ccw) und eine Vorschubbewegung von 5 mm/s und eine Teststreckenlänge von 600 mm gewählt. Danach erfolgte der Abbruch des Versuchs bzw. ein Abbruch nach Werkzeugbruch.

Die Abbildung 4-5 verdeutlicht sehr gut, welche enormen Temperaturen sich während dieser Reib- und Schweißversuche an der Keramik einstellen. Während des Prozesses glühen die Keramikwerkzeuge, unabhängig ihrer chemischen Zusammensetzung, förmlich auf. Das war auch bei den späteren optimierten Werkzeugen so. Trotzdem konnte auf Schutzgas verzichtet werden.



Abbildung 4-4: Versuchsaufbau der Testschweißung mit FSW-Anlage (links), Werkzeug mit Halterung (Mitte) sowie dem Testblech (rechts)

Figure 4-4: Experimental setup of the test weld with FSW system (left), tool with holder (middle) and the test sheet (right)

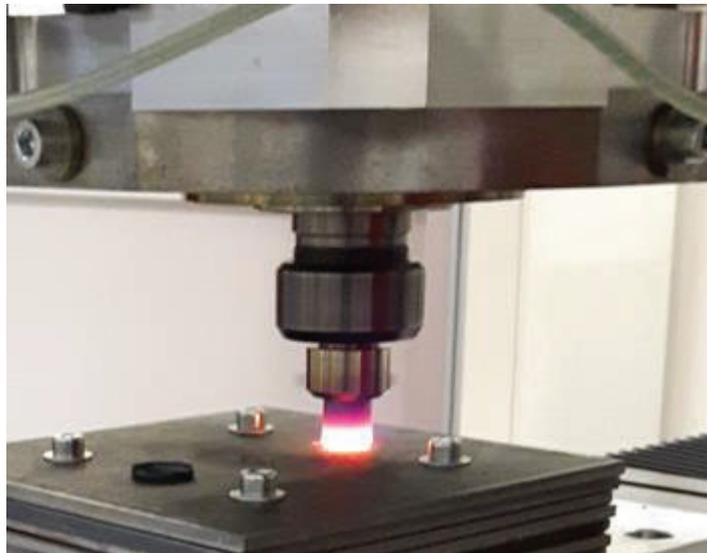


Abbildung 4-5: Werkzeug und Anlage während einen Versuches

Figure 4-5: Tool and equipment during a test

Interessanterweise zeigen die Experimente unter realen Bedingungen genau das entgegengesetzte Verhalten im Vergleich zu den vorherigen Ergebnissen, wie in Abbildung 4-6 zu sehen ist. Unabhängig von der verwendeten Stahlsorte wurden sowohl das Aluminiumoxid, als auch das Zirkonoxidwerkzeug nach dem Aufbringen der Vorschubbewegung vollständig zerstört. Dem ging unmittelbar nach dem Auftreffen der Schulter auf das Stahlblech, die dem größten Durchmesser des Werkzeugs entspricht, ein deutlich hörbares Knackgeräusch voraus. Die Werkzeuge werden im kalten Zustand getestet und beginnen erst wenige Sekunden nach dem Eintauchen rot zu leuchten, was zu einem Thermoschock des Keramikmaterials führt. Bei den Si_3N_4 -Werkzeugen konnte hingegen kein Knacken beobachtet werden. Tatsächlich konnte die gesamte Teststrecke ohne Zerstörung des Werkzeugs abgefahren werden. In Anbetracht dessen wird deutlich, dass Si_3N_4 eine deutlich bessere

Thermoschockbeständigkeit aufweist und daher den harschen Bedingungen beim Schweißen standhalten kann.

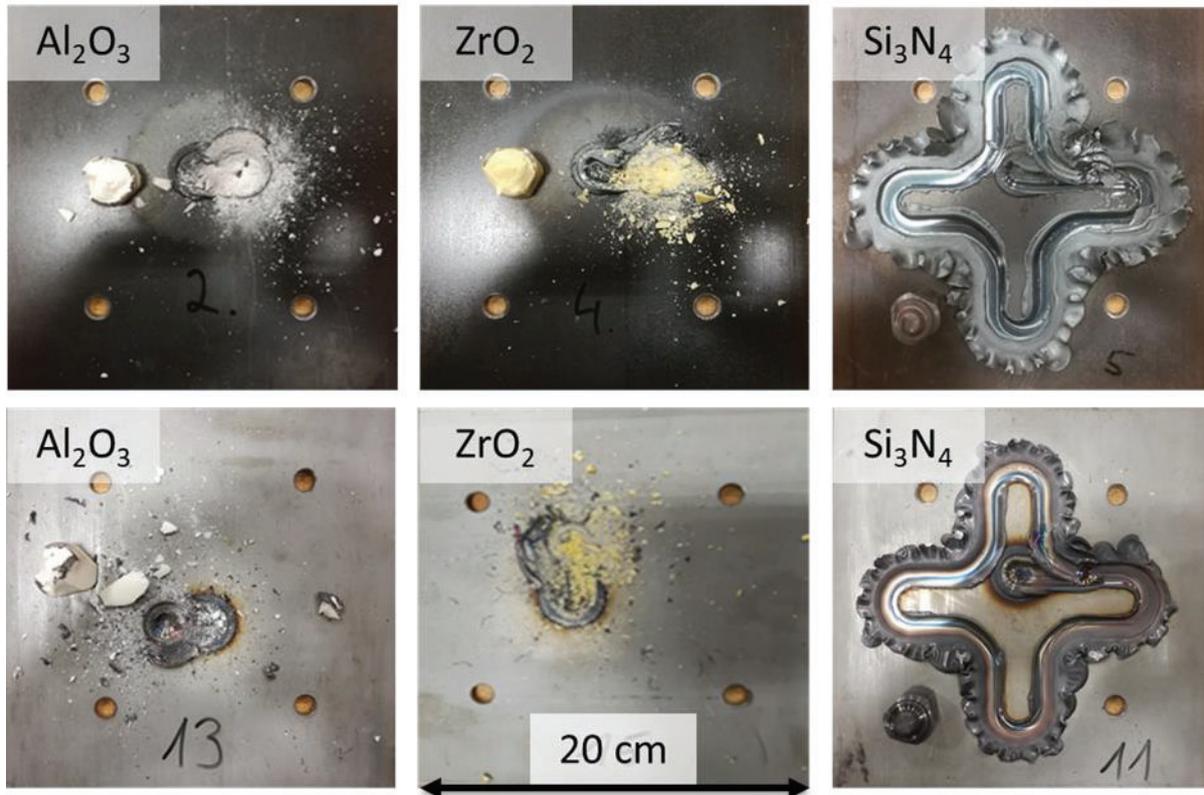


Abbildung 4-6: Verhalten der Keramiken unter realen Bedingungen

Figure 4-6: Behavior of the ceramics under real conditions

4.1.3 Bestimmung des Werkzeugverschleißes / Determination of the tool wear

Um den Verschleiß und damit die Langzeitstabilität zu bewerten, wurde ein Si_3N_4 -Werkzeug 20-mal in ein S235JR-Stahlblech mit einer Dicke von 6,0 mm eingetaucht und zusätzlich eine Schweißlänge von 9,5 Meter erzeugt. Das Werkzeug war auch nach diesen Beanspruchungen noch intakt, obwohl ein erheblicher Verschleiß erkennbar ist, wie in Abbildung 4-7 dargestellt. Der stärkste Verschleiß ist im Querschnitt des Stifts erkennbar, der auf die Vorschubbewegung sowie die Konvektion des Stahls zurückzuführen ist.



Abbildung 4-7: Werkzeugverschleiß nach ca. 9,5 Meter Schweißnahtlänge

Figure 4-7: Tool after aprox. 9.5 meters of weld length

Nachdem die Eignung von Si_3N_4 als Material für das Reibrührschweißen bestätigt worden war, musste dessen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht überprüft werden. Daher wurden Stahlbleche (S355JR) mit einer Dicke von 8 mm beidseitig mit einem Si_3N_4 -Werkzeug (4,0 mm Einschweißtiefe) und den folgenden Parametern geschweißt; Axialkraft: 25 kN, Umdrehungszahl: 475 min^{-1} und eine Vorschubbewegung von ca. 300 mm/min. Im Anschluss fand die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht statt. Wie aus Abbildung 4-8 ersichtlich ist, befindet sich der bruchverursachende Defekt und damit das Versagen des Zugversuchs im Grundmaterial. Als logische Konsequenz entspricht die ermittelte Zugfestigkeit die des Stahls S355JR. Dies zeigt, dass trotz eventueller Verunreinigung durch den keramischen Werkstoff (Abtrag kleinster keramischer Partikel) kein negativer Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Verbindungsteile beobachtet wurde.

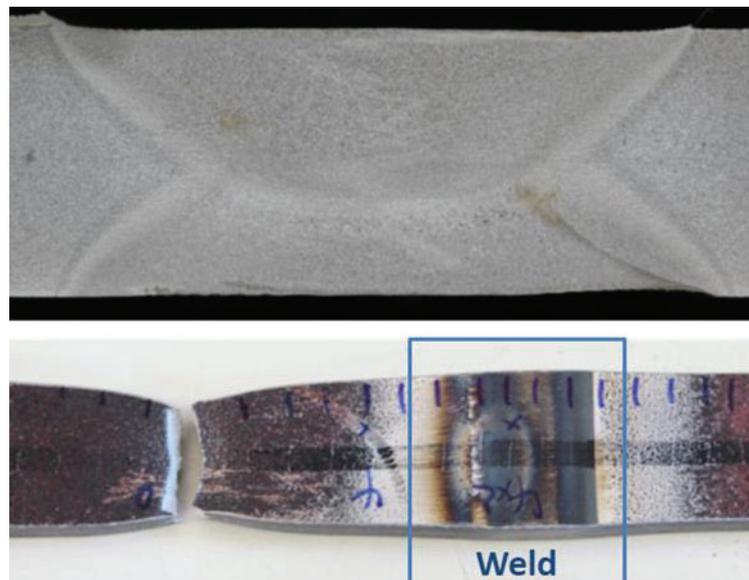


Abbildung 4-8: Makroschliff und Zugprüfung (S355JR, t = 8 mm)

Figure 4-8: Macroscopic examination and tensile test (S355JR, t = 8 mm)

4.2 Entwicklung neuartiger Keramikwerkzeugmaterialien/ Development of novel ceramic tool materials

Um nun Werkzeuge mit verbesserter Verschleißfestigkeit zu erzeugen und die bisherigen Erkenntnisse zu berücksichtigen, wurde ein Werkzeug aus dem Verbundwerkstoff WC-ZrO₂ entwickelt. Dabei hat sich einerseits das ZrO₂, mit Ausnahme der Thermoschockbeständigkeit, in Vorversuchen bewährt. WC besitzt zudem eine gute Wärmeleitfähigkeit (60-80 W / mK) und einen niedrigeren Wärmeausdehnungskoeffizienten ($5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) und verbessert somit die Thermoschockbeständigkeit. Darüber hinaus kann die Verwendung von WC aufgrund seiner hohen Härte zu einer Verbesserung der Verschleißfestigkeit führen und ermöglicht, dass das Bauteil induktiv erwärmt wird. Das auf 60 Vol.-Prozent ZrO₂ und 40 Vol.-Prozent WC basierende Material wurde anfänglich unter Verwendung einer Rührwerkskugelmühle gemahlen. Anschließend wurden Trocknungsoptimierungen mittels Gefriertrocknern und Trockenkammern durchgeführt. Die optimalen Pressbedingungen wurden durch Erstellen einer Pressdruckkurve bestimmt. Durch Variation der Sinterbedingungen konnte schließlich ein nahezu dichte Gefüge erzeugt werden. Zu diesem Zweck wurden die kaltisostatisch gepressten Grünkörper zwei Stunden bei 1550°C unter Stickstoffatmosphäre gesintert. Das gesinterte Bauteil wurde schließlich von BCE bearbeitet (siehe Abbildung 4-9).



