

COMPETENCE

Competence



Characterisation
of 2 1/4 CrMoV weld metal
at different stages during
the manufacturing of
pressure vessels **5**

Grade 23 tubes, pipes and
welded joints production:
materials, consumables and
process developments **13**

MIG-welding of Aluminium
alloys with reduced porosity
using a pulsed sprayarc **23**

*Eigenschaften eines 2 1/4
CrMoV Schweißgutes
während verschiedener
Fertigungsstufen eines
Druckbehälters **5***

*Rohre und
Schweißverbindungen aus
hochwarmfestem
Stahl Grad 23: Werkstoff-,
Schweißzusatz- und
Verfahrensentwicklungen **13***

*Porenreduziertes
MIG Schweißen von
Alu-Werkstoffen durch
gepulsten Lichtbogen. **23***



COMPETENCE Issue 2 Foreword

The Air Liquide Technical Centre for Welding & Cutting Applications, or CTAS, will celebrate its 50th anniversary next January with our worldwide customers and with our academic and industrial partners. Air Liquide considered that innovation in welding and cutting was essential fifty years ago and this has been fully justified, remaining central to the Air Liquide business development programme.

During this period, CTAS has accompanied and regularly driven the evolution of welding and cutting technologies. The international setting of Air Liquide Welding is a real opportunity to reinforce this trend of innovation enrichment, demonstrated by the international authors of the technical papers presented in this second edition of Oerlikon Competence.

The CTAS experts, engineers and welders are fully dedicated to the research and development of new welding and cutting technologies and to the technical support of both Air Liquide business development and our customers. CTAS creates the opportunity to benefit from the comprehensive testing and characterization facilities for the development of complete solutions including equipment, automation, gas and consumables. This capacity to develop and produce the widest range of welding consumables, associated with expertise in metallurgy and process know-how, is quite unique and at CTAS we develop creativity and reactivity in supporting our customers and developing new and innovative products.

We hope you will enjoy the following technical papers concerning the development and applications of Oerlikon Cromo and Carborod products for the welding of new creep resistant steel grades and developments to improve the MIG welding process for aluminium alloys. We are looking forward to keeping you up to date with our work at CTAS, in future editions of Oerlikon Competence.

KOMPETENZ Vorwort

Das CTAS (Air Liquide Forschungszentrum für die Schweiß- und Schneidtechnik) feiert kommenden Januar sein 50-jähriges Jubiläum mit Kunden aus der ganzen Welt sowie Partnern aus Wissenschaft und Industrie. Dieses Ereignis zeigt, dass Innovation im Bereich Schweißen und Schneiden bereits vor fünfzig Jahren einen hohen Stellenwert besaß und für die Entwicklung von Air Liquide heute noch genauso wichtig ist.

Dieses Jubiläum zeigt aber auch, dass das CTAS die Fortschritte in der Schweißtechnik begleiten und manchmal auch vorantreiben konnte. Die internationale Aufstellung von Air Liquide Welding ist eine sehr gute Möglichkeit, diese Tradition weiterzuführen. Dies wird auch durch die Beiträge internationaler Autoren in dieser Ausgabe von „Competence“ deutlich.

Die Fachleute, Ingenieure und Schweißtechniker am CTAS arbeiten hauptsächlich an der Erforschung und Optimierung neuer Schweiß- und Schneidtechnologien um mit neuen Entwicklungen die Kunden bestmöglich zu unterstützen. Sie nutzen die zahlreichen Test- und Analysemöglichkeiten, um Komplettlösungen aus einer Hand zu entwickeln - Geräte, Automation, Gase und Zusatzwerkstoffe. Diese Möglichkeit, Formeln zu entwickeln und alle möglichen Zusatzwerkstoffe zu produzieren ist, zusammen mit dem Fachwissen in Metallurgie und Verfahrenstechnik, ziemlich einzigartig und schafft die Voraussetzung für neue Ideen und deren Umsetzung. Damit sind wir in der Lage, Sie bei Ihren Aufgaben zu unterstützen und Ihnen neue Lösungen anzubieten.

Wir hoffen mit den neuen Beiträgen über die Anwendung und Eigenschaften der Oerlikon Cromo Produkte für das Schweißen neuer warmfester Werkstoffe sowie über den verbesserten MIG-Schweiß-Prozess für Aluminiumlegierungen für Sie interessante Themen gefunden zu haben. Auch in den kommenden Ausgaben werden wir Sie über Neuentwicklungen aus dem CTAS informieren.

N. Monier

These technical papers were selected for inclusion in OERLIKON Competence by the Editorial Panel, comprising:

P. Rouault, CTAS
 C. de Giorgi, ALW- Italy
 B. Schlatter, ALW - Germany
 D.S. Taylor, ALW
 The editor is G. Roue, ALW

Competence

Introduction

Welcome to the second edition of "Competence", the journal of Oerlikon welding technology. We were delighted with the number of registrations and the quality of feedback following our first issue. This edition contains three articles, two concerned with consumable developments for higher temperature power plant applications and the third with a development of the MIG welding process for aluminium alloys, now incorporated into the new generation of Oerlikon CITOWAVE machines as Spray Modal®.

"Characterisation of a 2 ¼ CrMoV Weld Metal at Different Stages During the Manufacturing Process of a Pressure Vessels" by A. Bertoni and C. Bonnet, brings together the many complex aspects of the welding of 2¼Cr1MoV creep resistant steels in a way which will be of practical interest to welding engineers. The various mechanical property requirements following complex heat treatment cycles are satisfied using a OERLIKON submerged arc wire/flux combination, specifically designed for the welding of these vanadium bearing steels for high temperature applications: OERLIKON CROMO F537 flux and OERLIKON CROMO S225V wire.

"Grade 23 Tubes, Pipes and Welded Joints Production: Materials, Consumables and Process Developments" by Cumino et al is the result of a collaboration between a major fabricator, TenarisDalmine, a materials institute, Centro Sviluppo Materiali - CSM, and Air Liquide Welding, to characterize the long term properties of welded joints made using the SMAW and SAW processes in types 23 low alloy steel. These low alloy steel have been designed to provide a cost effective route to increasing the operating temperatures and consequently the efficiency of power plant. The OERLIKON OE CROMOCORD E223 (SMAW) and OE CROMO SF 223 with OP 121TTW (SAW) welding consumables, specifically developed for these type 23 steel applications, meet the demanding requirements of the relevant standards.

"MIG-welding of Aluminium Alloys with Reduced Porosity using a Pulsed Sprayarc". In order to keep pace with the technological developments in the transport industry, automotive, railway, ship building and aerospace, the energy sector and the chemical and food industries, the welding processes have to be adapted for the fabrication of lighter materials. Aluminium and aluminium alloys are frequently used in these industrial sectors and to meet the productivity and quality, welding process developments are continuously required. Advances in the improvement of welding processes such as MIG welding, have resulted in the introduction of the OERLIKON CITOWAVE range of arc welding equipment, offering advanced welding solutions for the fabrication of these lighter materials.

If you have already registered as a reader of Oerlikon Competence, future editions will be sent by post automatically. Otherwise, we hope you will find this journal interesting and will register for future editions, either by completing and returning the information card or alternatively, by visiting our web site www.oerlikon-welding.com and registering on line.

Thank you,
Claudio de Giorgi - Oerlikon Deputy Brand Manager
Air Liquide Welding - Italy

Competence

Einleitung

Willkommen in der zweiten Ausgabe von "Competence", der Oerlikon Zeitschrift für Schweißtechnik. Wir haben uns sehr über die vielen Registrierungen und positiven Rückmeldungen nach der ersten Ausgabe gefreut. Diesmal erwarten Sie drei Beiträge. Zwei behandeln die Weiterentwicklung von Schweißzusätzen für warmfeste Stähle in der Kraftwerksindustrie während im dritten die Entwicklung einer MIG-Schweißprozess-Variante für Aluminiumlegierungen beschrieben wird, die als Spray Modal® jetzt in die neue Generation der Oerlikon CITOWAVE Anlagen integriert wurde.

"Eigenschaften eines 2¼CRMOV Schweißgutes während verschiedener Fertigungsstufen eines Druckbehälters" von A. Bertoni und C. Bonnet beschreibt die während der Fertigung zu beachtenden komplexen Aspekte beim Schweißen eines 2¼Cr1MoV legierten warmfesten Werkstoffes. Die hohen Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften des Schweißgutes im Anschluss an verschiedene Wärmebehandlungen werden von einer speziell für die warmfesten V-legierten Stähle entwickelten OERLIKON Draht-Pulver-Kombination erfüllt: OERLIKON OE CROMO S225V mit OERLIKON OP CROMO F537.

"Rohre und Schweißverbindungen aus hochwarmfestem Stahl Grad 23: Werkstoff-, Schweißzusatz- und Verfahrensentwicklungen" von Cumino et al ist das Ergebnis einer Kooperation zwischen TenarisDalmine, einem großen Hersteller, der Materialforschungsanstalt Centro Sviluppo Materiali - CSM und Air Liquide Welding zur Untersuchung der Zeitstandseigenschaften von Schweißverbindungen, die mit dem E-Hand (SMAW) und dem UP-Verfahren (SAW) an niedrig legiertem Stahl Grad 23 hergestellt wurden. Diese niedrig legierten Stähle wurden entwickelt, um einen kostengünstigen Weg für eine Erhöhung der Betriebs-temperaturen und damit der Wirtschaftlichkeit von Kraftwerken zu erreichen. Die Elektrode OERLIKON CROMOCORD E223 (SMAW) und die Draht-Pulver Kombination OERLIKON OE CROMO SF 223 mit OERLIKON OP 121TTW (SAW) wurden speziell für diese Grad 23 Anwendungen entwickelt und erfüllen die hohen Anforderungen der geltenden Normen.

"Porenreduziertes MIG Schweißen von Alu-Werkstoffen durch gepulsten Lichtbogen", Um mit der technologischen Entwicklung in der Transportindustrie (Automobil, Bahn, Schiffbau, Flugzeug, Raumfahrt), der Energiegewinnung, der chemischen - und Nahrungsmittelindustrie Schritt zu halten, müssen die Schweißverfahren ständig angepasst und optimiert werden. In diesen Branchen werden vermehrt leichtere Werkstoffen wie Aluminium und Aluminiumlegierungen eingesetzt. Um die Anforderungen dieser Märkte an Produktivität und Qualität zu erfüllen, arbeitet Air Liquide Welding kontinuierlich an der Weiterentwicklung bestehender Schweißprozesse. Dies führte zu Optimierungen beim MIG-Schweißprozess und zur Einführung der neuen digitalen OERLIKON CITOWAVE-Stromquellenreihe, mit der Qualitätsverbesserungen bei der Verarbeitung dieser Werkstoffe erzielt werden.

Wenn Sie sich schon als Leser von Oerlikon Competence angemeldet haben, erhalten Sie die zukünftigen Ausgaben automatisch per Post. Falls nicht, findet diese Zeitschrift hoffentlich Ihr Interesse und Sie lassen sich für die kommenden Ausgaben registrieren. Schicken Sie uns einfach die Antwortkarte zurück oder melden Sie sich auf unserer Website www.oerlikon-welding.com direkt on-line an.

Vielen Dank.
Claudio de Giorgi - Oerlikon Deputy Brand Manager
Air Liquide Welding - Italy

Characterisation of 2 1/4CrMoV weld metal at different stages during the manufacturing process of pressure vessels.

Some years ago, 2 1/4 CrMoV steel was introduced into the ASME code as an alternative to the 2 1/4 CrMo standard type. Due to the addition of vanadium, this new steel shows higher tensile and creep properties and lower sensitivity to hydrogen embrittlement and so enables slightly higher working temperatures and/or a reduction of the wall thickness of a given reactor vessel. In most cases, a significant decrease in the final cost of the equipment is then possible. However, all the potential of that steel can only be considered if the properties of the weldments match with those of the steel.

The results in this paper show that the weld metal fulfills all the requirements after the final Post Weld Heat Treatment (PWHT). However, after the Dehydrogenation Heat Treatment (DHT) or the Intermediate Stress Relieving treatment (ISR), depending on the temperature, the toughness properties of 2 1/4 CrMoV weld metal may be lower than those of the standard type in the same conditions.

These aspects have to be considered during the manufacturing process and the design of pressure vessels when substituting vanadium-modified steel for a standard type.

INTRODUCTION

In the petrochemical industry, the increased temperature and hydrogen pressure under operating conditions, requires new steels and welding consumables to satisfy more rigid application conditions. Due to the increase in process severity these low-alloyed materials must satisfy the new technical requirements and the 2,25Cr1Mo 0,25 V modified material has been introduced into the ASME code. During the second part of the 90's, together with conventional 2,25Cr1Mo standard material, 2,25Cr1Mo 0,25 V material was introduced for manufacturing heavy wall reactors.

The introduction of this new material (with V and Nb) is tied to the possibility of using petrochemical hydrogen pressurised processes and more elevated temperatures

Eigenschaften eines 2 1/4 CrMoV Schweißgutes während verschiedener Fertigungsstufen eines Druckbehälters.

Vor einigen Jahren wurde 2 1/4 CrMoV –Stahl als Alternative zum Standardtyp 2 1/4 Cr Mo in den ASME Code aufgenommen. Durch die Zugabe von Vanadium erreicht dieser Stahltyp eine höhere Zug- und Kriechfestigkeit und wird weniger anfällig für Wasserstoff-induzierte Versprödung. Dadurch sind höhere Betriebstemperaturen und/oder eine Verringerung der Wandstärke eines Druckbehälters möglich. In den meisten Fällen ist damit eine erhebliche Einsparung bei den Fertigungskosten der Anlage möglich. Das Potential, das der Stahl bietet, lässt sich aber nur ausschöpfen, wenn auch die Eigenschaften des Schweißgutes denen des Stahls entsprechen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass das Schweißgut alle Anforderungen nach der abschließenden Wärmebehandlung (PWHT = post weld heat treatment) erfüllt. Allerdings ist es möglich, dass während der Produktion, z.B. nach der Wasserstoffarmglühung (DHT = dehydrogenation heat treatment) oder einem Zwischenglühen (ISR = intermediate stress relieving treatment), in Abhängigkeit von den Temperaturen, die Festigkeitseigenschaften des 2 1/4 CrMoV Schweißgutes niedriger sind als die des Standardtyps unter gleichen Bedingungen.