Abbildung 4-9: Rührreibwerkzeug aus WC-ZrO₂

Figure 4-9: FSW tool made of WC-ZrO₂

Die Bestimmung der Materialeigenschaften für das neue Verbundmaterial zeigt, dass es als äußerst vielversprechend angesehen werden kann, wie in Tabelle 4-2 gezeigt. Es hat nicht nur bessere Eigenschaften im Vergleich zu den bisher getesteten Materialien, sondern es kann auch eine bessere Leistung als das teure pcBN erwartet werden. Rührreibschweißtests bei der SLV B-B haben bereits die Eignung bestätigt.

Tabelle 4-2: Materialeigenschaften des WC-ZrO₂ im Vergleich zu pcBN

Table 4-2: Material properties of WC-ZrO₂ compared to pcBN

| Material property | WC-ZrO ₂ | pcBN |
|--|---------------------|--------|
| Fracture toughness [MPa*m ^{1/2}] | 10,4 | 6 |
| Hardness [MPa] | 2285 | - |
| Bending strength [MPa] | 1139 | 800 |
| Poisson number [-] | 0,25 | 0,25 |
| Youngs modulus [GPa] | 189 | 400 |
| Thermal expansion coefficient RT-1000 °C [10 ⁻⁶ K ⁻¹] | 7 | 4,9 |
| Thermal conductivity [W/mK] | 50 | 100 |
| Thermal shock parameter R2* [W/m] | 0,0323 | 0,0306 |

5 Durchführung und Auswertung der Rührreibschweißversuche mit keramischen Werkzeugen/ Execution and evaluation of FSW experiments with ceramic tools

Kurzfassung

Nachdem das FGK erste Werkzeuge bzw. Probekörper in Zusammenarbeit mit dem PA herstellen und zur Verfügung stellen konnte, wurde ab diesem Zeitpunkt nur noch mit keramischen Werkzeugen und Testkörpern gearbeitet. Das betrifft nicht nur die Schweißversuche, sondern auch alle anderen Testreihen, z.B. Reibversuche, Standzeitversuche usw. Es wurden auch verschiedene Keramiken getestet, um geeignete Werkstoffsysteme zu finden um diese dann im Anschluss weiterentwickeln zu können. Zu diesen Systemen gehörten Oxidkeramiken und Nichtoxidkeramiken. Letztere stellten sich als geeignet heraus. Für die abschließenden Versuche wurde ausschließlich mit Werkzeugen aus Siliziumnitrid, davon die hellgraue Variante, gearbeitet. Die damit geschweißten Stähle wiesen alle sehr gute mechanische Gütewerte (Grundwerkstoffniveau) und eine gute Optik auf. Auf Schutzgas konnte im Laufe der Versuche verzichtet werden, weder der Werkstoff an sich, noch das Werkzeug wurden davon negativ beeinflusst. Ansatzweise konnten auch Wege gefunden werden um Oxidkeramiken zu ertüchtigen. Die Vorteile dabei wären die wesentlich einfachere Herstellungsweise und geringere Werkzeugkosten. Dafür ist aber ein neues Forschungsprojekt notwendig, weil diese Entwicklung den Rahmen dieses Projektes gesprengt hätte.

Abstract

After the FGK was able to produce and provide the first tools or test specimens in cooperation with the PA, from this point on only ceramic tools and test specimens were used. This does not only concern the welding tests, but also all other test series, e.g. friction tests, service life tests etc. Various ceramics were also tested to find suitable material systems in order to be able to further develop them afterwards. These systems included oxide ceramics and non-oxide ceramics. The latter proved to be suitable. For the final tests, only tools made of silicon nitride, of which the light-grey version was used, were used. The steels welded with these tools all exhibited very good mechanical quality values (base material level) and a good appearance. It was possible to dispense with shielding gas during the course of the tests, neither the material itself nor the tool were negatively affected. Approaches could also be found to improve oxide ceramics. The advantages would be the much simpler production method and the tool costs. However, this requires a new research project, because this development would have gone beyond the scope of this project.

5.1 Erste Schweißversuche mit keramischen Werkzeugen / First welding tests with ceramic tools

5.1.1 Beschreibung des genutzten Werkzeugs / Description of the tool used

Für die ersten Versuchsschweißungen wurde ein keramischer Werkzeugeinsatz (erste Generation) verwendet. Dieser musste in einer speziellen Werkzeugaufnahme möglichst druck- und spannungsfrei geklemmt werden. Jegliche Verspannungen oder auch ein „Hohlliegen“ führen zu einem vorzeitigen Werkzeugbruch. Trotz dieser Einschränkungen waren diese Werkzeuge für die ersten Versuchsschweißungen mit Keramikwerkzeugen bestens geeignet und auch unverzichtbar. Zum einen waren sie da schon relativ preisgünstig und leicht verfügbar, zum anderen konnten an Hand der Versuchsergebnisse wichtige Erkenntnisse für die weiteren Entwicklungsstufen abgeleitet werden. Abbildungen 5-1 und 5-2 zeigen kurz die Entwicklung, von der zeichnerischen Idee bis zu dem ersten fertigen Werkzeugeinsatz.

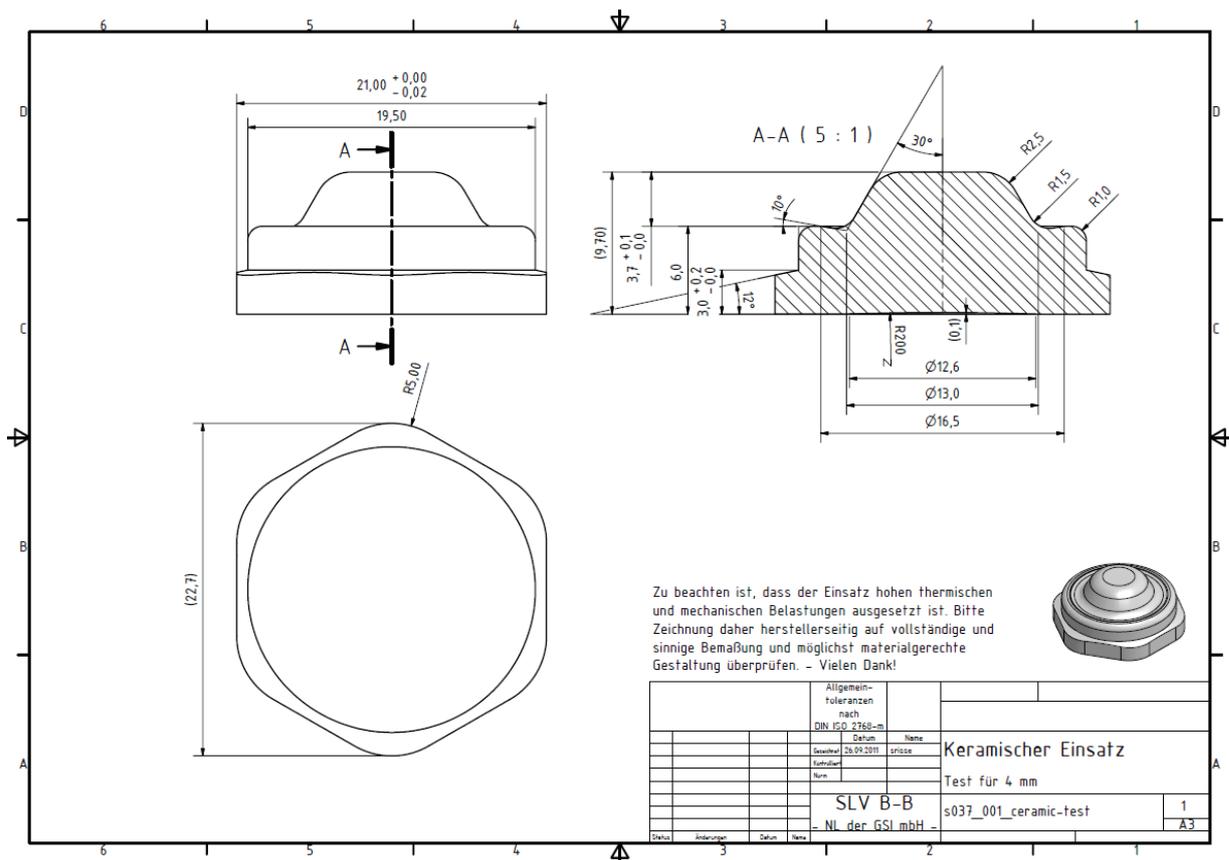


Abbildung 5-1: Zeichnung der ersten Werkzeugeinsätze aus Keramik

Figure 5-1: Drawing of the first ceramic tool inserts



Abbildung 5-2: Keramisches Werkzeug (Werkzeugeinsatz) der ersten Generation

Figure 5-2: Ceramic tool (tool insert) of the first generation

5.1.2 Ablauf der Schweißversuche, Parameter und Ergebnisse/ Procedure of the welding tests, parameters and results

Bei den Versuchen wurden jeweils Schweißnahtlängen von 500 und 1000 mm gefertigt. Es konnten mit einem Werkzeug mehrere Versuche getätigt werden, allerdings stellten sich sehr schnell Risse im Keramikkörper ein (Abbildung 5-3). Solange das Werkzeug dann nicht aus der Halterung genommen wurde, stellten die Risse keine großen Probleme dar (auch bei pcBN-Werkzeugen bekannt). Beim Ausbau fielen diese Werkzeugeinsätze aber auseinander, sodass eine Weiterverwendung ausgeschlossen war.



Abbildung 5-3: Keramisches Werkzeug mit Rissen (nach dem Schweißen)

Figure 5-3: Ceramic tool with cracks (after welding)

5.1.2.1 Parameter der ersten Testschweißungen

- Drehzahl 1 (Eindringdrehzahl): 1900 min^{-1} .
- Drehzahl 2 (Prozessdrehzahl): 0650 min^{-1} .
- Eindringgeschwindigkeit (Eindringen unter Vorwärmung): 10 mm/min.
- Axialkraft bei 4 mm Einschweißtiefe bzw. Werkstückdicke (S235JR): 24 kN.
- Schweißgeschwindigkeit: 250 mm/min.
- Prozessablauf: - Eindringen unter Positionssteuerung,
- Schweißprozess unter Kraftsteuerung.

5.1.2.2 Ergebnisse der ersten Testschweißungen

Werkzeug während der Schweißung

- Einsatz von Schutzgas: ca. 10 l/min.
- Vorwärmung beim Start: induktiv, ca. 600°C .
- Schweißnahtlängen: 500 bis 1000 mm.

Werkzeug nach der Schweißung

- Zerstörungen sind erkennbar (Abbildung 5-3)
- Werkzeug ist an 3 Stellen gebrochen (Abbildung 5-3)
- Kompletter Ausbruch an der Werkzeuggestalt (Abbildung 5-3)
- Komplexer Verschleiß konnte beobachtet werden (Abbildung 5-4)
- Werkzeug in der Aufnahme ohne Auseinanderbrechen, Möglichkeit des erneuten Einsatzes wäre gegeben (ähnliche Beobachtungen gibt es auch bei pcBN-Werkzeugen)

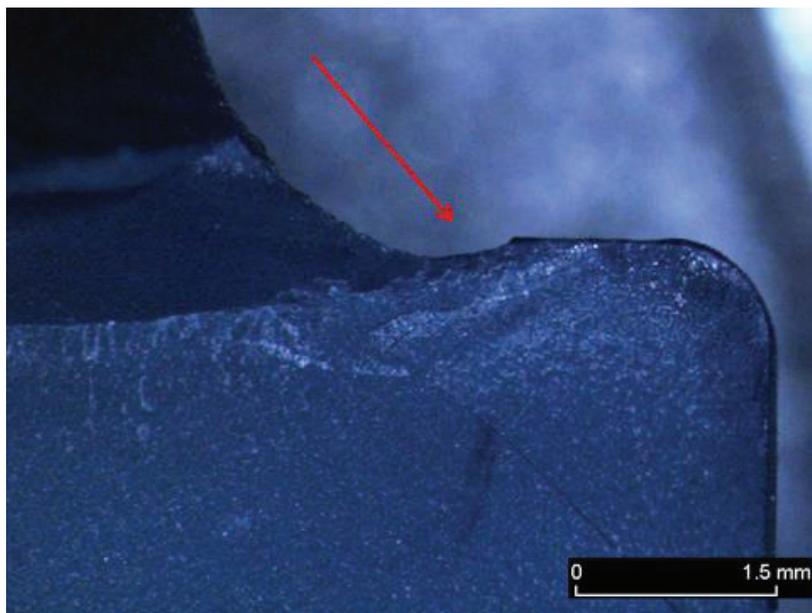


Abbildung 5-4: Komplexer Verschleiß, Wirkung von tribo-chemischen Effekten

Figure 5-4: Complex wear, effect of tribo-chemical effects

5.1.2.3 Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse

Eindeutig zu erkennen war, dass während des Schweißprozesses Brüche durch die mechanische Belastung (Druck, Axialkraft) am Werkzeug entstanden. Aufgrund dieser Belastungen kam es zu einer biaxialen Beanspruchung auf der Bodenfläche des Werkzeuges (Kontaktfläche zum Werkzeughalter), die letztlich zum Bruch führte. Wahrscheinlich sind die die ersten Anrisse schon im Anfahrprozess entstanden, da hier auch der entstehende Thermoschock eine nicht zu unterschätzende Rolle spielt.

Während des Schweißprozesses kam es zu Korrosionsverschleiß im Bereich des Übergangs des Schweißstiftes zu Schulterfläche (Abbildung 5-4). Es ist deutlich eine Vertiefung im Übergang zu sehen und auch eine relativ scharfe Kante im Auslaufbereich zur Schulter. In diesem Bereich scheinen also im Wesentlichen tribochemische Effekte zu wirken. Die Stirnfläche des Rührstiftes und Schulteraußenkante des Werkzeuges zeigten hingegen kaum Verschleiß (Abbildungen 5-3, 5-4).

Auf der Korrosionsfläche (Kontaktfläche mit dem Stahl) war auch deutlich zu erkennen, dass regelrechte Furchen in die keramische Oberfläche gearbeitet wurden. Die hellen Partikel dabei sind Stahlreste (Abbildung 5-5).

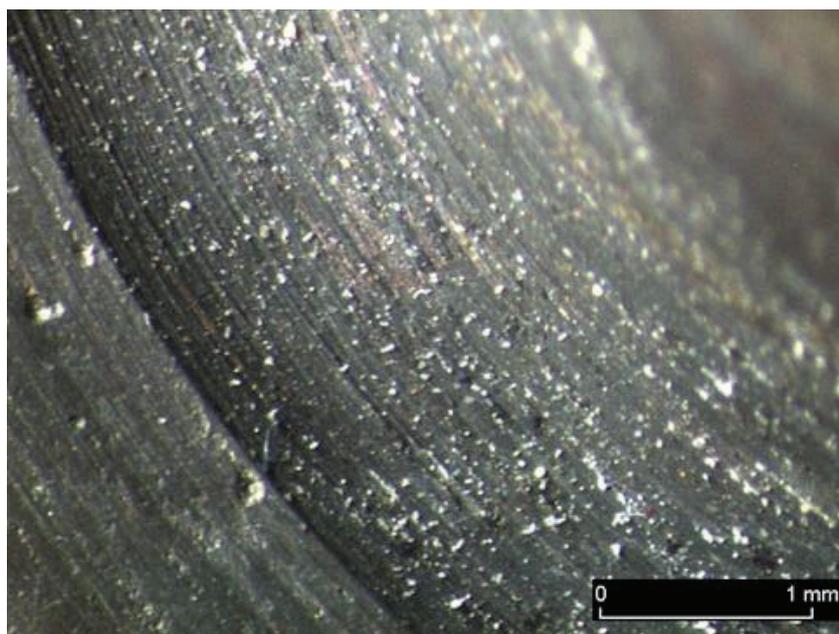


Abbildung 5-5: Korrosionsfläche (Kontaktfläche mit Stahl)

Figure 5-5: Corrosion surface (contact surface with steel)

Aufgrund dieser ersten Erkenntnisse und Erfahrungen konnten durch das FGK weitere keramische Werkstoffe gezielter ausgesucht werden. Die SLV B-B lernte mit diesen Werkzeugen erstmalig den Umgang mit Keramik beim Rührreibschweißen, was letztlich einen großen Erfahrungsgewinn darstellte. Alle weiteren Versuche bauten darauf auf.

Ab diesen Punkt wurde auch ausschließlich mit den keramischen Werkzeugen, die vom FGK im Zusammenarbeit mit dem PA (BCE GmbH, FCT GmbH) entwickelt wurden, gearbeitet.

5.2 Schweißversuche mit optimierten keramischen Werkstoffsystemen / Welding tests with optimized ceramic material systems

5.2.1 Testschweißungen in der SLV Berlin-Brandenburg

Wie im Kapitel 4 beschrieben wurden umfangreiche Untersuchungen vorgenommen, um das Werkzeug der „ersten Generation“ (siehe Abschnitt 5.1.1 ff) wesentlich zu verbessern. Dazu wurden nicht nur chemische Zusammensetzung geändert, sondern die komplette Geometrie musste überarbeitet werden. Die Abbildung 5-6 zeigt so ein Werkzeug der „zweiten Generation“. Diese Werkzeuge wurden aus Siliziumnitrid (Si_3N_4) gefertigt. Eine Beschreibung zu diesem Werkstoffsystem sowie das Verhalten andere Werkstoffvarianten sind ebenfalls dem Kapitel 4 zu entnehmen.



Abbildung 5-6: Keramisches Werkzeug (Werkzeugeinsatz) der zweiten Generation

Figure 5-6: Ceramic tool (tool insert) of the second generation

Mit diesem Werkzeug- und Werkstoffsystem konnten umfangreiche Testschweißungen erfolgreich absolviert werden. Diese Werkzeuge sind, ähnlich wie bei den Werkzeugen der „ersten Generation“, nur in einer speziellen Werkzeugaufnahme verwendbar (Abbildung 5-7). Die FSW-Testschweißungen beliefen sich zumeist auf eine Schweißnahtlänge von etwa 10,0 Metern, die in mehreren Steps (Abbildung 5-8) erarbeitet wurde. Das war notwendig, weil die Rührreibschweißmaschine der SLV Berlin-Brandenburg einen maximalen Verfahrensweg von 2,0 Metern aufweist. Der Verschleiß war schon bei den ersten getesteten Werkzeugen gering, hauptsächlich konnten leichte Auswaschungen an der Schulter im Bereich des Rührstiftes beobachtet werden. Ein sehr wichtiges Merkmal für diese Werkzeuge war, dass der Eintauchbereich nicht mehr vorgewärmt werden musste. Auf ein Pilotloch wurde aus dem schon oben beschriebenen Gründen verzichtet. Weiterhin konnte auch auf

Durchführung und Auswertung der Rührreibschweißversuche mit keramischen Werkzeugen/

Execution and evaluation of FSW experiments with ceramic tools

Schutzgas verzichtet werden, was den Prozess bei einer späteren Anwendung wirtschaftlicher gegenüber anderen Schmelzschweißverfahren gestalten würde. Die Werkzeuge produzierten sehr gute Durchschweißungen im 4,0 mm Bereich und auch die doppelseitigen Rührreibschweißungen im 8,0 mm Bereich (S355JR) konnten mit guten Ergebnissen durchgeführt werden, Abbildung 5-9. Der Standweg (Haltbarkeit) der Werkzeuge kann unabhängig von der geschweißten Blechdicke auf ca. 10,0 Meter beziffert werden. Meist wurde dabei mit sechs bis zehn Steps gearbeitet (siehe auch oben). Nach den 10,0 Metern setzte sehr oft schlagartig eine Pulverisierung der Keramik ein, die das Werkzeug förmlich zerfallen ließ.

Parameter dabei waren:

- Axialkraft 27 kN
- Eindringdrehzahl 1000 min⁻¹
- Eindringgeschwindigkeit 5 mm/min
- Prozessdrehzahl 475 min⁻¹
- Schweißgeschwindigkeit 200 mm/min (Start 5 mm/min)

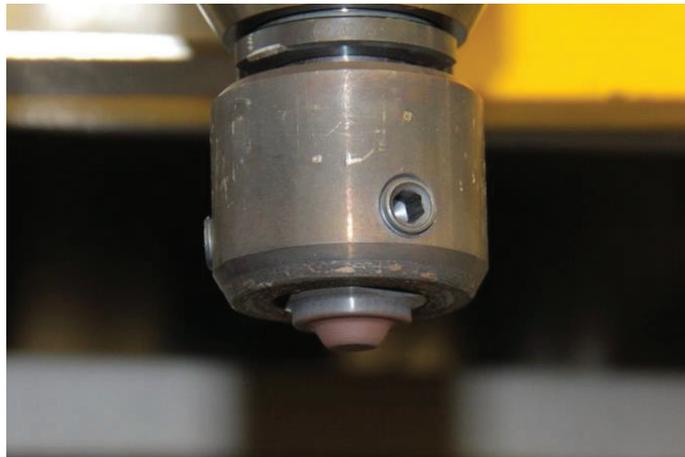


Abbildung 5-7: Einbau des keramischen Werkzeuges in den Werkzeughalter

Figure 5-7: Installation of the ceramic tool in the tool holder



Abbildung 5-8: Keramisches Werkzeug aus Si₃N₄ nach 5,0 Meter Schweißnaht

Figure 5-8: Ceramic tool made of Si₃N₄ after 5.0 meter weld seam

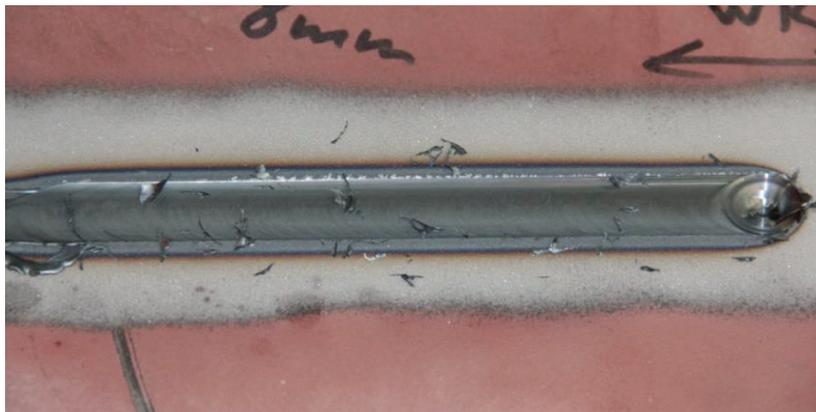


Abbildung 5-9: FSW-Naht an 8,0 mm S355JR unmittelbar nach dem Schweißen
Figure 5-9: FSW seam on 8.0 mm S355JR immediately after welding

Bei dem S355JR wurden Zug- und Biegeprüfungen durchgeführt. Grundlage bilden jeweils beidseitig geschweißte, 8,0 mm dicke Bleche (Probenbezeichnung CS20). Das Versagen der Zugproben erfolgte im Bereich des Grundwerkstoffes. Es war eine etwas geringere Verformung im Bereich der Naht zu beobachten (Abbildung 5-10), die ermittelten Festigkeitswerte entsprachen den eines S355.