Diese Aspekte müssen beim Herstellungsprozess und bei der Berechnung von Druckbehältern berücksichtigt werden, sofern Vanadium legierter Stahl anstelle des Standardtyps verwendet wird.

EINLEITUNG

Höhere Betriebstemperaturen und höherer Wasserstoffdruck bei Behältern in der Petrochemie machen Stähle und Schweißzusätze erforderlich, die diesen härteren Beanspruchungen gerecht werden. Aufgrund der erschwerten Anwendungsbedingungen müssen die niedrig legierten Materialien neue technische Anforderungen erfüllen. Deshalb wurde der modifizierte Werkstoff 2,25Cr 1Mo 0,25V in den ASME Code aufgenommen. Beginnend mit der zweiten Hälfte der 90iger Jahre wird neben dem Standardtyp 2,25Cr 1Mo auch der modifizierte Stahltyp 2,25Cr 1Mo 0,25V bei der Herstellung von dickwandigen Behältern verwendet.

with respect to standard materials. That is, to obtain higher safety margins from the new material due to lower sensitivity to the phenomenon of hydrogen embrittlement and greater creep resistance.

The advantages of the in service performance of the vanadium material with respect to standard materials are:

- higher tensile properties at room and high temperature (450°C) that means a reduction of the equipment thickness and weight
- greater resistance to hydrogen embrittlement
- greater creep resistance, both in air and hydrogen environments

The sensitivity to hydrogen embrittlement and the creep performance have been evaluated through extensive research activities: BRITE – PREDICH European Project [1], a project in which Air Liquide Welding Italy together with the Air Liquide Group took an active part.

The materials, standard and V modified, are characterised by high tensile strength (TS 90 –110 ksi; 540 – 760 MPa) and bainitic microstructures and these aspects may raise questions related to diffusible hydrogen in highly restrained joints (range of thickness of the reactors: 150 – 300 mm) and to the choice of the heat treatments to apply at different stages of the manufacturing process in order to avoid critical situations during construction.

The materials, standard and V modified, call for different heat treatments, the aims of which are summarised below:

1. DHT (Dehydrogenation Treatment) reduces the hydrogen content in the weld to a sufficiently low level to prevent hydrogen cracking – it is carried out at 300 – 350°C,
2. ISR (Intermediate Stress Relieving) reduces hydrogen and residual stresses in the welded joints – it is generally carried out at 620 – 650°C,
3. Final PWHT (Post Weld Heat Treatment) modifies the microstructure of the weld metal and of the heat affected zone and optimises the mechanical properties of the weldment – it is performed at 690°C for the standard material or in the range 700 – 710°C if the material is V modified.

The mechanical property behaviour of such low-alloyed materials can vary significantly according to the different steps of the manufacturing process. The standard 2 ¼ Cr 1 Mo material is very well known to the heavy wall equipment manufacturers, on the contrary the knowledge about the V modified type is not yet completely established and its behaviour can be significantly different. This work contributes to highlight the differences between both materials.

EXPERIMENTAL PROCEDURES

The submerged arc welding single wire process has been considered in this work due to the fact that it is the most important welding process applied in the construction of pressure vessels.

Diffusible hydrogen and mechanical properties of the weld metal (hardness, tensile and CVN) were evaluated after different heat treatments.

Mit der Einführung des neuen Werkstoffs (mit V und Nb) ist es in der Petrochemie möglich, bei Druckwasserstoffbeanspruchung mit höheren Temperaturen als bei Standardwerkstoffen zu arbeiten. Mit dem neuen Werkstoff wird aufgrund der geringeren Anfälligkeit gegenüber Wasserstoffversprödung und der höheren Kriechfestigkeit ein höheres Sicherheitsniveau erreicht.

Im Vergleich zum Standardtyp bietet der Vanadium-modifizierte Werkstoff folgende Vorteile:

- höhere Zugfestigkeit bei Raumtemperatur und hohen Temperaturen (450°C) und dadurch eine Verringerung der Materialdicke und des Gewichts der Anlagen
- geringere Neigung zur Wasserstoffversprödung
- höhere Kriechfestigkeit sowohl unter Luft als auch unter Wasserstoff

Die Neigung zur Wasserstoffversprödung und die Kriechfestigkeitswerte wurden in ausführlichen Forschungsreihen überprüft: BRITE – PREDICH European Project [1], an diesem Projekt waren ETC – Elettrotecnologica und die Air Liquide Gruppe aktiv beteiligt.

Beide Werkstoffe, Standard- und V-modifizierter Typ, zeichnen sich durch eine hohe Zugfestigkeit (TS 90 –110 ksi; 540 – 760 MPa) und eine bainitische Mikrostruktur aus. Diese Faktoren werfen Fragen auf hinsichtlich des diffusiblen Wasserstoffes bei stark beanspruchten Schweißverbindungen (Wandstärkenbereich der Druckgefäße: 150 – 300 mm) und damit der Wahl der anzuwendenden Wärmebehandlung während verschiedener Stufen des Fertigungsprozesses, um kritische Situationen während des Baus zu vermeiden.

Die beiden Werkstoffe, Standard und V-modifiziert, verlangen unterschiedliche Wärmebehandlungen, deren Zweck nachstehend zusammengefasst wird:

1. Die Wasserstoffarmglühung (DHT=Dehydrogenation Treatment) senkt den Wasserstoffgehalt der Schweißnaht auf ein Niveau, das niedrig genug ist, um wasserstoff-induzierten Rissen vorzubeugen – sie wird bei 300 - 350°C durchgeführt.
2. Das Zwischenglühen (ISR=Intermediate Stress Relieving) verringert den Wasserstoffgehalt und die Eigenspannungen in der Schweißnaht und erfolgt im allgemeinen bei 620 - 650°C.
3. Die abschließende Wärmebehandlung PWHT (Final Post Weld Heat Treatment) verändert die Mikrostruktur des Schweißgutes und der Wärmeeinflusszone und stellt metallurgisch den bestmöglichen Zustand für die Schweißverbindung her – sie wird beim Standard-Werkstofftyp bei 690°C durchgeführt oder bei 700 - 710°C, wenn der Werkstoff V-modifiziert ist.

Die mechanischen Eigenschaften dieser niedrig legierten Werkstoffe unterscheiden sich während der verschiedenen Stufen des Herstellungsprozesses deutlich voneinander. Mit dem Verhalten des Standardtyps 2 ¼ Cr 1 Mo sind die Hersteller dickwandiger Behälter/ Anlagen vertraut. Das Wissen über den V-modifizierten Typ ist dagegen noch nicht so verbreitet und sein Verhalten kann deutlich von dem des Standardtyps abweichen. Diese Arbeit soll dazu beitragen, die Unterschiede zwischen diesen beiden Werkstoffen aufzuzeigen.

UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Für die Untersuchung wurde das UP-Eindraht-Verfahren gewählt, da dies das am weitesten verbreitete Schweißverfahren bei der Herstellung von Druckbehältern ist.

Der diffusible Wasserstoff und die mechanischen Eigenschaften (Härte, Zugfestigkeit und Zähigkeit) wurden nach den verschiedenen Wärmebehandlungen bestimmt.

Diffusible Hydrogen determination in 2,25Cr1Mo0,25V weld metal

At the beginning of the work the diffusible hydrogen evaluation was carried out in accordance with the AWS 4.3-95 standard (single bead). These determinations were carried out using DC (Direct Current) and AC (Alternating Current). AWS 4.3-95 is a standard test to characterise the welding consumables. It requires one bead to be welded on a geometrically well defined specimen, then the test piece assembly is cooled as fast as possible at low temperature (3 seconds is the recommended maximum time between the extinction of the arc and the quenching in iced water and subsequently in alcohol or acetone saturated with solid carbon dioxide and finally, the central part of the specimen is introduced inside a Yanaco cell, the diffusible hydrogen content being determined by gas chromatography after a degassing time of 12 h at 150°C.

Practical welding operations differ significantly from the conditions defined by the standard to characterise and classify the welding consumables since:

- in a real weld, the different passes (except the last one) are reheated by the subsequent ones allowing the hydrogen to escape from the weld metal
- a real weld is subjected to DHT or ISR immediately after welding, allowing the hydrogen to continue to escape from the joint for a long time before cooling to room temperature.

So, beside the conventional AWS test, the diffusible hydrogen content was evaluated in multiple pass joints welded using AC current (usually used for this type of weldment and giving the highest diffusible hydrogen value according to the standard test).

Welding conditions:

- plate thickness: 200 and 40 mm
- welding process: SAW, single wire \varnothing 4 mm, AC
- heat input: 1.8 / 2.0 kJ/cm
- preheat / Interpass temperature: 200 / 250°C
- wire / flux combination: OERLIKON OE CROMO S225V
OERLIKON OP CROMO F537

OERLIKON OP CROMO F537 is an agglomerated fluoride-basic submerged arc welding flux specially designed for the welding of heat resistant steels. This flux has a very low hydrogen potential and exceptionally low silicon pick up and a neutral behaviour in terms of manganese.

OERLIKON OE CROMO S225V is a 2 ¼Cr1Mo¼ V solid submerged arc welding wire with controlled very low levels of impurity and residual elements.

After welding, the 200 mm thick welded coupon was water quenched to room temperature and then cooled to -30°C with liquid CO₂, to trap the highest possible quantity of hydrogen in the weld metal.

The samples for the diffusible hydrogen determinations were taken from the top and the bottom of the 200mm thick weld, while keeping the temperature as low as possible during machining.

In the case of the 40 mm thick plates, buttered test plates were used and after welding, the welded coupons were heat treated at 350°C and 620°C for 4 h and then air cooled to room temperature in order to simulate the cycle of a real weld.

Bestimmung des diffusiblen Wasserstoffs im 2,25Cr1Mo0,25V-Schweißgut

Anfangs wurde der diffusible Wasserstoff nach AWS 4.3-95 (Einzelraupe) bestimmt und zwar unter DC (Gleichstrom) und AC (Wechselstrom). AWS 4.3-95 ist ein Standardtest zur H₂ Klassifizierung von Schweißzusätzen. Dafür muss auf ein geometrisch exakt definiertes Probestück eine Raupe geschweißt werden. Danach wird die Probe so schnell wie möglich auf niedrige Temperatur abgekühlt (Empfehlung: maximal 3 Sekunden zwischen dem Erlöschen des Lichtbogens und dem Abschrecken in Eiswasser und in Alkohol oder Aceton, die mit Trockeneis gesättigt sind). Schließlich wird der Mittelteil der Probe in ein Yanaco-Gerät eingelegt, wo der Gehalt an diffusiblem Wasserstoff durch Gaschromatographie nach einer Entgasungszeit von 12 Stunden bei 150°C bestimmt wird.

In der Praxis unterscheiden sich die Schweißbedingungen aus folgenden Gründen wesentlich von den Normbedingungen zur Charakterisierung und Klassifizierung der Schweißzusatzwerkstoffe:

- Bei Schweißarbeiten unter realen Bedingungen werden die einzelnen Lagen (außer der letzten) durch die Folgelagen wieder erwärmt, so dass die Wasserstoffeffusion aus dem Schweißgut beschleunigt wird.
- Bei Schweißarbeiten unter realen Bedingungen unterliegt die Schweißnaht direkt nach dem Schweißen einer DHT oder ISR Behandlung, so dass über einen langen Zeitraum hinweg weiterhin Wasserstoff aus der Naht entweichen kann, bevor sie auf Raumtemperatur abgekühlt ist.

Daher wurde neben den konventionellen AWS Tests der diffusible Wasserstoff auch bei mehrlagigen Schweißnähten bestimmt, die mit AC hergestellt wurden (AC wird für diesen Schweißgutttyp üblicherweise eingesetzt und führt beim Standardtest zum höchsten Wert an diffusiblem Wasserstoff).

Schweißbedingungen:

- Blechdicke: 200 und 40 mm
- Schweißverfahren: UP, Eindraht \varnothing 4 mm, AC
- Wärmeeintrag: 1,8 / 2,0 kJ/cm
- Vorwärm- / Zwischenlagentemperatur: 200 / 250 °C
- Draht / Pulver Kombination: OERLIKON OE CROMO S225V
OERLIKON OP CROMO F537

Nach dem Schweißen wurde das 200 mm dicke Probestück durch Wasserabschrecken auf Raumtemperatur abgekühlt und dann mit flüssigem CO₂ auf -30°C gekühlt, um so viel Wasserstoff wie möglich im Schweißgut zu halten.

Die Proben für die Bestimmung des diffusiblen Wasserstoffs wurden aus dem oberen und unteren Bereich der 200mm dicken Schweißnaht entnommen. Bei der Probenausarbeitung wurde versucht, die Temperatur so niedrig wie möglich zu halten.

Bei dem 40mm dicken Material wurden gepufferte Testbleche verwendet. Nach dem Schweißen wurden die Probestücke 4 Stunden bei 350°C und 620°C wärmebehandelt und dann an Luft auf Raumtemperatur abgekühlt, um die Bedingungen einer realen Schweißung zu simulieren.

Die Proben wurden entnommen, ohne sie zu erwärmen (Kaltschneiden), und nach dem Schneiden in flüssigem Stickstoff auf -196°C abgekühlt, bevor sie in das Yanaco-Gerät eingelegt wurden.

The samples were extracted without heating them (cold cutting) and after cutting they were cooled down to -196°C in liquid nitrogen before introduction into the Yanaco cells.

A typical macrograph for the 40 mm plates is shown in figure 1 and table 1 summarises the different conditions for which the diffusible hydrogen content was determined.

Table 1 - Diffusible Hydrogen Determination Tests

Type of test	Welding process	Type of current	Thickness (mm)	Treatment
AWS 4.3.95	SAW	DC	-	-
AWS 4.3.95	SAW	AC	-	-
Multipass	SAW	AC	200	As Welded fast cooling
Multipass	SAW	AC	40	DHT – 350° / 4h
Multipass	SAW	AC	40	ISR – 620°C / 4h

Mechanical Characterisations

Tensile and CVN impact test specimens were machined at the mid thickness of welded coupons 40 mm thick similar to the welded coupons used for multipass diffusible hydrogen determinations (fig.1).

In order to evaluate initially the effectiveness of the ISR treatment temperature, hot tensile tests were performed with the V modified weld metal after ISR, at the temperature of the ISR. 3 temperatures were tested: 620, 650 and 680°C, the holding time being 4 h.

To summarise the mechanical test results, the tensile or the impact test results were plotted vs. the Larson Miller Parameters. The Larson Miller Parameter (LMP), often used in metallurgy, expresses equivalence between time and temperature:

$$LMP = \frac{T(20 + \log t)}{1000}$$

T = Temperature of the heat treatment (°K)
t = holding time (h)

i.e. Heat treatment 705°C / 8h ➔ LMP = 20.443

In table 2 the different heat treatments and mechanical tests performed during that work are summarised.

Table 2 - Tests and Heat Treatments

Type of Weld	SAW Wire/Flux	Heat Treatment	LMP	Test Performed
Standard 2 1/4Cr1Mo	OE-CROMO S 225 / OP CROMO F 537	As welded		Hv10
		350°C x 4h	12.84	TS – CVN
		620°C x 4h	18.40	TS – CVN
		690°C x 8h	19.84	TS – Hv10 – CVN
		690°C x 8h+ SC		CVN
V modified type : 2 1/4Cr1Mo 1/4V	OE-CROMO S 225V / OP CROMO F537	As welded		Hv10
		350°C x 4h	12.84	TS – CVN
		620°C x 4h	18.40	TS at RT & HT - CVN
		650°C x 4h	19.02	TS at RT & HT - CVN
		680°C x 4h	19.63	TS at RT & HT - CVN
		705°C x 8h	20.44	TS – Hv10 - CVN
		705°C x 8h + SC		CVN

Bild 1 zeigt einen typischen Makroschliff des 40mm Bleches. Tabelle 1 beschreibt die verschiedenen Bedingungen, zu denen der Gehalt an diffusiblem Wasserstoff bestimmt wurde.

Tabelle 1 - Tests zur Bestimmung des diffusiblen Wasserstoffes

Test	Schweißverfahren	Stromart	Blechedicke (mm)	Behandlung
AWS 4.3.95	UP	DC	-	-
AWS 4.3.95	UP	AC	-	-
Mehrlagig	UP	AC	200	unbehandelt; schnelles Abkühlen
Mehrlagig	UP	AC	40	DHT – 350° / 4h
Mehrlagig	UP	AC	40	ISR – 620°C / 4h

Mechanische Eigenschaften

Proben für die Zugfestigkeit und die Kerbschlagarbeit wurden aus der Mitte der 40 mm Schweißproben entnommen, ähnlich wie bei den Schweißproben für die Bestimmung des diffusiblen Wasserstoffs bei mehrlagigen Nähten (Bild 1).

Um in einem ersten Ansatz die Effektivität des Zwischenglühens (ISR) in Abhängigkeit von der Temperatur zu bewerten, wurden die Heißzugversuche mit dem V-modifizierten Schweißgut nach verschiedenen Glühbedingungen durchgeführt. Drei Temperaturen wurden bei einer Haltezeit von 4h überprüft: 620, 650 und 680 °C.

Zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften wurden die Zugfestigkeits- oder Kerbschlagzähigkeitsergebnisse in Diagrammen gegen den Larson Miller Parameter aufgetragen. Der Larson Miller Parameter (LMP), der in der Metallurgie häufig zur Anwendung kommt, stellt einen Zusammenhang von Zeit und Temperatur her:

$$LMP = \frac{T(20 + \log t)}{1000}$$

T = Temperatur
t = Haltezeit (h)

d.h. Wärmebehandlung 705°C / 8h ➔ LMP = 20.443

Tabelle 2 fasst die verschiedenen Wärmebehandlungsarten und die mechanischen Tests zusammen:

Tabelle 2 - Tests und Wärmebehandlung

Schweißgutttyp	OE Draht / Pulver	Wärmebehandlung	LMP	durchgeführte tests
Standard 2 1/4Cr1Mo	OE-CROMO S 225 / OP CROMO F 537	unbehandelt		Hv10
		350°C x 4h	12.84	TS – CVN
		620°C x 4h	18.40	TS – CVN
		690°C x 8h	19.84	TS – Hv10 – CVN
		690°C x 8h+ SC		CVN
V-modifizierter typ : 2 1/4Cr1Mo 1/4V	OE-CROMO S 225V / OP CROMO F537	unbehandelt		Hv10
		350°C x 4h	12.84	TS – CVN
		620°C x 4h	18.40	TS bei RT & HT - CVN
		650°C x 4h	19.02	TS bei RT & HT - CVN
		680°C x 4h	19.63	TS bei RT & HT - CVN
		705°C x 8h	20.44	TS – Hv10 - CVN
		705°C x 8h + SC		CVN

RESULTS AND DISCUSSION

Diffusible Hydrogen

The diffusible hydrogen contents corresponding to the different tests are given in figure 2.

The results of the tests carried out in accordance with the AWS standard show that AC induces a higher value than DC. That is in agreement with previously published data [2]: the transfer of hydrogen in the weld metal is higher when AC is used instead of DC. However AC is commonly used for welding standard or V-modified 2 ¼ CrMo steel because it results in a lower oxygen content in the weld metal and thus better toughness properties than DC.

In the case of multipass welds, the values are considerably lower:

- the highest diffusible hydrogen value obtained in the 200 mm thick welded joint rapidly cooled immediately after completion of welding is 1 ml / 100 g of fused metal. It corresponds to specimens taken in the upper part of the weld (in the lower part, only 0.08 ml / 100 g of fused metal was measured). This already low value corresponds to an extreme condition (accelerated cooling) which could not be expected under real working conditions [3].
- DHT or ISR treatments are very efficient: both reduce the level of diffusible hydrogen to negligible values (respectively 0.02 and 0.008 ml / 100 g of fused metal)

Mechanical Properties at Intermediate Steps of the Manufacturing Process

Tensile Properties at Room Temperature

The comparison between the tensile property behaviour at room temperature of the 2,25Cr standard and V modified undiluted weld metal vs. LMP is shown in Fig.3.

As expected, the tensile properties of the V-modified material are always higher than those of the standard type.

After DHT and PWHT the differences are in the range of 100MPa but could reach 250 MPa after ISR at 620°C / 4 h. In fact, on the contrary to the standard 2 ¼ CrMo, an Intermediate Stress Relieving treatment performed at 620°C on a V-modified material induces an increase of the tensile properties, probably due to the precipitation of vanadium nitrides.

Hot Tensile Properties of the Weld Metal

The hot tensile tests carried out after different ISR treatments, at the temperature at which the treatments were performed, allowed the efficiency of the stress relieving treatment to be evaluated on the basis of the evolution

Fig.2: Diffusible hydrogen - Single bead on plate (AWS standard) and multipass joint

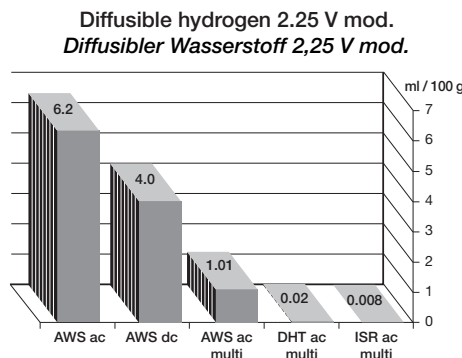


Bild 2: Diffusibler Wasserstoff – Einzelraupe auf Blech (AWS Norm) und mehrlagige Naht

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Diffusibler Wasserstoff

Bild 2 zeigt den Gehalt an diffusiblem Wasserstoff bei den verschiedenen Tests.

Die Ergebnisse der Tests nach AWS zeigen, dass AC zu einem höheren Wert führt als DC. Das stimmt mit anderen Veröffentlichungen überein [2]: Der Wasserstoffeintrag ins Schweißgut ist größer, wenn AC statt DC verwendet wird. Trotzdem wird üblicherweise AC zum Schweißen des Standard- und des V-modifizierten 2 ¼ CrMo Werkstoffes verwendet, denn Wechselstrom ermöglicht einen geringeren Sauerstoffgehalt im Schweißgut und dadurch bessere Zähigkeitswerte als bei DC.

Bei den mehrlagigen Schweißnähten sind die Werte deutlich niedriger:

- Der mit 1 ml/100 g Schweißgut höchste Wert an diffusiblem Wasserstoff wurde bei der 200mm-Schweißnaht gefunden, die nach dem Schweißen schnell abgekühlt wurde. Dieser Wert wurde bei Proben aus dem oberen Teil der Schweißnaht ermittelt (im unteren Teil ergaben sich nur 0,08 ml / 100g Schweißgut). Dieser ohnehin schon sehr niedrige Wert wurde unter extrem ungünstigen Bedingungen (beschleunigtes Abkühlen) ermittelt, die unter realen Arbeitsbedingungen absolut unüblich sind [3].
- Wasserstoffarmglühen (DHT) oder Zwischenglühen (ISR) sind sehr effizient: Beide verringern das Niveau des diffusiblen Wasserstoffs auf zu vernachlässigende Werte (0,02 bzw. 0,008 ml/100g Schweißgut).

Mechanische Eigenschaften bei verschiedenen Fertigungsstufen

Festigkeitswerte bei Raumtemperatur

Der Zusammenhang zwischen Werten aus dem Zugversuch bei Raumtemperatur und Larson-Miller-Parametern ist für 2,25 Cr Standard- und V-modifiziertes Schweißgut in Bild 3 dargestellt.

Wie erwartet sind die Festigkeitswerte des V-modifizierten Werkstoffes stets höher als die Werte des Standardtyps.

Nach Wasserstoffarmglühen (DHT) und der abschließenden Wärmebehandlung (PWHT) liegen die Unterschiede bei 100 MPa, können aber nach dem Zwischenglühen (ISR) bei 620°C / 4h bis zu 250 MPa erreichen. Im Gegensatz zum Standardstahl 2¼ CrMo führt das Zwischenglühen bei 620°C bei einem V-modifizierten Werkstoff zu einer Erhöhung der Festigkeit. Dies ist wahrscheinlich auf Vanadium-Nitrid-Ausscheidungen zurückzuführen.

Heißzugfestigkeit des Schweißgutes

Die Heißzugversuche, die nach verschiedenen Zwischenglühenbehandlungen (ISR) bei der Zwischenglühtemperatur durchgeführt wurden, ermöglichen eine Abschätzung der Effizienz des Zwischenglühens bezogen auf die Streckgrenze. Die Ergebnisse in Tabelle 3

Fig.3: Tensile properties after different heat treatments Vs. Larson Miller Parameter

Tensile and yield strength after different Heat Treatments nach verschiedenen Wärmebehandlungen

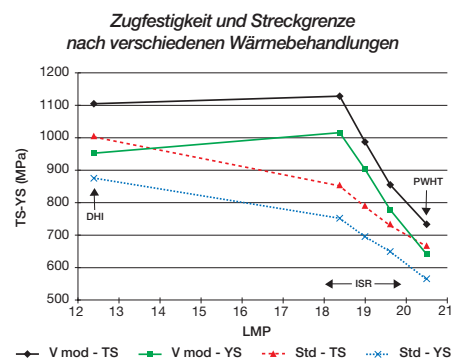


Bild 3: Festigkeitswerte nach verschiedenen Wärmebehandlungen im Vgl. zu Larson Miller Parameter

of the yield strength. The results reported in table 3 show that the range of temperatures usually considered for the standard 2 ¼ CrMo material (620 / 650°C) is certainly too low for the V-modified type and must be increased in order to have a significant effect on the relaxation of the stresses: Ys at 680°C is 35% less than at 650°C and 43% less than at 620°C.

Table 3 - Tensile properties of 2 ¼ CrMoV weld metal after different ISR treatments

ISR	Tensile test temperature (°C)	Ys (MPa)	Ts (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
620°C / 4h	R.T.	1017	1129	18	64
650°C / 4h	R.T.	903	986	18	69
680°C / 4h	R.T.	779	852	18	72
620°C / 4h	620	534	662	14	62
650°C / 4h	650	466	536	16	70
680°C / 4h	680	306	371	20	84

Charpy V-notch Properties

Transition curves were determined for each heat treatment condition and for both standard and V-modified weld metal (figure 4).

After DHT, the Charpy V-notch transition curves of standard and V-modified 2 ¼ CrMo weld metal are significantly different. At room temperature, the values obtained were approximately 40 J for the standard type and 19 J for the vanadium modified weld metal. The transition temperature is about 40°C higher for the vanadium type.

The results after ISR are strongly dependent upon the temperature of the heat treatment. On the contrary to the behaviour of the standard type, ISR at 620°C impaired the toughness properties: the shift of the transition curve represents about +40°C and after a treatment at 650°C, the transition curve is not significantly better than after DHT. 2 ¼ CrMoV weld metal requires a treatment at about 680°C to attain Charpy V-notch values at room temperature similar to standard CrMo weld metal heat treated at 620°C.

In fact, this behaviour is coherent with the variations of the tensile properties according to the ISR temperature and their differences between the standard and the modified weld metal (figure 3). It derives from the sum of the softening effect linked to the tempering of the matrix and the hardening effect, associated with the precipitation of vanadium nitride.

Hardness Hv10

The 2,25Cr standard and the V modified weld metal were hardness tested after different heat treatments (fig.5).

zeigen, dass der Temperaturbereich, der normalerweise für den Standardtyp 2 ¼ CrMo herangezogen wird (620 / 650°C), für den V-modifizierten Typ zu niedrig ist und deshalb erhöht werden muss, um eine deutliche Spannungsverringern zu erzielen: Ys bei 680°C ist um 35% geringer als bei 650°C und um 43% geringer als bei 620°C.