Abbildung 5-10: Zugprüfung an 8,0 mm S355JR, Versagen im Grundwerkstoff
Figure 5-10: Tensile test on 8.0 mm S355JR, failure in base material

Die Grundlage bei den Biegeprüfungen bildeten, wie oben beschrieben, beidseitig geschweißte, 8,0 mm dicke Bleche aus S355JR. Die Proben wurden ebenfalls der Versuchsschweißung CS20 entnommen. In Zuglage bei den Biegeprüfungen lag jeweils die zuletzt geschweißte Naht (beidseitige Schweißung). Alle Proben erreichten einen Biegewinkel von 160°, die berechnete Biegedehnung jeweils beträgt 21% (Abbildung 5-11).

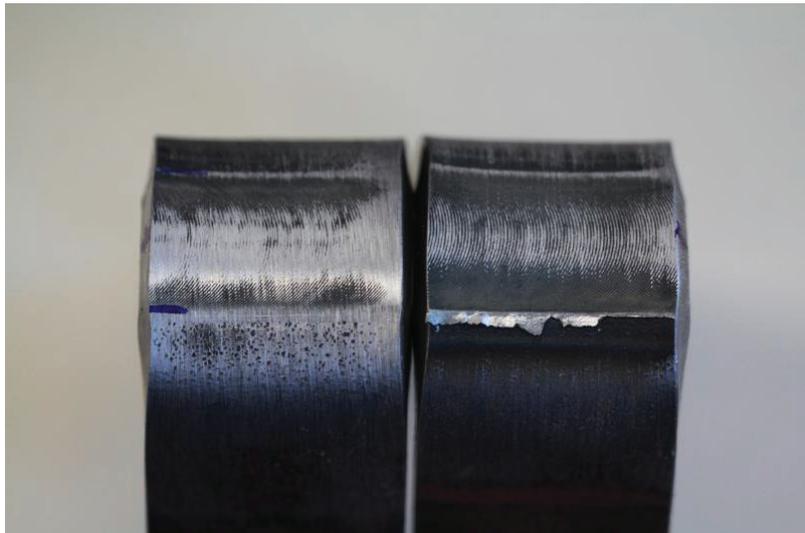


Abbildung 5-11: Biegeprüfung an 8,0 mm S355JR, ohne Anrisse

Figure 5-11: Bending test on 8.0 mm S355JR, without cracks

Die relativ langsame Schweißgeschwindigkeit von 200 mm/min (Ziel: 500 mm/min) bei diesen Versuchen war folgendem Umstand geschuldet. Die Rührreibschweißmaschine der SLV konnte bei den Stahlschweißungen aufgrund der Reaktionskräfte während des Prozesses nicht weiter beschleunigt werden. Es musste auf das Verhältnis der oben genannten Parameter geachtet werden. Die keramischen Werkzeuge produzierten relativ viel Wärme, welche eine höhere Geschwindigkeit zwar erlaubt hätte, allerdings hätte man dazu mehr Axialkraft benötigt. Die Höchstkraft der Maschine war schon erreicht. Günstiger hätte sich auch eine leicht geringere Drehzahl ausgewirkt, war aber aufgrund der Begrenzung des Drehmomentes nicht zielführend. Es wurde in Berlin dann ausschließlich mit den genannten Parametern gearbeitet, die aber auch immer wieder optimiert und an die jeweilige Schweißsituation nach Möglichkeit angepasst wurden. Weitere Versuche wurden später auf einer anderen Rührreibschweißmaschine (bei ESAB, PA-Mitglied) durchgeführt.

5.2.1.1 Weitere Testschweißungen in der SLV Berlin-Brandenburg

Um mit dem etwas eingeschränkten Maschinenparametern trotzdem gut arbeiten zu können wurde ein Werkzeug auf 2,3 mm eingekürzt. Mit diesem Werkzeug wurden im Anschluss Versuche an einem in der SLV vorhandenen Stahl der Güte S185 gefahren. Es konnten bei diesen Versuchen relativ hohe Schweißgeschwindigkeiten erreicht werden, bei sehr guten äußeren Nahtaussehen Abbildung (5-12) und ohne das ein nennenswerter Werkzeugverschleiß feststellbar war. Die Parameter sind der Tabelle 5-1 zu entnehmen. Die Drehrichtung des Werkzeuges war ccw, der Anstellwinkel betrug 2° stechend.



Abbildung 5-12: Versuch CS-3-6, 28 kN, 1000 mm/min

Figure 5-12: Test CS-3-6, 28 kN, 1000 mm/min

Tabelle 5-1: Parameter für S185, Blechdicke 2,4 mm

Table 5-1: Parameters for S185, sheet thickness 2.4 mm

| Drehzahl in min^{-1} | Eindringen in mm/min | Verharren in sek | Kraft in kN | Vorschub in mm/min |
|-------------------------------|----------------------|------------------|-------------|--------------------|
| 800 | 20 | 0,5 | 13 | 400 |
| 1000 | 20 | 0,5 | 24 | 600 |
| 1100 | 20 | 0,5 | 25 | 800 |
| 1200 | 20 | 0,5 | 26-28 | 1000 |

Beispielhafte Ergebnisse von ausgewählten Proben sind der Tabelle 5-2 und der Abbildung 5-13 zu entnehmen. Bei den hier durchgeführten Zugversuchen befanden sich alle Bruchlagen im Grundwerkstoff. Somit kann dieser Versuch als erfolgreich bestanden bewertet werden.

Tabelle 5-2: Zugversuche FSW Stumpfnahht S185/ Test mit Extensometer

Table 5-2: Tensile tests FSW butt weld S185/ test with extensometer

| Ergebnisse: | | | | | | | | |
|--|----|--------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|---------------|-----------|
| Legende | Nr | Probenkennz. | Probendicke a0 mm | Probenbreite b0 mm | S0 mm ² | Fmax kN | Rp 0,2 MPa | Rm MPa |
| | 1 | CS3-4 Z1 | 2,4 | 25,0 | 60,0 | 17,919 | 252 | 299 |
| | 2 | CS3-4 Z2 | 2,4 | 25,0 | 60,0 | 18,045 | 191 | 301 |
| | 3 | CS3-6 Z1 | 2,4 | 25,0 | 60,0 | 17,556 | 184 | 293 |
| | 4 | CS3-6 Z2 | 2,4 | 25,0 | 60,0 | 17,661 | 187 | 294 |

| Statistik: | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------|---------------|------------|-----------|
| Serie n = 4 | S0 mm ² | Probendicke a0 mm | Probenbreite b0 mm | Fmax kN | Rp 0,2 MPa | ReH MPa | Rm MPa |
| \bar{x} | 60,0 | 2,4 | 25,0 | 17,795 | 204 | - | 297 |
| s | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,226 | 33 | - | 4 |
| v | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,27 | 16,01 | - | 1,27 |

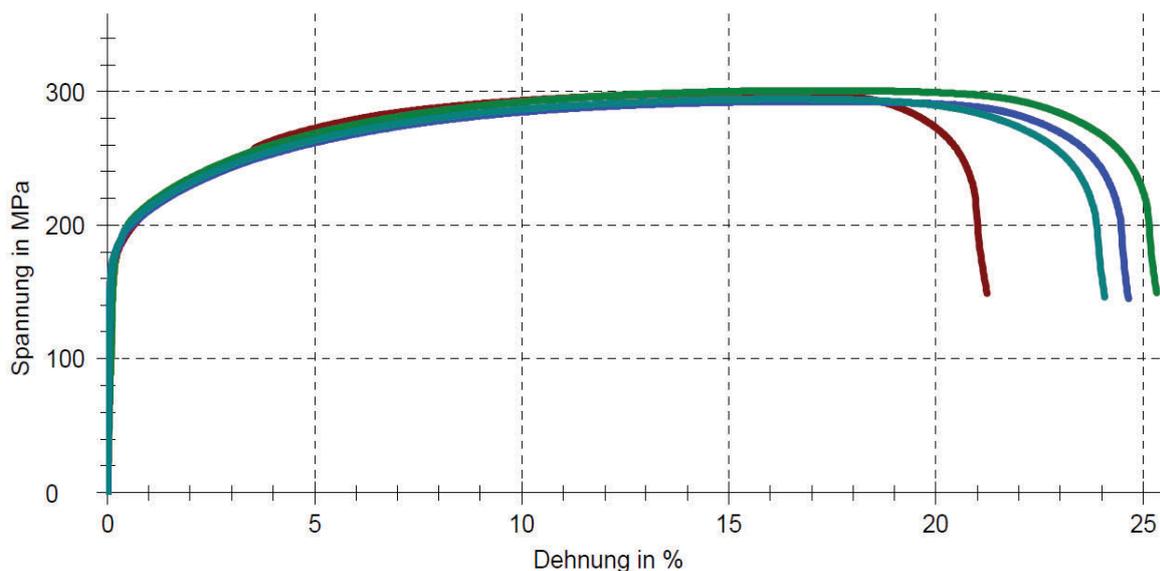


Abbildung 5-13: Zugversuche FSW Stumpfnah S185 / Diagramm

Figure 5-13: Tensile tests FSW butt weld S185 / chart

Bei den Biegeprüfungen konnten bei allen Proben Biegewinkel von 180° ohne Anrisse erreicht werden. Die Makrountersuchungen (Schliffbilder) zeigten ebenfalls keine Auffälligkeiten, Abbildung 5-14.



Abbildung 5-14: Makrountersuchung S185

Figure 5-14: Macro examination S185

5.2.2 Testschweißungen bei ESAB in Laxa, Schweden

Wie oben erwähnt konnten weitergehende Versuche bei dem PA-Mitglied ESAB in Schweden durchgeführt werden. Hintergrund war das etwas zu geringe Drehmoment von maximal 110 Nm der in Berlin vorhandenen Anlage. Vorrangig ging es bei den Schweißungen in Schweden um die Werkzeuge mit 4,0 mm Einschweißtiefe. Die Leistungsparameter von der ESAB-FSW-Labor-Anlage in Laxa (Abbildung 5-15) waren wie folgt:

Maschinentisch 3500 x 400 mm²
Drehmoment max. 600 Nm
Axialkraft max. 90 kN

Der Schweißstisch hat eine Matrix mit M16-Bohrungen im Abstand von jeweils 100 mm. Eine Werkzeugschnittstelle mit Aufnahme Weldon50 ist Standard. Die Eintauchdrehzahl kann gegenüber der Prozessdrehzahl variiert werden, das Gleiche gilt auch für die Kraftregelung. Alle Parameter können während des Schweißens überschrieben werden.