Tabelle 3 - Zugfestigkeit des 2 ¼ CrMoV Schweißguts nach Zwischenglühen (ISR) bei unterschiedlichen Temperaturen

ISR	Testtemp. (°C)	Streckgrenze Ys (MPa)	Zugfestigkeit Ts (MPa)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnung (%)
620°C / 4h	R.T.	1017	1129	18	64
650°C / 4h	R.T.	903	986	18	69
680°C / 4h	R.T.	779	852	18	72
620°C / 4h	620	534	662	14	62
650°C / 4h	650	466	536	16	70
680°C / 4h	680	306	371	20	84

Fig.4: Weld metal Charpy V-notch transition curves at different stages of the manufacturing process

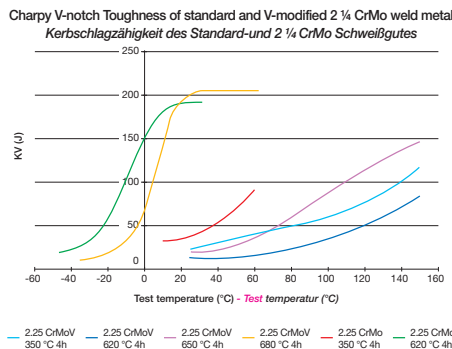


Bild 4: Schweißgut Kerbschlagzähigkeit-Übergangskurven bei bestimmten Fertigungsstufen

Fig.5: Weld metal average hardness at different steps of the manufacturing process

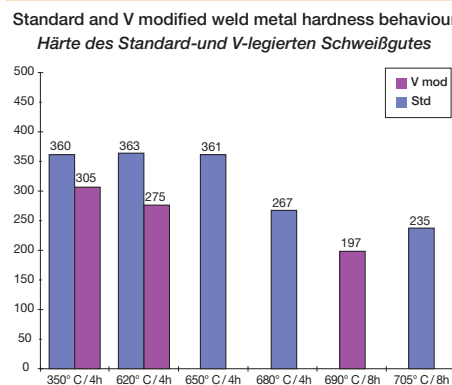


Bild 5: Durchschnittl. Härtewert des Schweißguts während verschiedener Stufen des Fertigungsprozesses

Charpy V – Kerbschlagzähigkeit

Für jede Wärmebehandlung wurden Übergangskurven für das Standard- und das V-modifizierte Schweißgut ermittelt (Bild 4).

Nach der Wasserstoffarmglühung (DHT) unterschieden sich die Charpy V-Übergangskurven des Standard- und des V-modifizierten 2¼ CrMo Schweißgutes sehr deutlich. Bei Raumtemperatur lagen die Werte beim Standardtyp bei 40 J und bei dem Vanadium modifizierten Schweißgut nur bei 19J. Die Übergangstemperatur für den V-Typ ist ca. 40°C höher.

Die Ergebnisse nach dem Zwischenglühen hängen stark von der Temperatur der Wärmebehandlung ab. Im Gegensatz zu dem, was mit dem Standardtyp passiert, verschlechterte das Zwischenglühen (ISR) bei 620°C die Zähigkeitseigenschaften: Die Verschiebung der Übergangskurve macht ca. +40°C aus und nach der Wärmebehandlung bei 650°C ist die Übergangskurve nicht wesentlich besser als nach der Wasserstoffarmglühung (DHT). 2¼ CrMoV Schweißgut benötigt Temperaturen von ca. 680°C, um bei Raumtemperatur Zähigkeiten zu erreichen, die denen des CrMo-Standard-schweißguts bei 620°C vergleichbar sind.

Dieses Verhalten stimmt mit der Verschiebung der Festigkeit in Abhängigkeit von der Zwischenglühtemperatur und den Unterschieden zwischen Standard-schweißgut und modifiziertem Typ überein

(Bild 3). Es resultiert einerseits aus dem Zusammenhang mit dem Anlassen der Grundsubstanz und andererseits aus dem Härtungseffekt in Verbindung mit den Vanadiumnitridausscheidungen.

Härte Hv10

Das 2,25Cr Standard- und das V-modifizierte Schweißgut wurde nach verschiedenen Wärmebehandlungen einer Härteprüfung unterzogen (Bild 5).

Again, a significant softening of the V-modified weld metal was not observed when the ISR is carried out at 620°C and even at 650°C.

Comparing both materials, it appears that practically the same hardness value is obtained for the standard 2 ¼ CrMo heat treated 4 h at 620°C as for the V-modified type heat treated 4 h at 680°C.

Mechanical Properties after the final Post Weld Heat Treatment and Step Cooling

Table 4 and figure 6 allow a comparison of the tensile, hardness and Charpy V-notch properties of the standard and modified weld metals after the minimum Post Weld Heat Treatment industrially applied (respectively 690°C / 8 h and 705°C / 8 h). In figure 6 the Charpy V-notch values are also given after step cooling.

Table 4 - Tensile and Hardness Properties after minimum PWHT

Type of weld metal	Heat treatment	Ys (MPa)	Ts (MPa)	E %	RA %	HV 10
Standard 2 ¼ Cr Mo	690°C / 8h	515	623	23	73	197
V mod. type: 2 ¼ Cr Mo V	705°C / 8h	643	739	20	76	234

Clearly, after the final PWHT, the standard material shows a greater ductility than the modified material even if, for the former, the PWHT was performed at a lower temperature. However, both materials satisfy the current standards.

The step cooling treatment induces only a minor shift of the transition curves. Both materials satisfy the more stringent requirements of the technical specifications:

$$Tr_{54 PWHT} + 3 \times (Tr_{54 PWHT+SC} - Tr_{54 PWHT}) < + 10^{\circ}C$$

These results are a function of the extremely pure chemistry of the weld metal in which P, Sn, Sb and As are at such a low level that the X factor requirement is largely satisfied.

CONCLUSIONS

2 ¼ Cr 1 Mo ¼ V steel was designed for:

- 1) greater tensile and yield strengths in order to allow a reduction of the thickness and therefore of the weight of the components of approx. 20 % with respect to those manufactured from standard material,
- 2) a greater resistance to hydrogen embrittlement due to the addition of vanadium, which reduces hydrogen mobility and therefore its embrittling effect,
- 3) a higher creep resistance allowing with respect to the standard material, an increase of the working temperature and of the working stress, again due to the effect of the vanadium precipitates.

The weld metal must also satisfy these technical aspects. They necessarily imply enhanced mechanical properties, giving hardness and toughness levels that are significantly different between the two materials after the final Post Weld

Auch hier war nach einer Zwischenglühung bei 620°C und sogar bei 650°C keine Härtereduzierung zu beobachten.

Beim Vergleich der beiden Werkstoffe stellt man fest, dass sich für den Standard-2¼ CrMo-Typ nach 4h bei 620 °C praktisch derselbe Härtewert wie für den V-Typ nach 4h bei 680°C ergibt.

Mechanische Eigenschaften nach der letzten Wärmebehandlung und Step Cooling

Tabelle 4 und Bild 6 ermöglichen einen Vergleich von Festigkeit, Härte und Kerbschlagzähigkeit des Standard- und des modifizierten Schweißgutes nach der in der Praxis üblichen Mindestwärmebehandlung (also 690 °C / 8h beziehungsweise 705°C / 8h). Bild 6 zeigt außerdem die Kerbschlagwerte nach der Step Cooling Behandlung.

Tabelle 4 - Festigkeit und Härtewerte nach min. PWHT

Schweißgutttyp	Wärmebehandlung	Streckgrenze Ys (MPa)	Zugfestigkeit (MPa)	Dehnung E %	Einschnürung RA %	Härte HV 10
Standard 2 ¼ Cr Mo	690°C / 8h	515	623	23	73	197
V mod. typ: 2 ¼ Cr Mo V	705°C / 8h	643	739	20	76	234

Es ist klar zu erkennen, dass der Standardwerkstoff nach der letzten Wärmebehandlung eine größere Duktilität besitzt als der modifizierte Werkstoff, auch wenn die Wärmebehandlung des ersteren bei niedrigerer Temperatur erfolgte. Trotzdem erfüllen beide Werkstoffe die gängigen Normen.

Die Step Cooling Behandlung führt lediglich zu einer kleinen Verschiebung der Übergangskurven. Dadurch erfüllen beide Werkstoffe die strengeren Kriterien der einschlägigen technischen Spezifikationen:

$$Tr_{54 PWHT} + 3 \times (Tr_{54 PWHT+SC} - Tr_{54 PWHT}) < + 10^{\circ}C$$

Erreicht wird dies durch die äußerst hohe Reinheit des Schweißgutes, in dem P, Sn, Sb und As so niedrig sind, dass die üblichen X-Faktor Anforderungen sicher erfüllt werden.

Fig.6: Transition curves after minimum PWHT and minimum PWHT + Step cooling – 2,25Cr1Mo standard and V modified weld metal.

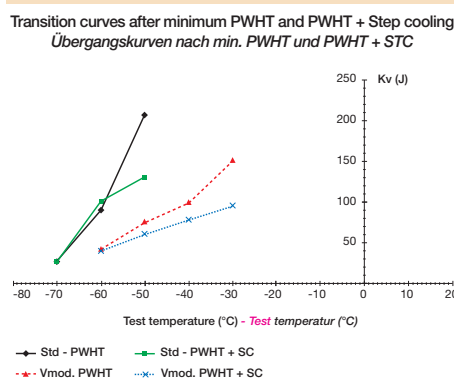


Bild 6: Übergangskurven nach Mindestwärmebehandlung (PWHT) und Mindestwärmebehandlung + Step Cooling – 2,25Cr1Mo Standard- und V-Typ

SCHLUSSFOLGERUNGEN

2¼ Cr 1 Mo ¼ V Stahl wurde aus folgenden Gründen entwickelt:

- 1) Höhere Zugfestigkeit und Streckgrenze, um die Materialstärke zu verringern und dadurch leichtere Bauteile zu ermöglichen. Die Gewichtsverringerung sollte im Vergleich zu den mit dem Standardwerkstoff hergestellten Bauteilen ca 20 % betragen.
- 2) Höhere Widerstandsfähigkeit gegen wasserstoffinduzierte Versprödung durch die Zugabe von Vanadium, das die Diffusionsgeschwindigkeit des Wasserstoffs und dadurch seine Versprödungswirkung einschränkt.
- 3) Höhere Kriechfestigkeit, die im Vergleich zum Standardwerkstoff eine Erhöhung der Arbeitstemperatur und der Betriebsdrücke ermöglicht.

Diese technischen Anforderungen müssen auch vom Schweißgut erfüllt werden. Dazu gehören natürlich bessere mechanische Eigenschaften, die sich bei den beiden Werkstoffen nicht nur nach der letzten Wärmebehandlung, sondern eben auch auf jeder Stufe

Heat treatment but inevitably also at every stage of the manufacturing process, as this study has clearly shown.

Chemical analysis, in as many different combinations as possible, was studied at length during the development phases of these welding consumables in order to obtain the best performance from the weld metal. The possibility of modifying it to obtain lower values of hardness, YS and TS with respect to present values, both in intermediate treatment conditions (ISR or DHT) and after final heat treatment was evaluated, but there was always a significant reduction in creep resistance without any real improvement in toughness.

Summarising the most important aspects:

1) The diffusible hydrogen content in the welded joint is negligible after ISR or DHT treatment,

2) The ISR treatment carried out at 680°C during 4 h allows similar impact values to be obtained at room temperature to the classical ISR carried out with the standard material. Moreover, it seems that such a temperature is necessary with the V-modified material in order to obtain a significant relaxation of the residual stresses. This relatively high temperature may open the question of the global LMP that the materials (base material and weld metal) have to satisfy without reduction of the mechanical properties to below the code requirement. In fact this may not be too critical, since on the basis of the Larson Miller Parameter, this treatment is equivalent to an increase of 1.2 hours of the final PWHT at 705°C. Besides, this high temperature ISR should be, for example, carried out only on the more highly stressed joints (nozzle/barrel or nozzle/head) and finally, if we consider a total heat treatment cycle of 680°C x 4 h repeated 3 times + 705°C x 8 h also repeated 3 times, the equivalent LMP is 21.026, a value which is not significantly different from the maximum reference value of 21.000 given by the steel producers,

3) Even though the vanadium material shows tensile strengths after ISR and/or DHT significantly higher than standard material, after minimum PWHT it shows high values of toughness and conforms with creep resistance, as specified by the International Standard (ASME Code Case 2098.2 or Appendix 26 ASME VIII div.2).

4) The results of the tests carried out in accordance with current standards have shown that the submerged arc welding combination OERLIKON OP CROMO F537 flux with OERLIKON OE CROMO S225V wire satisfies the more stringent technical requirements for this type of application following final Post Weld Heat Treatment.

5) The V modified weld metal deposited, completely satisfies step-cooling requirements after final PWHT showing high resistance to temper embrittlement due to the extremely low level of impurities (P, As, Sn, Sb,...).

des Fertigungsprozesses wesentlich voneinander unterscheiden, wie diese Untersuchung deutlich gemacht hat. Während der Entwicklungsphase der Zusatzwerkstoffe wurde die chemische Analyse in vielen verschiedenen Abstufungen ausführlich untersucht, um die bestmöglichen Eigenschaften des Schweißgutes zu erreichen.

Versuche, das Schweißgut so zu modifizieren, dass im Vergleich zu den jetzigen Werten niedrigere Härte- und Festigkeitswerte nach Zwischen- und Endglühung vorliegen, zeigten stets eine deutliche Verringerung der Kriechfestigkeit und keine wirkliche Verbesserung der Zähigkeit.

Fasst man die wichtigsten Aspekte zusammen, ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

1) Der Gehalt an diffusiblem Wasserstoff in der geschweißten Naht kann nach Zwischenglühen (ISR) oder Wasserstoffarmglühung (DHT) vernachlässigt werden.

2) Durch das Zwischenglühen (ISR) bei 680°C für 4h werden bei Raumtemperatur ähnliche Kerbschlagwerte erzielt wie beim klassischen Zwischenglühen mit dem Standardwerkstoff. Außerdem scheint diese Temperatur beim V-modifizierten Material notwendig zu sein, um eine wesentliche Verringerung der Eigenspannungen zu erreichen. Diese relativ hohe Temperatur kann Fragen aufwerfen hinsichtlich des LMP-Bereiches, den die Werkstoffe (sowohl Grundwerkstoff als auch Schweißgut) benötigen, ohne dass die mechanischen Eigenschaften sich unter die Code-Anforderungen verschlechtern. Dies sollte jedoch unkritisch sein, da diese Behandlung nach Larson Miller einer Verlängerung der letzten Wärmebehandlung (PWHT) von 1,2 h bei 705°C entspricht. Außerdem sollte diese hohe Zwischenglüh-Temperatur nur für die stärker beanspruchten Verbindungen eingesetzt werden (bei Stützeinschweißungen in den Behältermantel oder -deckel). Schließlich, wenn wir einen gesamten Wärmebehandlungszyklus von 680°Cx4h betrachten, der 3 mal wiederholt wird + 705°Cx8h, die ebenfalls 3 mal wiederholt werden, dann liegt der LMP bei 21.026. Das ist ein Wert, der sich nicht wesentlich vom maximalen Bezugswert von 21.000 unterscheidet, der von den Stahlherstellern angegeben wird.