Abbildung 5-15: FSW-Versuchsanlage bei ESAB in Laxa, Schweden

Figure 5-15: FSW test facility at ESAB in Laxa, Sweden

5.2.2.1 Rührreibschweißen an S355MC, Blechdicke 6,0 mm

Bei den Schweißungen wurde ein keramisches Werkzeug für 4,0 mm Einschweißtiefe genutzt. Durch die etwas größere Blechdicke wurde ein Festschweißen an die Unterlage vermieden. Um durch den jetzt vorhandenen Kerb (2,0 mm unverschweißter Bereich) keine Ungenauigkeiten in der Aussage zu bekommen wurden bei den dann nachfolgenden werkstofftechnischen Untersuchungen die Proben auf Einschweißtiefe abgearbeitet. Die Abbildung 5-16 zeigt eine gleichmäßige Rührreibschweißnaht, sehr feinschuppig und ohne nennenswerte Gratbildung. Die Parameter sind der Tabelle 5-3 zu entnehmen. Die Drehrichtung des Werkzeuges war ccw, die Eindringdrehzahl des Werkzeuges 1000 min^{-1} und der Anstellwinkel betrug 2° stechend.



Abbildung 5-16: Versuch 10.3, 32 kN, 240 mm/min

Figure 5-16: Test 10.3, 32 kN, 240 mm/min

Tabelle 5-3: Parameter für S355MC, Blechdicke 6,0 mm

Table 5-3: Parameters for S355MC, sheet thickness 6.0 mm

| Drehzahl in min^{-1} | Eindringen in mm/min | Verharren in sek | Kraft in kN | Vorschub in mm/min |
|-------------------------------|----------------------|------------------|-------------|--------------------|
| 400 | 12 | 0,5 | 30 | 240 |
| 350 | 12 | 0,5 | 35 | 240 |
| 300 | 12 | 0,5 | 35 | 240 |
| 375 | 12 | 0,5 | 32 | 240 |
| 425 | 12 | 0,5 | 28 | 210 |

Beispielhafte Ergebnisse von ausgewählten Proben sind der Tabelle 5-4 und der Abbildung 5-17 zu entnehmen. Bei den hier durchgeführten Zugversuchen befanden sich alle Bruchlagen im Grundwerkstoff. Somit kann dieser Versuch ebenfalls als erfolgreich bewertet werden.

Tabelle 5-4: Zugversuche FSW Stumpfnah S355MC/ Test mit Extensometer

Table 5-4: Tensile tests FSW butt weld S355MC test with extensometer

Ergebnisse:

| Legende | Nr | Probenkennz. | Probendicke a0 mm | Probenbreite b0 mm | S0 mm ² | Fmax kN | ReH MPa | Rp 0,2 MPa | Rm MPa |
|---|----|--------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|------------|---------------|-----------|
|  | 1 | 9.1 Z1 | 4,0 | 25,1 | 100,4 | 59,408 | - | 426 | 592 |
|  | 2 | 9.1 Z2 | 4,0 | 25,1 | 100,4 | 58,629 | 428 | 426 | 584 |
|  | 3 | 9.3 Z1 | 4,0 | 25,1 | 100,4 | 57,753 | 424 | 422 | 575 |
|  | 4 | 9.3 Z2 | 3,9 | 25,0 | 97,5 | 58,116 | 432 | 430 | 596 |
|  | 5 | 10.1 Z1 | 3,9 | 25,0 | 97,5 | 57,716 | - | 426 | 592 |
|  | 6 | 10.1 Z2 | 4,0 | 25,1 | 100,4 | 59,072 | 432 | 438 | 588 |
|  | 7 | 10.3 Z1 | 3,9 | 25,1 | 97,9 | 58,935 | - | 435 | 602 |
|  | 8 | 10.3 Z2 | 3,9 | 25,1 | 97,9 | 58,607 | 435 | 432 | 599 |

Statistik:

| Serie n = 8 | S0 mm ² | Probendicke a0 mm | Probenbreite b0 mm | Fmax kN | Rp 0,2 MPa | ReH MPa | Rm MPa |
|----------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------|---------------|------------|-----------|
| x | 99,0 | 3,9 | 25,1 | 58,530 | 429 | 430 | 591 |
| s | 1,5 | 0,1 | 0,0 | 0,619 | 5 | 4 | 9 |
| v | 1,47 | 1,35 | 0,18 | 1,06 | 1,23 | 0,96 | 1,45 |

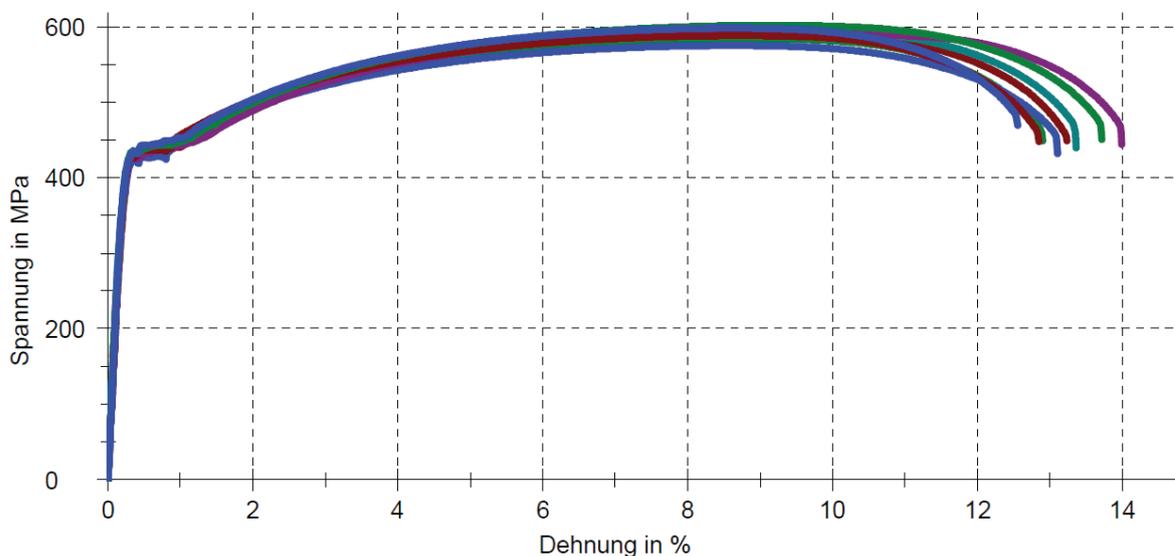


Abbildung 5-17: Zugversuche FSW Stumpfnah S355MC/ Diagramm

Figure 5-17: Tensile tests FSW butt weld S355MC chart

Bei den Biegeprüfungen konnten bei allen Proben Biege Winkel von 180° ohne Anrisse erreicht werden. Die Makrountersuchungen (Schliffbilder) zeigten leichte Fehler (Ungängen, siehe rote Pfeile) im Bereich der unteren 4,0 mm Einschweißtiefe. Diese wirkten sich aber nicht auf Festigkeiten oder den Biege Winkeln aus, Abbildung 5-18.

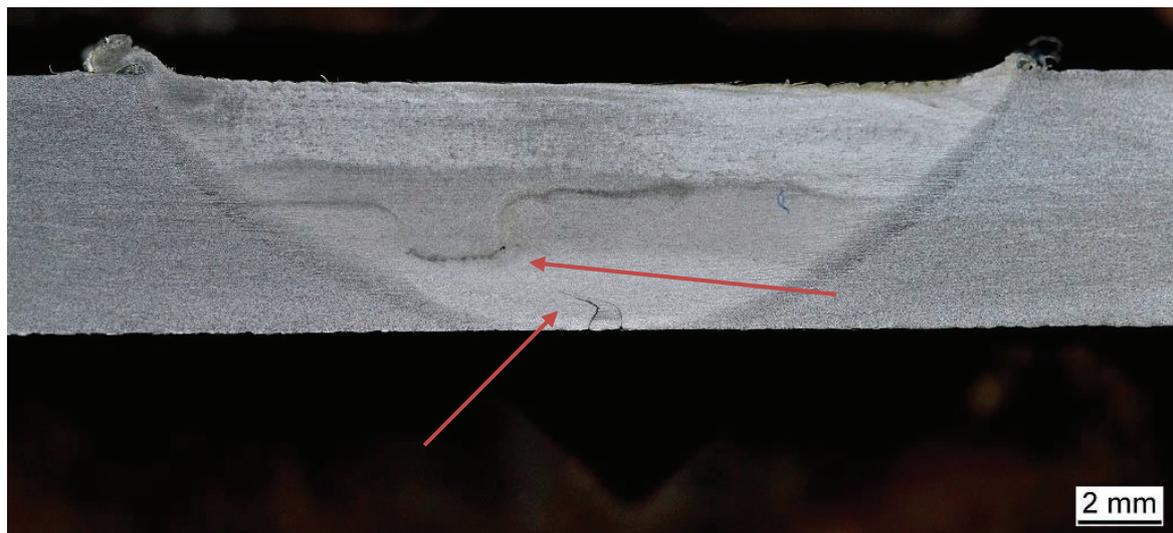


Abbildung 5-18: Makrountersuchung S355MC

Figure 5-18: Macro examination S355MC

5.2.2.2 Rührreibschweißen an S690QL, Blechdicke 6,0 mm

Bei den Schweißungen wurde ein keramisches Werkzeug für 4,0 mm Einschweißtiefe genutzt. Durch die etwas größere Blechdicke wurde ein Festschweißen an die Unterlage vermieden. Es wurde bei diesen Proben allerdings beidseitig geschweißt. Aufgrund der jetzt nicht vorhandenen Kerbe entfiel auch die mechanische Abarbeitung für die nachfolgenden werkstofftechnischen Untersuchungen. Die Abbildung 5-19 zeigt eine gleichmäßige Rührreibschweißnaht, sehr feinschuppig und zum Ende mit etwas Gratbildung. Die Parameter sind der Tabelle 5-5 zu entnehmen. Die Drehrichtung des Werkzeuges war ccw, die Eindringdrehzahl des Werkzeuges 1000 min^{-1} und der Anstellwinkel betrug 2° stechend.



Abbildung 5-19: Versuch 13, 39 kN, 240 mm/min

Figure 5-19: Test 13, 39 kN, 240 mm/min

Durchführung und Auswertung der Rührreißschweißversuche mit keramischen Werkzeugen/
Execution and evaluation of FSW experiments with ceramic tools

Tabelle 5-5: Parameter für S690QL, Blechdicke 6,0 mm

Table 5-5: Parameters for S690QL, sheet thickness 6.0 mm

| Drehzahl in min ⁻¹ | Eindringen in mm/min | Verharren in sek | Kraft in kN | Vorschub in mm/min |
|-------------------------------|----------------------|------------------|-------------|--------------------|
| 450 | 12 | 0,5 | 30-32 | 180 |
| 400 | 12 | 0,5 | 32-35 | 180-240 |
| 450 | 12 | 0,5 | 35-38 | 300 |
| 425 | 12 | 0,5 | 38 | 300 |
| 400 | 12 | 0,5 | 37-42 | 240 |

Beispielhafte Ergebnisse von ausgewählten Proben sind der Tabelle 5-6 und der Abbildung 5-20 zu entnehmen. Bei den hier durchgeführten Zugversuchen befanden sich alle Bruchlagen im Grundwerkstoff. Somit kann dieser Versuch ebenfalls als erfolgreich bewertet werden.

Tabelle 5-6: Zugversuche FSW Stumpfnah S690QL/ Test mit Extensometer

Table 5-6: Tensile tests FSW butt weld S690QL / test with extensometer

| Ergebnisse: | | | | | | | | |
|---|----|--------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|---------------|-----------|
| Legende | Nr | Probenkennz. | Probendicke a0 mm | Probenbreite b0 mm | S0 mm ² | Fmax kN | Rp 0,2 MPa | Rm MPa |
|  | 1 | S690-13-1 | 5,8 | 25,1 | 145,6 | 125,294 | 789 | 861 |
|  | 2 | S690-13-2 | 5,8 | 25,0 | 145,0 | 125,427 | 791 | 865 |
|  | 3 | S690-14-1 | 5,9 | 25,1 | 148,1 | 127,000 | 766 | 858 |
|  | 4 | S690-14-2 | 5,9 | 25,1 | 148,1 | 127,203 | 788 | 859 |

| Statistik: | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------|---------------|------------|-----------|
| Serie n = 4 | S0 mm ² | Probendicke a0 mm | Probenbreite b0 mm | Fmax kN | Rp 0,2 MPa | ReH MPa | Rm MPa |
| x | 146,7 | 5,8 | 25,1 | 126,231 | 783 | - | 861 |
| s | 1,6 | 0,1 | 0,1 | 1,010 | 12 | - | 3 |
| v | 1,11 | 0,99 | 0,20 | 0,80 | 1,52 | - | 0,38 |

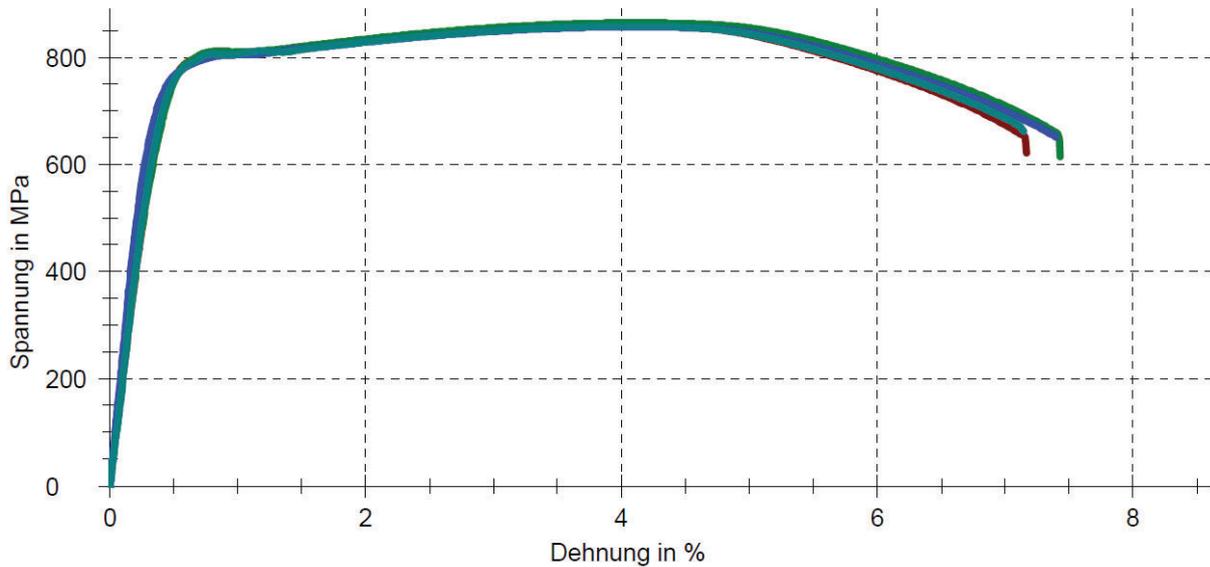


Abbildung 5-20: Zugversuche FSW Stumpfnah S690QL/ Diagramm

Figure 5-20: Tensile tests FSW butt weld S690QL chart

Bei den Biegeprüfungen konnten bei allen Proben Biegewinkel von 180° ohne Anrisse erreicht werden. Die Makrountersuchungen (Schliffbilder) zeigten hier ebenfalls keine Auffälligkeiten, Abbildung 5-21.



Abbildung 5-21: Makrountersuchung S690QL

Figure 5-21: Macro examination S690QL

5.2.2.3 Rührreibschweißen an X5CrNi18-10, Blechdicke 5,0 mm

Bei den Schweißungen wurde ein keramisches Werkzeug für 4,0 mm Einschweißtiefe genutzt. Auch hier wurde durch die etwas größere Blechdicke ein Festschweißen an die Unterlage vermieden. Um durch den jetzt vorhandenen Kerb (1,0 mm unverschweißter Bereich) keine Ungenauigkeiten in der Aussage zu bekommen wurden bei den dann nachfolgenden werkstofftechnischen Untersuchungen die Proben wieder auf Einschweißtiefe abgearbeitet. Die Abbildung 5-22 zeigt eine gleichmäßige Rührreibschweißnaht, sehr feinschuppig und ohne nennenswerte Gratbildung. Die

Durchführung und Auswertung der Rührreibschweißversuche mit keramischen Werkzeugen/
 Execution and evaluation of FSW experiments with ceramic tools

Parameter sind der Tabelle 5-7 zu entnehmen. Die Drehrichtung des Werkzeuges war ccw, die Eindringdrehzahl des Werkzeuges lag bei 800 bis 1000 min^{-1} und der Anstellwinkel betrug 2° stechend. Es wurde auch hier ohne Schutzgas geschweißt.



Abbildung 5-22: Versuch 7, 62 kN, 180 mm/min

Figure 5-22: Test 7, 62 kN, 180 mm/min

Tabelle 5-7: Parameter für X5CrNi18-10 Blechdicke 5,0 mm

Table 5-7: Parameters for X5CrNi18-10, sheet thickness 5.0 mm

| Drehzahl in min^{-1} | Eindringen in mm/min | Verharren in sek | Kraft in kN | Vorschub in mm/min |
|-------------------------------|----------------------|------------------|-------------|--------------------|
| 300 | 12 | 0,5 | 45 | 120 |
| 200 | 12 | 0,5 | 55-60 | 120 |
| 250 | 18 | 0,5 | 62 | 180 |
| 150 | 18 | 0,5 | 63 | 180 |

Beispielhafte Ergebnisse von ausgewählten Proben sind der Tabelle 5-8 und der Abbildung 5-23 zu entnehmen. Bei den hier durchgeführten Zugversuchen befanden sich alle Bruchlagen im Grundwerkstoff. Somit kann dieser Versuch ebenfalls als erfolgreich bewertet werden.

Tabelle 5-8: Zugversuche FSW Stumpfnah X5CrNi18-10 / Test mit Extensometer

Table 5-8: Tensile tests FSW butt weld X5CrNi18-10 / test with extensometer

| Ergebnisse: | | | | | | | | |
|--------------------|----|-------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|---------------|-----------|
| Legende | Nr | Probekennz. | Probendicke a0 mm | Probenbreite b0 mm | S0 mm ² | Fmax kN | Rp 0,2 MPa | Rm MPa |
| | 1 | H6 Z1 | 3,9 | 25,0 | 97,5 | 66,855 | 347 | 686 |
| | 2 | H6 Z2 | 4,0 | 25,0 | 100,0 | 68,295 | 356 | 683 |
| | 3 | H7 Z1 | 3,9 | 25,0 | 97,5 | 67,700 | 357 | 694 |
| | 4 | H7 Z2 | 4,0 | 25,0 | 100,0 | 67,426 | 345 | 674 |
| | 5 | H8 Z1 | 4,0 | 25,0 | 100,0 | 68,159 | 370 | 682 |
| | 6 | H8 Z2 | 2,9 | 25,0 | 72,5 | 47,294 | 345 | 652 |
| | 7 | H9 Z1 | 3,7 | 25,0 | 92,5 | 63,886 | 365 | 691 |
| | 8 | H9 Z2 | 3,7 | 25,1 | 92,9 | 65,718 | 384 | 708 |

| Statistik: | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------|---------------|------------|-----------|
| Serie n = 8 | S0 mm ² | Probendicke a0 mm | Probenbreite b0 mm | Fmax kN | Rp 0,2 MPa | ReH MPa | Rm MPa |
| \bar{x} | 94,1 | 3,8 | 25,0 | 64,417 | 359 | - | 684 |
| s | 9,2 | 0,4 | 0,0 | 7,071 | 14 | - | 16 |
| v | 9,82 | 9,84 | 0,14 | 10,98 | 3,77 | - | 2,36 |

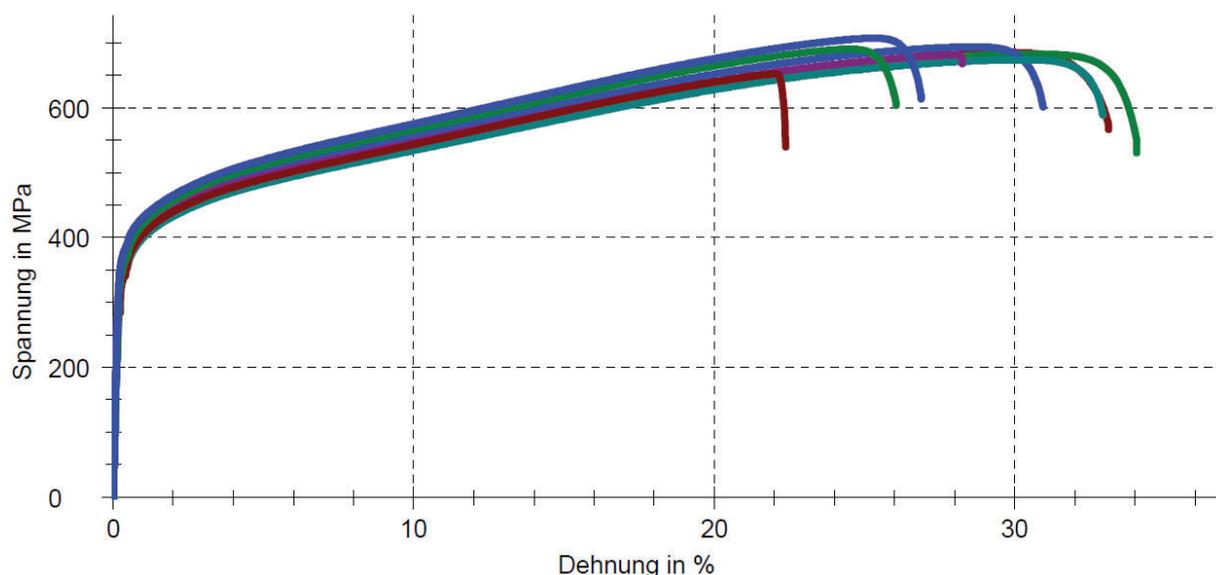


Abbildung 5-23: Zugversuche FSW Stumpfnah X5CrNi18-10 / Diagramm

Figure 5-23: Tensile tests FSW butt weld X5CrNi18-10 / chart

Bei den Biegeprüfungen konnten bei allen Proben Biegewinkel von 180° ohne Anrisse erreicht werden. Die Makrountersuchungen (Schliffbilder) zeigten keine gravierenden Auffälligkeiten, Abbildung 5-24.