3) Auch wenn das Vanadium-Material nach dem Zwischenglühen und/oder der Wasserstoffarmglühung Festigkeitseigenschaften besitzt, die deutlich über dem Standardmaterial liegen, dann zeigt es nach der abschließenden Mindestwärmebehandlung (PWHT) hohe Zähigkeitswerte und entspricht bei der Kriechfestigkeit den in der Internationalen Norm festgelegten Forderungen (ASME Code Case 2098.2 oder Appendix 26 ASME VIII div.2).

4) Die Ergebnisse der Untersuchungen, die nach geltenden Normen durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass die Draht-Pulver Kombination OERLIKON OE CROMO S225V mit OERLIKON OP CROMO F537 nach der letzten Wärmebehandlung die strengeren technischen Anforderungen dieser Anwendungsfälle erfüllt.

5) V-modifiziertes Schweißgut erfüllt nach Wärmebehandlung und anschließender STC-Behandlung die Anforderungen und besitzt wegen der extrem geringen Verunreinigungen (P,As,Sn,Sb,...) eine hohe Beständigkeit gegen Anlass-Versprödung.

Dr. A. Bertoni - Air Liquide Welding Italy - Dr. C. Bonnet - AIR LIQUIDE / C.T.A.S

BIBLIOGRAPHY: / LITERATURHINWEISE:

[1] European Contract BRPR-CT96-0179 Project N° BE 1835: "Prediction of pressure vessel integrity in creep hydrogen service (PREDICH)" Final Technical Report, 2000.

[2] PHM Hart: "Weld hydrogen levels. The influence of the welding parameters" The Welding Institute Research Bulletin, April 1979, pag.106-108.

[3] S.Bertolini, F.Festa, L. Barbieri, P. Gattini, G. Riccardi: "Heavy wall reactor: research and industrial results of Nuovo Pignone" 9th International Conference on Pressure Vessel Technology, Sydney Australia 9-14 April 2000

Grade 23 tubes, pipes and welded joints production: materials, consumables and process developments.

More and more stringent requirements for emission reductions and of increased efficiency in modern power plants require fabricators worldwide to evaluate new materials. Low alloy grades 23 and 24 have been identified as a one of the possible solutions to meet the above-mentioned requirements. Their improved weldability and creep-strength between 500 and 580°C and a cost advantage over higher Cr materials in this temperature range, make the optimization of these materials one of the most interesting development fields.

Keywords:

- P23
- T23
- low-alloy steels
- welding
- PWHT
- SMAW
- SAW

TenarisDalmine (TD) focused on the development of tubes and pipes of Grade 23. Air Liquide Welding group (ALW) has optimized and distributes a complete product family for the welding of Grade 23 steel for high temperature application. Centro Sviluppo Materiali (CSM) has undertaken a deep work in the microstructural and creep characterization of high temperature resistant materials.

A joint characterization program has been established in order to assess the long term properties of welded joints produced using SMAW and SAW processes.

The production cycle and the heat treatment of tubes and pipes have been optimized to guarantee suitable mechanical and long term creep properties. Dedicated WPS's have been designed taking into account the needs of industrial production. Joints both in the as welded and post weld heat treated conditions have been characterized in order to evaluate mechanical and creep properties.

Short term creep resistance of cross weld specimens is within the acceptance criteria of base material. Long term base material and cross weld creep tests are running to complete the evaluation of the creep performances.

Rohre und Schweißverbindungen aus Hochwarmfestem Stahl Grad 23: Werkstoff-, Schweißzusatz - und Verfahrensentwicklungen.

Immer strengere Auflagen beim Emissionsschutz und höhere Anforderungen an den Wirkungsgrad moderner Kraftwerke machen bei den Stahlherstellern weltweit die Entwicklung neuer Werkstoffe erforderlich. Die niedriglegierten Stahlgüten Grad 23 und 24 haben sich als eine der besten Lösungen zur Erfüllung der oben genannten Anforderungen erwiesen. Ihre verbesserte Schweißbarkeit und die höhere Kriechfestigkeit zwischen 500 und 580°C sowie der Kostenvorteil gegenüber Produkten mit einem höheren Cr-Anteil in diesem Temperaturbereich, machen die Optimierung dieser Werkstoffe zu einem äußerst interessanten Forschungs- und Entwicklungsgebiet.

TenarisDalmine (TD) hat sich auf die Entwicklung von Rohren aus Stahl Grad 23 konzentriert. Der Air Liquide Welding

Schlüsselbegriffe

- P23
- T23
- Schweißen
- Niedriglegierte Stähle
- PWHT
- SMAW
- SAW

Konzern (ALW) verfügt über eine vollständige Produktfamilie zum Schweißen des Stahltyps Grad 23 für warmfeste Anwendungen. Das Materialforschungszentrum „Centro Sviluppo Materiali“ (CSM)

hat eine genaue Untersuchung der Mikrostruktur und der Kriech Eigenschaften von hochtemperaturbeständigen Werkstoffen durchgeführt.

In einem gemeinsamen Untersuchungsprogramm wurden die Langzeiteigenschaften von Schweißverbindungen untersucht, die im E-Hand (SMAW) und UP (SAW) – Verfahren hergestellt wurden.

Der Produktionszyklus und die Wärmebehandlung von Rohren wurde optimiert, um entsprechende mechanische Eigenschaften und Zeitstandwerte zu garantieren. Spezielle Schweißanweisungen (WPS) wurden erarbeitet, die den Anforderungen einer industriellen Fertigung gerecht werden. Schweißverbindungen wurden in unbehandeltem Zustand und nach Wärmebehandlung untersucht, um die mechanischen Eigenschaften und die Kriech Eigenschaften zu bestimmen.

Die Zeitstandwerte nach kurzer Laufzeit, ermittelt an Schweißverbindungen, liegen innerhalb der Gewährleistungen des Grundwerkstoffes. Die Zeitstandversuche für Grundwerkstoff und Schweißverbindung werden fortgesetzt.

INTRODUCTION

Energy production is faced with the introduction of increasingly stringent emission regulations to safeguard health and to preserve the environment for the future generations.

Increasing the thermal efficiency of a power plant is the best way to reduce the emissions.

Thermal efficiency is influenced by several factors, but the adoption of supercritical conditions by increasing steam temperatures and pressures plays a key role: very high temperatures and pressures makes the use of steels suitable for these severe conditions mandatory [1].

For that reason, in the last years the use of new steel grades with enhanced high temperature properties has increased and, accordingly, the need of joining techniques for these materials with comparable high temperature properties [2-4].

In this context it is necessary to investigate deeply the behaviour of these new grades as far as weldability and high temperature base material and welded joint properties are concerned.

This activity presupposes the development of consumables with a suitable composition and the optimization of the welding procedures.

Grade 23 steel has been identified as a potential solution for its creep and weldability properties.

In the last years Tenaris focused on the development of tubes and pipes of this steel grade; to guarantee optimum mechanical and creep properties, the production cycle and the heat treatment of tubes and pipes have been optimized. On the other hand ALW developed and optimized a complete range of welding consumables for all the new advanced materials for power generation.

Now, in order to define the properties of SMAW and SAW joints fabricated from seamless, Tenaris, the Italian Welding Institute and Air Liquide Welding, have carried out a joint research program. Centro Sviluppo Materiali (CSM) is involved in the microstructural and creep characterization of base material and welded joints.

Dedicated WPSs have been designed and tested in order to define the properties achievable from welded joints both in the as welded and PWHT conditions.

MATERIAL PROPERTIES

Grade 23 is a low alloyed steel (2.25% Cr) derived from grade 22 substituting part of the Mo content with W and adding Nb, V, B.

Mo and W act as solution strengtheners of the metal matrix. V, Nb and Ti form fine precipitates (carbides and nitrides) which obstacle the dislocation movement, thus increasing the mechanical and creep resistance of the material. B stabilizes the $M_{23}C_6$ carbides, retarding their coarsening, which is detrimental for the creep performance.

Seamless pipes and tubes are regulated by the ASTM standards A335 and A213. This material, as per code

EINLEITUNG

Die Energiewirtschaft steht der Einführung immer strengerer Auflagen im Emissionsschutz zum Gesundheitsschutz und zur Bewahrung der Umwelt für die zukünftigen Generationen gegenüber.

Die Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades eines Kraftwerkes ist der beste Weg, Emissionen zu reduzieren.

Der Wirkungsgrad wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst; dabei spielt die Nutzung hochkritischer Bedingungen durch die Erhöhung der Dampftemperatur und des Drucks eine zentrale Rolle: Sehr hohe Temperaturen und Druck machen den Einsatz von Stählen erforderlich, die diesen hohen Anforderungen gewachsen sind [1].

Aus diesem Grund wurden in den vergangenen Jahren vermehrt neue Stahltypen mit verbesserten Warmfestigkeitseigenschaften eingesetzt. Dadurch wurden auch Verbindungstechniken mit vergleichbaren Eigenschaften notwendig [2-4].

Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, das Verhalten dieser neuen Stähle hinsichtlich der Schweißbarkeit und Schweißnahteigenschaften genau zu untersuchen.

Dies setzt die Entwicklung eines Schweißzusatzes mit vergleichbarer Zusammensetzung und die Optimierung der Verfahrensparameter voraus.

Der Grad 23 Stahl gilt aufgrund seiner Kriecheigenschaften und der Schweißbarkeit als eine der Lösungen für die Zukunft.

In den letzten Jahren hat sich Tenaris auf die Entwicklung von Rohren dieses Stahltyps konzentriert, um bestmögliche mechanische Eigenschaften und Kriecheigenschaften zu garantieren. Dabei wurden der Produktionszyklus und die Wärmebehandlung optimiert. ALW wiederum entwickelte und optimierte eine vollständige Reihe von Schweißzusatzwerkstoffen für die in der Energiegewinnung neuen Materialtypen.

Um nun die Eigenschaften der SMAW- und SAW-Rundnähte zu beurteilen, haben Tenaris, das italienische Schweißinstitut und Air Liquide Welding gemeinsam eine Studie durchgeführt. Das Centro Sviluppo Materiali (CSM) war mit der Bestimmung der Mikrostruktur und der Kriechfestigkeit des Grundwerkstoffes und der Schweißverbindungen beteiligt.

Spezielle WPS wurden erstellt, um zu ermitteln, welche Eigenschaften in den Schweißverbindungen im unbehandelten Zustand und nach Wärmebehandlung (PWHT) erreichbar sind.

EIGENSCHAFTEN DES GRUNDWERKSTOFFS

Grad 23 ist ein niedriglegierter Stahl (2.25% Cr), der vom Grad 22 Typ abgeleitet wurde, indem ein Teil des Mo-Gehaltes durch W und die Zugabe von Nb, V, B ersetzt wurde.

Mo und W dienen zur Mischkristallhärtung für die Metallmatrix. V, Nb und Ti bilden feine Ausscheidungen (Karbide und Nitride), die ein Hindernis für die Versetzung darstellen und damit die mechanischen Eigenschaften und die Kriechfestigkeit erhöhen. B stabilisiert die $M_{23}C_6$ Carbide durch die Verzögerung ihrer Vergrößerung, die sich negativ auf die Kriechfestigkeit auswirkt.

Nahtlose Rohre unterliegen den ASTM Standards A335 und A213. Dieses Material entspricht, gemäß Code 2199-1, auch

case 2199-1, conforms also to the ASME requirements for the construction of boilers and pressure equipment.

The chemical composition of steel, according to ASTM and ASME, is summarized in Table 1.

Table 1: Chemical composition of base material

Grade	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	W	Nb	V	B	Other
Grad												Andere
22	0.05 0.15	0.30 0.60	0.025 max	0.025 max	0.50 max	1.90 2.60	0.87 1.13	-	-	-	-	-
23	0.04 0.10	0.10 0.60	0.030 max	0.010 max	0.50 max	1.90 2.60	0.05 0.30	1.45 1.75	0.02 0.08	0.20 0.30	0.0005 0.006	N: 0.03 max

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung Grundwerkstoff

PRODUCTION CYCLE

TenarisDalmine tubes and pipes are produced from solid billets, manufactured directly by the continuous casting process or manufactured from ingots by hot rolling. All CrMo steels are vacuum degassed to improve the cleanliness and to reduce gas content.

Round bars are heated in a rotary furnace at high temperature before piercing.

Heating parameters depends on the diameter of the bars and on the type of steel: a computerized system controls the thermal cycle, the heating rate and the soaking time at high temperature.

Before piercing, bars are descaled using high pressure water to eliminate the oxide formed during the heating in the furnace.

Tubes and pipes are produced in TenarisDalmine in three different mills, according to the size of the finished products.

Tube sizes with OD up to 88.9 mm are manufactured in a small size continuous mill (FAP mill); pipes with OD up to 406.4 mm are produced in a multistand pipe mill (MPM) with retained mandrel [5], whereas pipes with OD from 406.4 up to 711 mm are manufactured in a rotary expansion mill [6] (Expander mill). In particular, in the continuous mill, it is possible to produce tubes for Heat Recovery Steam Generator (HRSG) with lengths up to 24 meters.

The as-rolled microstructure is not adequate to ensure mechanical properties and creep resistance suitable for the demanding applications of the power generation industry. Therefore the as-rolled tubes and pipes are heat treated: in particular the tubes are normalized and tempered, while the pipes with larger wall thickness are quenched and tempered. Continuous Cooling Transformation curves (CCT, see fig.1) have been used to define the minimum cooling rate to obtain a fully bainitic microstructure after cooling from the austenitizing temperature. Particular attention must be kept to maintain an adequately fast cooling rate, to avoid the formation of a mixed ferritic-bainitic microstructure.