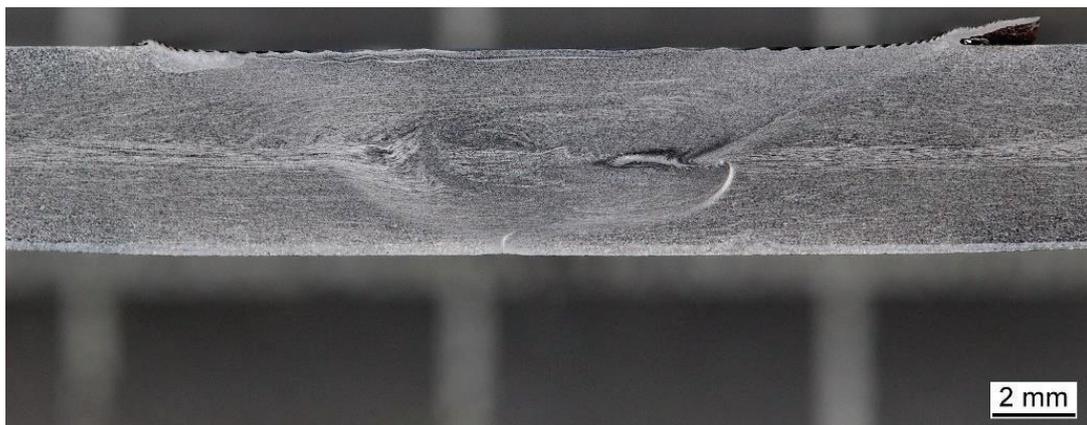


Abbildung 5-24: Makrountersuchung X5CrNi18-10

Figure 5-24: Macro examination X5CrNi18-10

5.2.2.4 Rührreibschweißen an H800 als Überlappstoß, Blechdicke 2,5 mm

Bei den Schweißungen wurde das obligatorische keramische Werkzeug für 4,0 mm Einschweißtiefe genutzt. Durch die Ausführung als Überlappstoß und damit mit einer Gesamtlechdicke von 5,0 mm wurde ein Festschweißen an die Unterlage generell vermieden. Die Abbildung 5-25 zeigt auch hier eine gleichmäßige Rührreibschweißnaht, sehr feinschuppig und ohne nennenswerte Gratbildung. Die Parameter sind der Tabelle 5-9 zu entnehmen. Die Drehrichtung des Werkzeuges war auch hier ccw, die Eindringdrehzahl des Werkzeuges lag bei 1000 min^{-1} und der Anstellwinkel betrug 2° stechend. Es wurde ohne Schutzgas geschweißt.



Abbildung 5-25: Versuch 3, 63 kN, 90 mm/min

Figure 5-25: Test 3, 63 kN, 90 mm/min

Durchführung und Auswertung der Rührreißschweißversuche mit keramischen Werkzeugen/
 Execution and evaluation of FSW experiments with ceramic tools

Tabelle 5-9: Parameter für H800, Gesamtblechdicke 5,0 mm

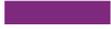
Table 5-9: Parameters for X5CrNi18-10, total sheet thickness 5.0 mm

| Drehzahl in min^{-1} | Eindringen in mm/min | Verharren in sek | Kraft in kN | Vorschub in mm/min |
|-------------------------------|----------------------|------------------|-------------|--------------------|
| 200 | 12 | 0,5 | 63 | 90 |

Beispielhafte Ergebnisse von ausgewählten Proben sind der Tabelle 5-10 und der Abbildung 5-26 zu entnehmen. Bei den hier durchgeführten Zugversuchen befanden sich alle Bruchlagen im Grundwerkstoff. Somit kann dieser Versuch ebenfalls als erfolgreich bewertet werden. Allerdings wurde nur die erste Probe mit Extensometer geprüft, dieser Versuch musste abgebrochen werden. Es kam augenscheinlich zu einer Kaltverfestigung. Der Versuch wurde ohne Extensometer wiederholt und auch die weiteren Proben wurden ohne Extensometer geprüft.

Tabelle 5-10: Zugversuche FSW Überlappstoß H800

Table 5-10: Tensile tests FSW lap joint H800

| Ergebnisse: | | | | | | | |
|---|----|--------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------|
| Legende | Nr | Probenkennz. | Probendicke a0 mm | Probenbreite b0 mm | S0 mm ² | Fmax kN | Rm MPa |
|  | 1 | H800-3Z1 | 2,5 | 39,3 | 98,3 | 91,455 | 931 |
|  | 2 | H800-3Z1 | 2,5 | 39,3 | 98,3 | 99,111 | 1009 |
|  | 3 | H800-3Z2 | 2,5 | 39,8 | 99,5 | 97,749 | 982 |
|  | 4 | H800-4Z1 | 2,5 | 39,9 | 99,8 | 95,861 | 961 |
|  | 5 | H800-4Z2 | 2,5 | 39,8 | 99,5 | 95,383 | 959 |

| Statistik: | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------|---------------|------------|-----------|
| Serie n = 5 | S0 mm ² | Probendicke a0 mm | Probenbreite b0 mm | Fmax kN | Rp 0,2 MPa | ReH MPa | Rm MPa |
| \bar{x} | 99,0 | 2,5 | 39,6 | 95,912 | 670 | - | 968 |
| s | 0,7 | 0,0 | 0,3 | 2,905 | 121 | - | 29 |
| v | 0,74 | 0,00 | 0,74 | 3,03 | 17,99 | - | 3,00 |

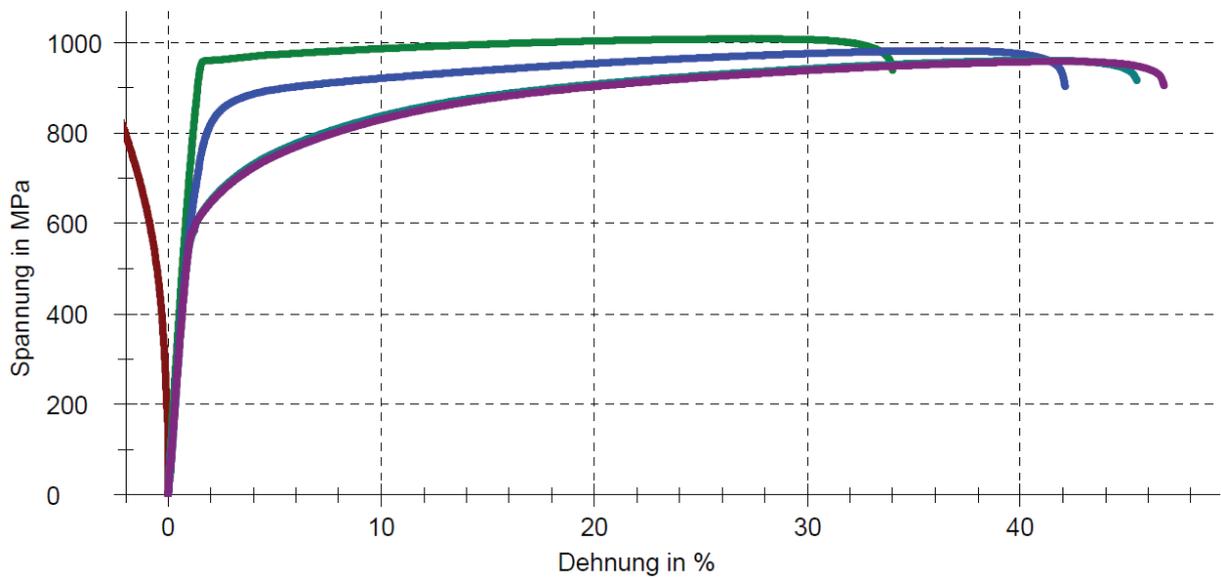


Abbildung 5-26: Zugversuche FSW Überlappstoß H800 / Diagramm

Figure 5-26: Tensile tests FSW lap joint H800 / chart

Zusätzliche S-Biege-Hammerprüfungen (siehe DIN EN ISO 25239-4) konnten bei allen Proben positiv bewertet werden. Die Makrountersuchungen (Schliffbilder) zeigten keinerlei Auffälligkeiten, Abbildung 5-27.

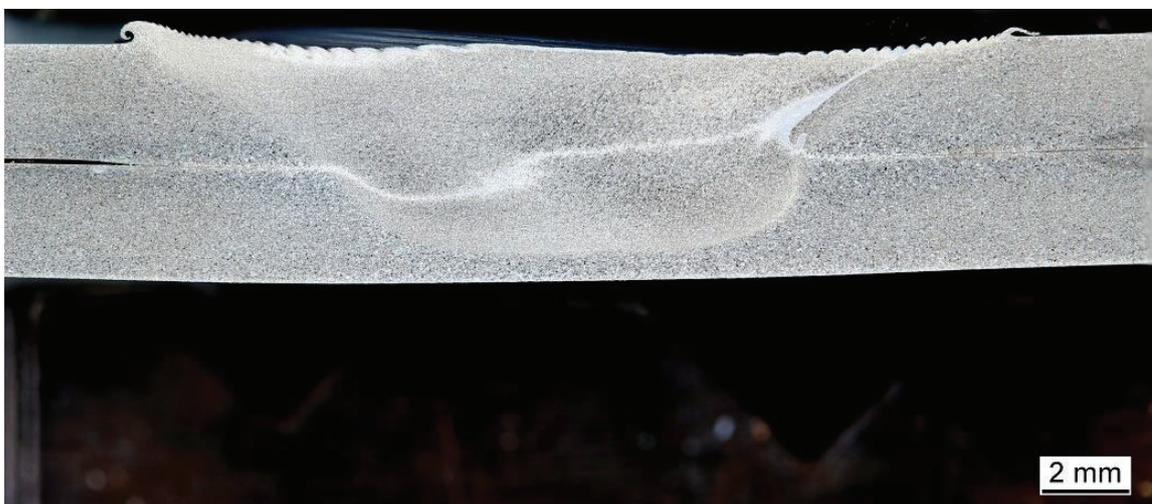


Abbildung 5-27: Makrountersuchung H800

Figure 5-27: Macro examination H800

6 Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse/ Evaluation and summary of the results

Kurzfassung

Die Ergebnisse zeigten eindeutig, dass hier der richtige Weg beschritten wurde. Gerade auch in Hinblick auf die Verfügbarkeit und der preislichen Gestaltung der neuartigen keramischen Werkzeuge ist Rührreibschweißen an Stahl nicht nur ein Exot für Universitäten und Institute, sondern tatsächlich eine Alternative für KMU in diesem Bereich. Fügемöglichkeiten, gerade auch im Dünublechbereich, sind mit einer akzeptablen Schweißgeschwindigkeit durchführbar, ohne bisherige Nachteile in Kauf nehmen zu müssen. Nach Einsatz des Verfahrens an Prototypen oder auch an erste reale Bauteile werden sich weitere Einsatzbereiche ergeben. Damit konnte das Rührreibschweißverfahren (FSW) um einen zusätzlichen Einsatzbereich erweitert werden. Erste Kundenanfragen bestätigen diesen Trend.

Abstract

The results clearly showed that this was the right way to go. Friction stir welding on steel is not only an exotic option for universities and institutes, especially with regard to the availability and pricing of the novel ceramic tools, but actually an alternative for SMEs in this field. Friction stir welding on steel is not only an exotic option for universities and institutes, but actually an alternative for SMEs in this field. After application of the process on prototypes or even on first real components, further fields of application will arise. Thus the friction stir welding process (FSW) could be extended by an additional field of application. First customer inquiries confirm this trend.

6.1 Fazit aus den Versuchen und Forschungsergebnissen/ Conclusion from the experiments and research results

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Rührreibschweißen an Stahl durchaus eine Alternative zu den etablierten Schmelzschweißverfahren sein kann. Bisher lagen nur wenige Forschungsergebnisse, vor allem aus dem universitären Bereich vor. Dem wirtschaftlichen Einsatz dieser Technologie bei den KMU (an Stählen) standen die bisher nicht ausreichenden Werkzeugstandzeiten entgegen. Die Temperatur- und Verschleißbeständigkeit, als auch die mechanische Festigkeit der verfügbaren Werkzeuge entsprach nicht den hohen Anforderungen des Fügeprozesses. Auch die preisliche Gestaltung z.B. bei pcBN-Werkzeugen aus den USA ist für einen wirtschaftlichen Einsatz nicht darstellbar. Innerhalb des Forschungsprojektes konnte bereits eine große Palette der gebräuchlichsten Stahlwerkstoffe erfolgreich geschweißt werden. Mit den hier erzielten Ergebnissen konnten viele bisherige Nachteile beseitigt werden.

Zusammenfassend sollen an dieser Stelle die Vorteile des Rührreibschweißens an Stahl herausgestellt werden.

Allgemein:

- Die Verbindung erfolgt immer in der festen Phase. Damit wird der Gefahr der Riss- oder Porenbildung begegnet. Durch den niedrigen Energieeintrag während des Fügeprozesses entsteht nur ein sehr geringer Verzug der Bauteile und der damit verbundene Nacharbeitsaufwand ist minimal.
- Der Fügeprozess ist lageunabhängig und benötigt weder Zusatzwerkstoffe, Hilfsstoffe wie Gase, noch eine aufwendige Oberflächen- bzw. Kantenvorbereitung.
- Der Fügeprozess ist umweltfreundlich und einfach zu automatisieren und zu überwachen.
- Bauteile aus unterschiedlichen Legierungen oder Stahlarten sind miteinander relativ problemlos verbindbar.
- Keine Nachbearbeitung der Schweißnaht erforderlich, keine Schweißspritzer.

Einfache Nahtvorbereitung:

- Die Qualität der üblichen mechanischen oder thermischen Verfahren des Zuschneidens von zu fügenden Teilen ist ausreichend (Sägeschnitt, thermisches Trennen mittels Brennschneiden, Plasma- oder Laserschneiden).
- Keine spezielle mechanische Nahtvorbereitung nach dem thermischen Trennen erforderlich.
- Der Schweißstoßbereich muss lediglich fettfrei sein.

Hohe Prozesssicherheit und -reproduzierbarkeit:

- Relativ einfache Automatisierbarkeit des Schweißprozesses.
- Im Wesentlichen gibt es drei technologische Parameter, die vorgegeben und überwacht werden müssen (Drehzahl, Axialkraft, Schweißgeschwindigkeit).
- Kein speziell schweißtechnisch qualifiziertes Personal zur Anlagenbedienung erforderlich.

Stoffschlüssige Verbindung wird in der festen Phase erzeugt:

- Verminderte Gefahr der Poren- und Rissbildung.
- geringerer Wärmeeintrag im Vergleich zu den Schmelzschweißverfahren (Plastifizierungstemperatur ca. 1200 °C).
- Geringerer Verzug bzw. Bauteil deformation im Endergebnis des Schweißprozesses.
- Im Vergleich zum Schmelzschweißen kaum Veränderung der Materialeigenschaften und damit gute mechanische Eigenschaften sowie Dauerfestigkeitswerte.
- Geringer Energiebedarf, unmittelbare Erzeugung der notwendigen Wärmeenergie im Stoßbereich.

Geringe Arbeitsplatzbelastung:

- Keine Strahlungsbeeinflussung durch Lichtbogen.
- Keine Schweißdämpfe, Rauche oder ähnliches.
- Keine erhöhte Lärmbelastung.
- Keine Umweltbelastung.

Insbesondere die einfache Nahtvorbereitung, die hohe Qualität der Schweißnaht sowie die weitgehende Vermeidung von Deformationen sichern einen äußerst produktiven und wirtschaftlichen Schweißprozess. Die entwickelten keramischen Werkzeuge können kostengünstig hergestellt und angeboten werden. Bisher werden dafür nur ca. 10% des Preises für ein vergleichbares Werkzeug aus Wolfram-Rhenium oder pcBN aufgerufen. Bei einer entsprechenden Nachfrage kann dieses Preisniveau auch noch deutlich sinken.

Im Moment können allerdings nur Schweißnahtlängen von 10,0 Metern sicher mit einem Werkzeug hergestellt werden, geplantes und angestrebtes Ziel waren 16,0 Meter. Auch die geplante Schweißgeschwindigkeit von 500 mm/min bei einer Einschweißtiefe von 4,0 mm konnte noch nicht realisiert werden. Aktuell liegt diese bei 300 mm/min. Allerdings konnten im Dünnsblechbereich (< 3,0 mm) Schweißgeschwindigkeiten von einem Meter pro Minute bei einer wesentlich höheren Standzeit des Werkzeuges erreicht werden. Die SLV Berlin-Brandenburg und das FGK und Höhr-Grenzhausen arbeiten auch nach Abschluss des Projektes intensiv weiter, um die schon erreichten Ergebnisse weiter zu entwickeln und der Industrie (KMU) immer bessere Werkzeuge, aber auch Parameter für verschiedenste Stähle zur Verfügung zu stellen.

7 Literaturverzeichnis / Bibliography

- /1/ Schofer,E.: Friction Stir Welding – Vorteile eines neues Schweißverfahrens. Vortragsmanuskript ISF-Kolloquium „Fügen von Leichtmetallen“ Aachen 06/08.
- /2/ Kallee,S.W., E.D. Nicholas, und W.M. Thomas: FSW: Erfindung, Innovation und Anwendung. Vortrag 2. GKSS Workshop FSW 22./23.01.2002, Geesthacht.
- /3/ Johnson, R.: Friction stir welding conquers austenitic stainless steel. Welding & Metal Fabrication Nov/Dez 2000.
- /4/ Konkol, J., J. Maters, R. Johnson: FSW of HSLA-65 Steel for Shipbuilding. Vortragsmanuskript des Third International Symposium FSW, Port Island, Kobe, Japan, 2001.
- /5/ Forschungsbericht AiF-Nr. 14.574; DVS-Nr. 05.036: Rührreibschweißen von Stahl und Stahl-Werkstoffkombinationen mit lokaler induktiver Erwärmung, SLV Berlin-Brandenburg, Berlin, Oktober 2008
- /6/ Forschungsbericht, Dokumentation D 764: Integration des Rührreibschweißens in Fertigungsprozessketten, IGF-Vorhaben 15.685, 15.687 und 15.689 der Forschungsvereinigung des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS), IGFVorhaben 15.686 (P 754) der FOSTA - Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., IGF-Vorhaben 15.688 der Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA), 2011 Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf
- /7/ R. Zettler, T. Donath, J.F. Santos, F. Beckman, D. Lohwasser, Validation of Marker Material Flow in 4mm Thick Friction Stir Welded Al2024-T351 through Computer Microtomography and dedicated Metallographic Techniques, Advanced Engineering Materials, 8, No. 6, (2006)
- /8/ W.M. Thomas, I.M. Norris, D.G. Staines, E.R. Watts, Friction Stir Welding – Process Developments and Variant Techniques, Proceedings, The SME Summit 2005, Milwaukee, USA, August 2005
- /9/ W. Thomas, C. Wiesner, D. Staines, I. Norris, Friction stir welding technology – preliminary studies of variant techniques – Part 1, Welding and Cutting 5 (2006), No. 6

- /10/ W. Thomas, C. Wiesner, D. Staines, I. Norris, Friction stir welding technology – preliminary studies of variant techniques – Part 2, *Welding and Cutting* 6 (2007), No. 1
- /11/ T.J. Lienert, W.L. Stellwag, B.B. Grimmert, R.W. Warke, Friction Stir Welding on Mild Steel, *Supplement to the Welding Journal, Welding Research*, January 2003
- /12/ S. Park, Y. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano, M. Inakagi, Microstructures and properties of friction stir welded 304 austenitic stainless steel, *Welding International*, Vol. 19, Issue 11, (2005)
- /13/ J.-H. Cho, P.R. Dawson, Investigation on Texture Evolution during Friction Stir Welding of Stainless Steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 37A, (2006)
- /14/ T.W. Nelson, C.D. Sorensen, R. Steel, S. Packer, Friction Stir Welding of Dual Phase Steel, *Präsentation*
- /15/ W.M. Thomas, P.L. Threadgill, E.D. Nicholas, Feasibility of friction stir welding steel, *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 4, No. 6, (1999)
- /16/ D. Statton, C. Sorensen, Characterizing the frictional interface between PCBN and 1018 steel for friction stir welding numerical models, *WIT Transactions on Engineering Sciences*, Vol. 51, (2005)
- /17/ Qingyuan Liu, Russell Steel, Jeremy Peterson, Scott Horman, Matt Collier, MegaDiamond, Smith International Inc. Provo, Utah, USA; Davia B. Marshall, Janet B. Davis, Teledyne Scientific Company Thousand Oaks, California, USA; Murray Mahoney, Consultant, Midway, Utah, USA, *Advances in Friction Stir Welding Tooling Materials Development, Proceedings of the Twentieth (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference Beijing, China, June 20-25, 2010*
- /18/ EU-Projekt RFS-PR-03077, Solving Steel Welding Problems by the use of Friction Stir, SOLVSTIR
- /19/ ZIM-Projekt VP2349001PK9, Rührreibschweißen für das Fügen großflächiger Stahlstrukturen - FSW-Steel; Teilprojekt SLV Berlin-Brandenburg: Bestimmung der Prozessparameter und Optimierung des Werkzeugdesigns 2009-2011
- /20/ P.J. Konkol, M.F. Mruzek, Comparison of Friction Stir Weldments and Submerged-Arc Weldments in HSLA-65 Steel, *Präsentation, NSRP SP-7 Meeting*, April 2006

- /21/ Seung Hwan C. Park, Yutaka S. Sato, Hiroyuki Kokawa, Kazutaka Okmoto, Satoshi Hirano, Masahisa Inagaki, Boride Formation Induced by pcBN Tool Wear in Friction-Stir-Welded Stainless Steels, DOI: 10.1007.s11661-008-9709-9, The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2009
- /22/ HILDA - High Integrity Low Distortion Assembly, 7. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union, 01.09.2012 - 31.08.2015
- /23/ DIN EN ISO 25239 Teil1 bis 5, Rührreibschweißen an Aluminiumwerkstoffen