The tubes with OD smaller than 168.3 mm are heat treated in a furnace with a special atmosphere, which reduces the superficial oxide to metal and at the same time avoids

PRODUKTIONSZYKLUS

TenarisDalmine Rohre werden aus festen Rohlingen in einem Stranggussverfahren oder aus Blöcken im Warmwalzverfahren hergestellt. Zur Verbesserung der Reinheit und zur Reduzierung des Gasgehalts werden alle CrMo Stähle vakuumentgast.

Rundstahl wird vor dem Anstechen in Drehöfen auf hohe Temperaturen gebracht.

Die Aufheizparameter hängen vom Durchmesser der Blöcke und vom Stahltyp ab. Ein Computersystem prüft den thermischen Zyklus, die Aufheizrate und die Haltezeit bei hohen Temperaturen.

Vor dem Anstechen werden die Stränge mit hohem Wasserdruck gestrahlt, um das Oxid zu entfernen, das sich während des Glühens im Ofen bildet.

Abhängig von der Größe der Endprodukte werden Rohre bei TenarisDalmine in drei verschiedenen Walzwerken hergestellt.

Rohrgrößen mit Außendurchmessern (AD) bis zu 88.9 mm werden in einer kleinen kontinuierlichen Walzanlage (FAP); Rohre mit Außendurchmessern bis zu 406.4 mm werden in einer Multistand-Anlage (MPM) mit Dornstange [5] hergestellt, während Rohre mit Außendurchmessern von 406.4 bis zu 711 mm in einer Expander-Anlage [6] (Expander mill) produziert werden. Insbesondere mit der kontinuierlichen Walzanlage ist es möglich, Rohre für thermische Kraftwerksanlagen (Heat Recovery Steam Generator (HRSG) in Längen bis zu 24 m herzustellen.

Die Mikrostruktur bei unbehandelten Rohren ist nicht geeignet, um die mechanischen Eigenschaften und die Kriechfestigkeit sicherzustellen, die für die anspruchsvollen Anwendungen in der Energieindustrie notwendig sind. Daher werden die Rohre einer Wärmebehandlung unterzogen: genauer gesagt werden die Rohre normalisiert und angelassen, Rohre mit größerer Materialdicke werden abgeschreckt und angelassen. Transformationskurven der kontinuierlichen Kühlung (Continuous Cooling Transformation curves (CCT, siehe Bild 1) wurden herangezogen, um die Mindestabkühlgeschwindigkeit zu definieren, die notwendig ist, um eine vollständige bainitische Mikrostruktur aus der Austenitisierungstemperatur zu erzielen. Dabei muss besonders darauf geachtet werden, dass eine entsprechende schnelle Kühlung beibehalten wird, um die Bildung einer ferritisch-bainitischen Mischmikrostruktur zu verhindern.

Rohre mit einem Außendurchmesser kleiner 168.3 mm werden in einem Ofen unter spezieller Atmosphäre wärmebehandelt. Dadurch

Fig.1: CCT Diagram of grade 23

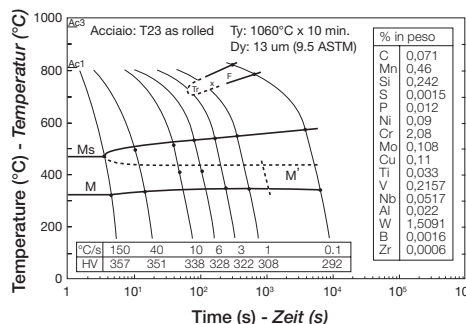


Bild 1: ZTU-Schaubild Grad 23

decarburization. The austenitization temperature range is 1040-1070°C, sufficiently high to put into solution all the carbide forming elements. Tempering is carried out between 750 and 780°C, in order to ensure adequate creep strength and good toughness properties.

Examples of the microstructures are shown in the Figures 2 and 3. Figure 4, obtained by TEM on thin foil and extraction replicas, shows in more detail the tempered bainitic-martensitic structure of grade 23. The main precipitates identified by EDS and X-ray diffraction are the following:

- Small MC: Nb rich with V and W,
- Small M₂C: containing W-V and a small amount of Nb,
- M₆C: having chromium content above 20-25 %, W about 15-20% and Fe as remained,
- M₂₃C₆: with Cr above 40-50%, Fe about 30-40% and small amount of W.

The M₂₃C₆ and the M₆C located at grain and sub grain boundaries and have larger dimensions than MC and M₂C carbides.

A large program of aging and creep testing on base and welded joint have been launched and a relevant amount of investigation will be carried out by STEM+EDS in order to investigate the microstructural stability and the precipitates evolution.

Table 2 reports the mechanical properties of some TenarisDalmine T23 tubes and P23 pipes of different sizes and the ASTM minimum requirements. Impact properties of a tube ODxWT 38 x 6.8 mm and of a pipe ODxWT 457 x 17.5 mm are listed in Table 3 and 4, respectively. Hot tensile tests, carried out up to 700°C on a tube ODxWT 38 x 6.8 mm, are shown in figure 5.

Table 2 - Typical average mechanical properties of selected TenarisDalmine T/P23 tubes and pipes

ASTM grade	Dimension ADxWT (mm x mm)	Hardness (HV10)		Yield Strength (MPa)		Ultimate Tensile Strength (MPa)	
		ASTM	Tenaris Dalmine	ASTM	Tenaris Dalmine	ASTM	Tenaris Dalmine
T23	38 x 3.8	< 230	191	> 400	510	> 510	620
T23	38 x 6.8	< 230	198	> 400	501	> 510	597
T23	89.9 x 17	-	214	> 400	517	> 510	620
T23	219 x 31.75	-	210	> 400	511	> 510	622
T23	457 x 17.5	-	208	> 400	458	> 510	590

Fig.2: Tempered bainitic microstructure of a Grade 23 pipe (OD 219mm x WT 31.75mm) after Q+T by LM and SEM

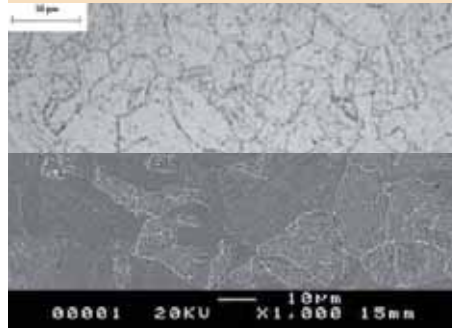


Bild 2: Bainitische Mikrostruktur eines P 23 Rohres (AD 219 mm x WS 31.75 mm) nach Q+T (Abschrecken und Anlassen) durch Lichtmikroskop (LM) und Rasterelektronenmikroskop (SEM)

Fig.3: Tempered bainitic microstructure of a Grade 23 tube (OD 38mm x WT 3.8mm) after N+T by LM and SEM

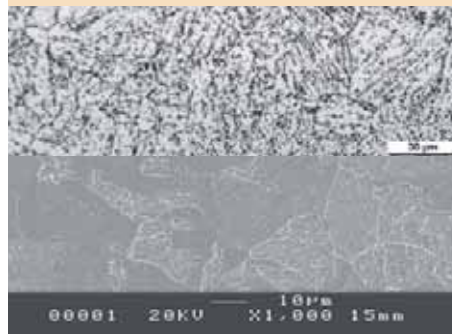


Bild 3: Vergütete bainitische Mikrostruktur eines T 23 Rohres (AD 38mm x WS 3.8mm) nach N+T (Normalisierung und Anlassen) durch LM and SEM.

Fig.4: Microstructure of Grade 23 by TEM on thin foil and extraction replica

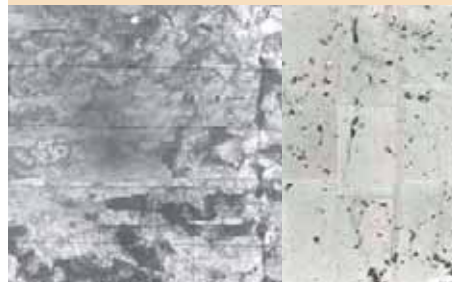


Bild 4: Mikrostruktur von Grad 23 (TEM Dünnschnittpräparation sowie Extraktionsabdruck)

wird das Oberflächenoxid zu Metall reduziert und gleichzeitig ein Entkohlen verhindert. Der Temperaturbereich der Austenitisierung liegt bei 1040-1070°C, ausreichend hoch, um alle Karbidbildner zu lösen. Das Anlassen erfolgt zwischen 750 und 780°C, um eine entsprechende Kriechfestigkeit und gute Zähigkeitseigenschaften sicherzustellen.

Die Bilder 2 und 3 zeigen Beispiele für die Mikrostruktur. Bild 4 mit Aufnahmen eines Transmissionselektronenmikroskops (TEM Dünnschnittpräparation sowie Extraktionsabdruck) zeigt eine genauere Darstellung der vergüteten bainitisch-martensitischen Grad 23 – Struktur. Folgende Hauptausscheidungen wurden per EDS (energiedispersive Spektrographie) und Röntgen ermittelt:

- kleine MC Karbide: Nb reich mit V und W,
- kleine M₂C Karbide: mit W-V und einem geringen Anteil Nb,
- M₆C: mit einem Cr-Gehalt von über 20-25 %, W über 15-20% und Resten von Fe,
- M₂₃C₆: mit einem Cr-Gehalt von über 40-50%, Fe über 30-40% und einem geringen Anteil W.

Die M₂₃C₆ und M₆C Karbide, die an den Korngrenzen gefunden wurden, sind größer als die MC und M₂C Karbide.

Ein umfassendes Programm mit Alterungs- und Kriechfestigkeitstests sowohl am Grundwerkstoff als auch an Schweißverbindungen ist angelaufen und eine Vielzahl an Untersuchungen mittels Rastertransmissionselektronenmikroskop (STEM) und EDS wird durchgeführt, um die Stabilität der Mikrostruktur und die Entwicklung der Ausscheidungen zu untersuchen.

In Tabelle 2 sind die mechanischen Eigenschaften einiger TenarisDalmine T23 und P23 Rohre unterschiedlicher Größen und die Mindestanforderungen nach ASTM zusammengestellt. Die Kerbschlageigenschaften eines Rohres mit ADxWS 38x6.8 mm (WS = Wandstärke) und eines Rohres mit ADxWS 457x17.5 mm sind in Tabelle 3 und 4 aufgeführt, während Bild 5 Warmzugproben bei 700°C an einem Rohr mit ADxWS 38x6.8 mm zeigt.

Tabelle 2 - Typische Werte der mechanischen Eigenschaften ausgewählter TenarisDalmine T/P23 Rohre

ASTM grad	Abmess ADxWS (mm x mm)	Härte		Streckgrenze (MPa)		Zugfestigkeit (MPa)	
		ASTM	Tenaris Dalmine	ASTM	Tenaris Dalmine	ASTM	Tenaris Dalmine
T23	38 x 3.8	< 230	191	> 400	510	> 510	620
T23	38 x 6.8	< 230	198	> 400	501	> 510	597
T23	89.9 x 17	-	214	> 400	517	> 510	620
T23	219 x 31.75	-	210	> 400	511	> 510	622
T23	457 x 17.5	-	208	> 400	458	> 510	590

Table 3 - Impact properties of T23 ODxWT 38 x 6.8 mm

Temperature (°C)	J/cm ²	Shear area %
20	173	100
0	198	100
-20	181	100
-40	179	97
-60	126	75

Table 4 - Impact properties of P23 ODxWT 457 x 17.5 mm

Temperature (°C)	J/cm ²	Shear area %
20	399	100
0	415	100
-20	341	100
-40	254	80

Fig.5: Tensile properties at high temperature of a tube ODxWT 38 x 6.8 mm

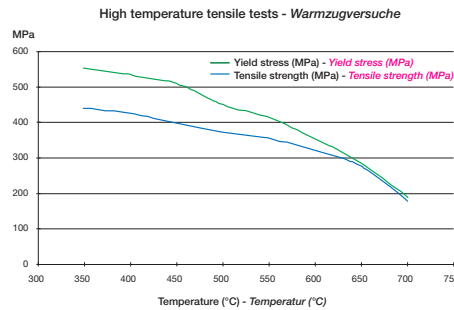


Bild 5: Warmzugeigenschaften eines Rohres mit ADxWS 38x6.8mm

Tabelle 3 - Kerbschlagwerte T23 ADxWS 38x6.8 mm

Temperatur (°C)	J/cm ²	Scherbereich %
20	173	100
0	198	100
-20	181	100
-40	179	97
-60	126	75

Tabelle 4 - Kerbschlagwerte P23 ADxWS 457x17.5mm

Temperatur (°C)	J/cm ²	Scherbereich %
20	399	100
0	415	100
-20	341	100
-40	254	80

GIRTH WELDING OF TUBING AND PIPING

In the construction of a power plant, welding of tubes and pipes takes place in various phases and environments. In particular, all the components that can be assembled in shop will require high efficiency processes such as Submerged Arc Welding (SAW). However, on-site assembly will employ more manual processes such as Shielded Metal Arc Welding (SMAW).

A dedicated research effort has allowed ALW to develop a complete set of welding consumables for the above-mentioned processes. The potentialities of flux-cored technologies were employed to design the most appropriate products [7, 8, 9] (see Table 5). Because of the lack of dedicated Standards (AWS or EN), the chemistry defined by ASTM and ASME Code for the base material has been adopted as a starting point to define and develop the chemical composition of the welding consumables.

Table 5 - List of consumables

Consumable (*)	AWS/EN Classification	Type	Diameter (mm)
OERLIKON CARBOROD WF23	A5.28: ER80 CG	Flux-cored GTAW rod	2,0
OERLIKON CROMOCORD E223	A5.5: E8015 - G	Basic SMAW electrode	2.5; 3.2 & 4.0
OERLIKON CROMO SW223	A5.23: F9AZF8PZ ECG-G	Flux-cored SAW wire	3.2
OERLIKON OP121TT W	760: SA FB 1 55 AC H5	Basic agglomerated SAW flux	N/A

(*) Note: Previously commercialized as AL CROMO W223 for GTAW rod, AL CROMO E223 for SMAW electrodes and AL CROMO SF223 / FX 76B for SAW flux / wire combination

Welding activities

ALW and IIS shared the welding activities of this joint operative research project. Consequently, a series of joints have been chosen to closely represent the most typical ones of power plant assembly conditions. In particular, SMAW was applied in 2G (tube with vertical axis) and 5G PF condition (pipe with fixed horizontal axis). SAW was applied in PA condition (rotating pipe with horizontal axis) -

RUNDNAHTSCHWEISSEN AN ROHREN UND ROHRLEITUNGEN

Im Kraftwerksbau werden mehrfach und in unterschiedlichen Fertigungsabschnitten Rohre und Rohrleitungen geschweißt. Vor allem für die Komponenten die vormontiert werden, sind leistungsfähige Verfahren wie das UP-Schweißen erforderlich. Für das Schweißen auf der Baustelle werden vorzugsweise Verfahren eingesetzt, die leichter zu handhaben sind, wie zum Beispiel das E-Hand Schweißen (SMAW).

ALW hat ein komplettes Angebot an Schweißzusatzwerkstoffen für die oben genannten Verfahren entwickelt. Dabei wurde das Potential der Fülldrahttechnologie genutzt, um optimal angepasste Produkte herzustellen [7, 8, 9] (siehe Tabelle 5). Da spezielle Normen fehlten (AWS oder EN), wurde die chemische Zusammensetzung, die ASTM und ASME Code für den Grundwerkstoff vorgeben, als Ausgangspunkt zur Bestimmung und Entwicklung der chemischen Zusammensetzung der Schweißzusätze herangezogen.

Tabelle 5 - Liste der Zusatzwerkstoffe

Zusatzwerkstoff (*)	AWS/EN Klassifizierung	Typ	Durchmesser
OERLIKON CARBOROD WF23	A5.28: ER80 CG	WIG Füllstab	2,0
OERLIKON CROMOCORD E223	A5.5: E8015 - G	Basische E-Hand (SMAW) Elektrode	2.5; 3.2 & 4.0
OERLIKON CROMO SW223	A5.23: F9AZF8PZ ECG-G	UP Fülldraht	3.2
OERLIKON OP121TT W	760: SA FB 1 55 AC H5	Basisches agglomeriertes SAW flux	nicht zutreffend

(*) Anmerkung: Neue Zusatzwerkstoffnamen, früher unter folgenden Bezeichnungen vermarktet: AL CROMO W223 für den WIG-Stab, AL CROMO E223 für die E-Hand Elektrode und AL CROMO SF223 / FX 76B für die UP Draht/Pulverkombination.

Schweißversuche

ALW und IIS teilten sich die Schweißaufgaben bei diesem gemeinsamen Forschungsprojekt. Die verschiedenen Schweißverbindungen für die Tests sollten die typischen Anwendungsbedingungen in der Kraftwerksmontage möglichst genau abbilden. Insbesondere wurde das E-Hand-Schweißen (SMAW) in 2G (Rohr mit vertikaler Achse) und 5G PF Position eingesetzt (Rohr mit fester horizontaler Achse). Das UP-Schweißen wurde in PA-Position durchgeführt (drehendes Rohr mit horizontaler

Figures 6 and 7. The welded joints were tested mechanically and chemically in three different conditions: as-welded (AsW); post weld heat treated at 740°C for 2 hr (PWHT1); post weld heat treated at 710°C for 1.5 hr (PWHT2).

According to the EN 288-1, each type of joint was defined with a preliminary welding procedure specification (WPS). During welding, the operative parameters were collected and a specific WPR was edited.

The welding parameters adopted in the assembly of the girth joints are shortly reported in Table 6.

Preheat and interpass temperatures have been selected in the range of 200-250°C.

Table 6 - Welded joints tested (AsW=As-Welded)

Grade	Size ODxWT (mm)	Welding processes	Welding position	HI (kJ/mm)	Test conditions
T23	38 x 3.8	GTAW+SMAW	2G	0.88	AsW
T23	38 x 6.8	GTAW+SMAW	2G	0.88	AsW
T23	76 x 12.5	GTAW+SMAW	2G	0.88	AsW
P23	219 x 31.75	GTAW+SMAW	5G PF	0.92	PWHT2 710°C x 1.5h
P23	219 x 31.75	GTAW + SMAW + SAW	PA	1.67	PWHT2 710°C x 1.5h
P23	457 x 17.5	GTAW + SMAW	5G PF	0.92	AsW - PWHT1 740°C x 2h
P23	457 x 17.5	GTAW + SMAW + SAW	PA	1.67	AsW - PWHT1 740°C x 2h

Joins characterisation

Each welded joint was X-rayed; non-destructive test results show that the joints were sound without any presence of indications. Consequently, a set of specimens was machined to characterize the joints chemically, physically and mechanically.

Weldment characterisation

Macrographic examinations were performed to evaluate the bead sequences and joint quality. In addition, the chemical composition of the joints was analyzed using a mass spectrometer. A matching weld metal chemical composition has been developed for both the SMAW and SAW welding processes. The weld metal chemical analysis shown in Table 7 matches the ASTM and ASME requirements for the parent metal (see also Table 1).

Fig.6: SMAW welding on P23



Bild 6: E-Hand-Schweißung an P23

Fig.7: SAW welding on P23

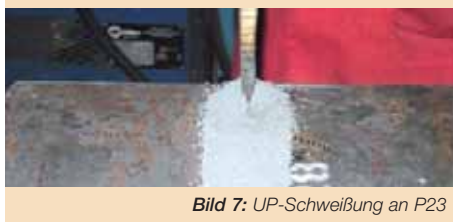


Bild 7: UP-Schweißung an P23

Achse) - Bilder 6 and 7. Die mechanischen und chemischen Eigenschaften der Schweißnähte wurden in drei verschiedenen Zuständen untersucht: unbehandelt (as-welded = AsW); nach Wärmebehandlung (post weld heat treatment) 740°C / 2 h (PWHT1) und nach Wärmebehandlung 710°C / 1.5 h (PWHT2).

Nach EN 288-1 wurde jede Naht durch eine Schweißanweisung (WPS) definiert. Während des Schweißens wurden die Parameter aufgezeichnet und ein Schweißbericht (WPR) ausgedruckt.

Tabelle 6 zeigt eine Zusammenfassung der Schweißparameter, die für die Rundnaht verwendet wurden.

Für Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur wurde ein Bereich zwischen 200 und 250°C gewählt.

Tabelle 6 - Schweißnahtprüfungen (PWHT = Wärmebehandlung)

Grad	Abm. ADxWS (mm)	Schweißverfahren	Schweißposition	WE (kJ/mm)	Prüfbedingungen
T23	38 x 3.8	WIG + E-Hand	2G	0.88	Unbehandelt
T23	38 x 6.8	WIG + E-Hand	2G	0.88	Unbehandelt
T23	76 x 12.5	WIG + E-Hand	2G	0.88	Unbehandelt
P23	219 x 31.75	WIG + E-Hand	5G PF	0.92	PWHT2 710°C x 1.5h
P23	219 x 31.75	WIG + E-Hand + UP	PA	1.67	PWHT2 710°C x 1.5h
P23	457 x 17.5	WIG + E-Hand	5G PF	0.92	Unbeh. - PWHT1 740°C x 2h
P23	457 x 17.5	WIG + E-Hand + UP	PA	1.67	Unbeh. - PWHT1 740°C x 2h

Schweißnahtprüfung

Jede Schweißnaht wurde geröntgt. Die zerstörungsfreien Prüfungen zeigten, dass die Schweißnähte einwandfrei waren und kein Fehler vorlag. Daraufhin wurden Proben für die Bestimmung der chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften ausgearbeitet.

Table 7: Chemical analysis of the joints in different locations (WM and BM)

T23 ODxWT 76 x 12.5 SMAW													
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	V	Nb	W
ASME	0.04	0.10	0.50	0.03	0.010	-	1.90	0.05	-	-	0.20	0.020	1.45
Req	0.10	0.60	max	max	max	-	2.60	0.30	-	-	0.30	0.080	1.75
BM	0.06	0.47	0.26	0.02	0.004	0.14	2.08	0.10	0.15	0.013	0.21	0.048	1.47
WM	0.05	0.51	0.24	0.01	0.006	0.45	1.94	0.05	0.03	0.005	0.20	0.013	1.28

P23 ODxWT 457 x 17.5 SMAW													
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	V	Nb	W
ASME	0.04	0.10	0.50	0.03	0.010	-	1.90	0.05	-	-	0.20	0.020	1.45
Req	0.10	0.60	max	max	max	-	2.60	0.30	-	-	0.30	0.080	1.75
BM	0.06	0.46	0.23	0.008	0.002	0.09	2.09	0.13	0.13	0.011	0.23	0.055	1.54
WM	0.05	0.51	0.23	0.01	0.006	0.49	2.03	0.06	0.03	0.005	0.21	0.015	1.32

P23 ODxWT 457 x 17.5 SAW													
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	V	Nb	W
ASME	0.04	0.10	0.50	0.03	0.010	-	1.90	0.05	-	-	0.20	0.020	1.45
Req	0.10	0.60	max	max	max	-	2.60	0.30	-	-	0.30	0.080	1.75
BM	0.06	0.46	0.23	0.008	0.002	0.09	2.09	0.13	0.13	0.011	0.23	0.055	1.54
WM	0.05	0.51	0.23	0.010	0.006	0.49	2.03	0.06	0.03	0.005	0.21	0.015	1.32

P23 ODxWT 219 x 31.75 SAW													
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	V	Nb	W
ASME	0.04	0.10	0.50	0.03	0.010	-	1.90	0.05	-	-	0.20	0.020	1.45
Req	0.10	0.60	max	max	max	-	2.60	0.30	-	-	0.30	0.080	1.75
BM	0.06	0.46	0.23	0.008	0.002	0.09	2.09	0.13	0.13	0.011	0.23	0.055	1.54
WM	0.05	0.51	0.23	0.010	0.006	0.49	2.03	0.06	0.03	0.005	0.21	0.015	1.32

Tabelle 7: Chemische Analyse der Verbindungen (Grundwerkstoff und Schweißgut)

Schweißgutprüfung

Anhand von Makroschliffen wurden der Lagenaufbau und die Nahtqualität bewertet. Außerdem wurde die chemische Zusammensetzung der Nähte spektralanalytisch bestimmt. Ein Schweißgut mit artgleicher chemischer Zusammensetzung wurde für das E-Hand und das UP-Verfahren eingesetzt. Die Ergebnisse der chemischen Analyse des Schweißguts in Tabelle 7 stimmen mit den ASTM und ASME Anforderungen für den Grundwerkstoff überein (siehe auch Tabelle 1).

Characterization of mechanical properties

The mechanical characteristics were assessed by means of hardness, tensile, impact toughness and bend tests.

To better understand the hardness trends in the joint, the pattern in Figure 8 was adopted. Results measured on five different types of joints are reported in Figure 9 for the weld metal and the heat-affected zone.

Tensile tests were carried out both in transversal (or cross weld, CW) and longitudinal (or all weld AW) direction. CW specimen gauge length contains the fusion zone at the centre, and heat affected zone and parent material at the two sides, while AW specimens are cut from weld metal only. Tests were carried out at two different temperatures: room temperature and 550°C.

Impact characteristics were assessed for the various joints at room temperature, 0°C and -20°C.

Test results are reported together with the relevant acceptance criteria in Tables 8, 9 and 10 for different types of joints.

Hot tensile CW tests at 550°C were carried to assess the behaviour of the joints at high temperature: all ruptures occurred in the parent material.

Table 8a - Mechanical Characteristics of T23 ODxWT 38 x 3.8 mm SMAW girth welded joint in the as-welded condition

Test	Zone	Acceptance Criteria	Results
Tensile at RT		UTS > 510 MPa	UTS 620 (CW)*
KVC at RT (J/cm ²)	weld metal	> 27J at RT	67
HV10 max	WM	NA	294
	HAZ		350
	PM	Max 230 HV	192

Table 8b - Mechanical Characteristics of T23 ODxWT 38 x 6.8 mm SMAW girth welded joint in the as-welded condition

Test	Zone	Acceptance Criteria	Results
Tensile at RT		UTS > 510 MPa	UTS 578 (CW)*
KVC at RT (J/cm ²)	weld metal	> 27J at RT	72
HV10 max	WM	NA	319
	HAZ		340
	PM	Max 230 HV	196

Table 8c - Mechanical Characteristics of T23 ODxWT 76 x 12.5 mm SMAW girth welded joint in the as-welded condition

Test	Zone	Acceptance Criteria	Results
Tensile at RT		UTS > 510 MPa	UTS 652 (CW)*
KVC at RT (J)	weld metal	> 27J at RT	32
	Fusion line		30
	FL+2mm		201
	PM		222
HV10 max	WM	NA	310
	HAZ		364
	PM	Max 230 HV	214

Fig.8: Hardness test pattern

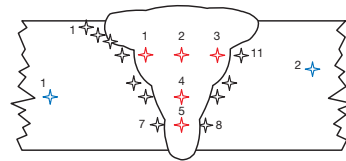


Bild 8: Muster der Härte-tests

Fig.9: Maximum Hardness values in the different types of joint

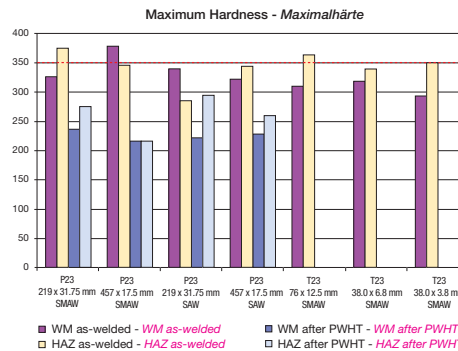


Bild 9: Maximale Härte-werte der verschiedenen Nahttypen

Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften wurden durch Härte, Zugfestigkeit, Kerbschlagzähigkeit sowie Biegeproben charakterisiert.

Zum besseren Verständnis illustriert Bild 8 die Härteverteilung in der Naht. Die Ergebnisse aus Messungen an fünf verschiedenen Nähten für das Schweißgut und die Wärmeinflusszone sind in Bild 9 dargestellt.

Die Zugfestigkeit wurde sowohl quer (cross weld, CW) also auch längs (im reinen Schweißgut = all weld, AW) geprüft. Die CW Probe enthält das Schweißgut im Zentrum, die WEZ und den Grundwerkstoff an beiden Seiten, während die AW Proben ausschließlich aus dem Schweißgut entnommen sind. Die Tests wurden bei zwei verschiedenen Temperaturen durchgeführt: Raumtemperatur und 550°C.

Die Kerbschlagzähigkeit der verschiedenen Nähte wurde bei Raumtemperatur, 0°C und -20°C ermittelt.

Alle Ergebnisse sowie die geforderten Werte sind in den Tabellen 8, 9 und 10 für die unterschiedlichen Nahttypen zusammengefasst.

CW Warmzugversuche bei 550°C wurden durchgeführt, um das Verhalten der Nähte bei hohen Temperaturen zu beurteilen. Die Proben sind alle im Grundwerkstoff gerissen.

Tabelle 8a - Mechanische Eigenschaften T23 ODxWS 38 x 3.8 mm SMAW Rundstumpfnähte in unbehandeltem Zustand

Test	Zone	Geforderte Werte	Ergebnisse
Zugfestigkeit bei RT		UTS > 510 MPa	UTS 620 (CW)*
KVC at RT (J/cm ²)	Schweißgut	> 27J at RT	67
HV10 max	WM	Nicht zutreffend	294
	WEZ		350
	Grundwerkstoff	Max 230 HV	192

Tabelle 8b - Mechanische Eigenschaften T23 ADxWS 38 x 6.8 mm SMAW Rundstumpfnähte in unbehandeltem Zustand

Test	Zone	Geforderte Werte	Ergebnisse
Zugfestigkeit bei RT		UTS > 510 MPa	UTS 578 (CW)*
KVC at RT (J/cm ²)	Schweißgut	> 27J at RT	72
HV10 max	WM	Nicht zutreffend	319
	WEZ		340
	Grundwerkstoff	Max 230 HV	196

Tabelle 8c - Mechanische Eigenschaften T23 ADxWS 76 x 12.5 mm SMAW Rundstumpfnähte in unbehandeltem Zustand

Test	Zone	Geforderte Werte	Ergebnisse
Zugfestigkeit bei RT		UTS > 510 MPa	UTS 652 (CW)*
KVC at RT (J)	Schweißgut	> 27J at RT	32
	Schmelzlinie		30
	FL+2mm		201
	Grundwerkstoff		222
HV10 max	Schweißgut	Nicht zutreffend	310
	WEZ		364
	Grundwerkstoff	Max 230 HV	214

Table 9 - Mechanical characteristics of P23 ODxWT 219 x 31.75 mm SMAW and SAW girth welded joints in the as-welded and PWHT conditions (*specimen broken in parent metal)

Joint condition	Test	Zone	Acceptance criteria	SMAW	SAW
As-welded	Tensile RT		UTS > 510 MPa	641 (CW)*	628 (CW)*
	KVC at RT (J)	Weld metal	> 27 J at RT	17	20
		HAZ		242	215
		PM		395	395
PWHT 1.5 h 710°C	Tensile RT		UTS > 510 MPa	595 (CW)*	615 (CW)*
	KVC at RT (J)	Weld metal	> 27 J at RT	147	53
		HAZ		243	237
		PM		395	395
	KVC at RT (J)	Weld metal	> 27 J at RT	113	22
		HAZ		231	158
		PM		377	377

Table 10 - Mechanical Characteristics of P23 ODxWT 457x17.5 mm SMAW and SAW girth welded joint in the as-welded and PWHT conditions (* specimen broken in parent metal)

Joint condition	Test	Zone	Acceptance criteria	SMAW	SAW	
As-welded	Tensile RT		YS > 400 MPa	786 (AW)	762 (AW)	
			UTS > 510 MPa	868 (AW)	877 (AW)	
			E > 20%	601 (CW)*	615 (CW)*	
	KVC at RT (J)	Weld metal	> 27 J at RT	12	20	
				Fusion line	30	215
				HAZ	190	219
PM				399	399	
PWHT 2 h 740°C	Tensile RT		YS > 400 MPa	511 (AW)	534 (AW)	
			UTS > 510 MPa	601 (AW)	629 (AW)	
			E > 20%	555 (CW)*	585 (CW)*	
	KVC at RT (J)	Weld metal	> 27 J at RT	161	89	
				Fusion line	197	127
				HAZ	226	183
				PM	399	399
	KVC at -20°C (J)	Weld metal	> 27 J at RT	39	15	
				Fusion line	61	31
				HAZ	196	24
	Tensile 550°C			Ys	339 (AW)	348 (AW)
				UTS	359 (AW)	374 (AW)
					343 (CW)*	341 (CW)*

Bend tests

According to ISO 5173, side bend test specimens were taken from all the joints. No evident ruptures, tearing or cracking occurred, even with bending angles up to 180°, as can be seen in Figure 10.

Creep tests

Creep strength is of utmost importance for the materials used for high temperature applications. It can be affected by many factors but the most important are the chemical composition, the heat treatment parameters and the microstructure.

Fig.10: Bend test specimens after bending



Bild 10: Proben nach dem Biegen

Tabelle 9 - Mechanische Eigenschaften P23 ADxWS 219x31.75 mm SMAW und SAW Rundnähte in unbehandeltem Zustand und nach Wärmebehandlung PWHT (* Probe im Grundwerkstoff gerissen).

Nahtzustand	Test	Zone	Geforderte Werte	SMAW	SAW
Unbehandelt	Zugfestigkeit RT		UTS > 510 MPa	641 (CW)*	628 (CW)*
	KVC at RT (J)	Schweißgut	> 27 J at RT	17	20
		WEZ		242	215
Grundwerkstoff		395		395	
Wärmebehandlung PWHT 1.5 h 710°C	Zugfestigkeit RT		UTS > 510 MPa	595 (CW)*	615 (CW)*
	KVC at RT (J)	Schweißgut	> 27 J at RT	147	53
		WEZ		243	237
		Grundwerkstoff		395	395
	KVC at RT (J)	Schweißgut	> 27 J at RT	113	22
		WEZ		231	158
		Grundwerkstoff		377	377

Tabelle 10 - Mechanische Eigenschaften P23 ODxWT 457x17.5 mm SMAW und SAW Rundstumpfnähte in unbehandeltem Zustand und nach Wärmebehandlung PWHT (* Probe im Grundwerkstoff gerissen)

Nahtzustand	Test	Zone	Geforderte Werte	SMAW	SAW	
Unbehandelt	Zugfestigkeit RT		YS > 400 MPa	786 (AW)	762 (AW)	
			UTS > 510 MPa	868 (AW)	877 (AW)	
			E > 20%	601 (CW)*	615 (CW)*	
	KVC at RT (J)	Schweißgut	> 27 J at RT	12	20	
				Fusion line	30	215
				WEZ	190	219
Grundwerkstoff				399	399	
Wärmebehandlung PWHT 2 h 740°C	Zugfestigkeit RT		YS > 400 MPa	511 (AW)	534 (AW)	
			UTS > 510 MPa	601 (AW)	629 (AW)	
			E > 20%	555 (CW)*	585 (CW)*	
	KVC at RT (J)	Schweißgut	> 27 J at RT	161	89	
				Fusion line	197	127
				WEZ	226	183
				Grundwerkstoff	399	399
	KVC at -20°C (J)	Schweißgut	> 27 J at RT	39	15	
				Fusion line	61	31
				WEZ	196	24
	Tensile 550°C			Ys	339 (AW)	348 (AW)
				UTS	359 (AW)	374 (AW)
					343 (CW)*	341 (CW)*

Biegeversuche

Seitenbiegeversuche nach ISO 5173 wurden an allen Nähten durchgeführt. Es zeigten sich keine sichtbaren Risse, Brüche oder Anrisse, nicht einmal bei Biegewinkeln bis zu 180°, siehe Bild 10.

Kriechverhalten

Die Kriechfestigkeit ist von größter Bedeutung für Werkstoffe, die unter hohen Temperaturbelastungen stehen. Sie kann durch verschiedenen Faktoren beeinflusst werden, wobei die wichtigsten die chemische Zusammensetzung, die Wärmebehandlung und die Mikrostruktur sind.

The welding process affects all of these factors and therefore the creep strength of the welded joints must be assessed in order to obtain safety factors for the design and to ensure safe working conditions of the components. Creep specimens from the welded joints were tested at three different temperatures near the typical working condition of this grade, testing joints both in the as-welded and in the PWHT condition. The results on welded joints are compared with creep results on grade 23 TenarisDalmine parent material. All the ruptures of welded joints are within the 80% scatter band of the parent material mean line (Figure 11) and occur in the ICHAZ.

Fig.11: Welded joints and parent material creep properties

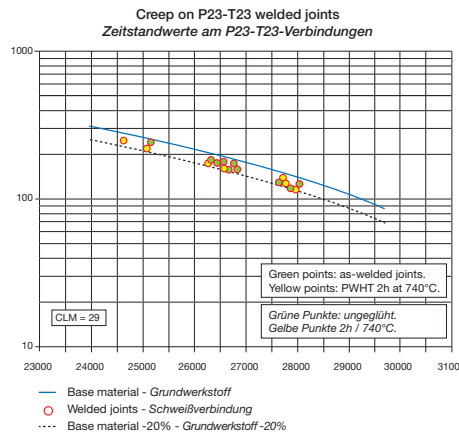


Bild 11: Zeitstandfestigkeit von Schweißverbindungen und Grundwerkstoff

DISCUSSION

The chemical composition of the material and the high cooling rate typical of the welding process determine a martensitic microstructure in the weld metal and in the parts of the joints, which during welding transform into austenite. As a consequence, in the as-welded condition high values of hardness and rather low toughness values are obtained in the weld metal and in the coarse grain HAZ.

In the as-welded joint with a thickness of 12.5 mm, the impact properties are acceptable even if they are just over the minimum requirements (32 J in the WM, 30 J in the HAZ). Thin tubes (WT 3.8 and 6.8 mm) show impact toughness above 67 J/cm² at room temperature.

Increasing the thickness of the pipe, the impact properties of the weld metal decrease, while hardness increases in the weld metal and in the heat affected zone. A PWHT was necessary to restore toughness and hardness properties on the pipes with wall thickness 17.5 mm and 31.75 mm (for example, in the SMAW joint ODxWT 457 x 17.5 mm, the impact energy in the WM increased from 12 J to 161 J at RT (from 6 J to 39 J at -20°C) and the maximum hardness in the HAZ decreased from 346 to 216 HV10).

Therefore a PWHT should be necessary for its beneficial effect on the impact properties of the joint on heavy wall thickness pipes.

Both PWHT conditions (PWHT1 and PWHT2) are sufficient to restore the toughness to satisfactory levels even at low temperature (-20°C) and to decrease the hardness in WM and in HAZ to acceptable values in the examined SMAW joints.

In the SAW joints, the hardness values after PWHT reach acceptable levels. The impact properties at RT are acceptable and over the minimum requirements, although a little bit lower than the values

Das Schweißverfahren hat Auswirkungen auf alle diese Faktoren. Daher muss die Kriechfestigkeit an Schweißverbindungen bewertet werden, um Sicherheitsfaktoren für die Berechnung zu ermitteln und sichere Betriebsbedingungen der Komponenten zu gewährleisten. Die Zeitstandsproben aus den Schweißnähten wurden bei drei verschiedenen Temperaturen geprüft, die den typischen Einsatzbedingungen dieses Werkstoffes entsprechen. Es wurde in unbehandeltem Zustand und nach Wärmebehandlung getestet. Die Ergebnisse aus den Schweißnähten wurden mit denen des Grundwerkstoffes Grad 23 TenarisDalmine verglichen. Alle Brüche der Schweißverbindungen liegen innerhalb der 80% Streubreite der Durchschnittsline des Grundwerkstoffes (Bild 11) und treten in der interkritischen WEZ (ICHAZ) auf.

DISKUSSION

Die chemische Zusammensetzung des Materials und die hohe Abkühlgeschwindigkeit, die beim Schweißen typisch ist, erzeugen eine martensitische Mikrostruktur im Schweißgut und in den Teilen der Verbindung, die sich während des Schweißens in Austenit umwandeln. Daraus ergibt sich, dass im unbehandeltem Zustand im Schweißgut und in der Grobkorn-WEZ hohe Härtewerte und relative niedrige Zähigkeitswerte erzielt werden.

Bei einer unbehandelten Naht mit einer Stärke von 12.5 mm sind die Kerbschlagwerte akzeptabel, auch wenn sie nur geringfügig über den Mindestanforderungen liegen (32J im Schweißgut, 30J in der WEZ). Dünne Rohre (WS 3,8 und 6,8mm) haben Kerbschlagwerte von über 67 J/cm² bei Raumtemperatur.

Bei größerer Rohrwandstärke verringern sich die Kerbschlag-eigenschaften des Schweißgutes während die Härte im Schweißgut und in der Wärmeinflusszone zunimmt. Eine Wärmebehandlung (PWHT) war notwendig, um die Festigkeits- und Härteeigenschaften bei Rohren mit Wandstärken von 17,5 mm und 31,75 mm wiederherzustellen (z. Bsp. erhöhte sich bei der SMAW Naht ADxWS 457x17,5mm die Kerbschlagarbeit im Schweißgut von 12J auf 161J bei RT (von 6J auf 39J bei -20°C) und die maximale Härte in der WEZ sank von 346 auf 216 HV10).

Aufgrund der günstigen Auswirkungen auf die Kerbschlagarbeit der Nähte an dickwandigen Rohren sollte immer eine Wärmebehandlung (PWHT) durchgeführt werden.

Beide PWHT-Bedingungen (PWHT1 and PWHT2) reichen aus, um sogar bei niedriger Temperatur (20 °C) wieder zufriedenstellende Zähigkeitswerte zu erzielen und die Härte im Schweißgut und in der WEZ auf akzeptable Werte zu senken.

In den UP-Nähten erreicht die Härte nach der Wärmebehandlung Werte. Die Kerbschlagarbeit bei RT ist ebenfalls akzeptabel und liegt über den Mindestanforderungen, obwohl sie etwas niedriger ist als die Werte, die in den SMAW-Verbindungen erreicht wurden. Dies ist wahrscheinlich eine Folge der leicht größeren Mikrostruktur, die sich beim UP-Schweißen entwickelt hat (Bilder 12 und 13).

Fig.12: Welded joints and parent material creep properties



Bild 12: P23 ADxWS 219x31.75 mm SMAW - Links: Makro-, rechts: Mikrostruktur

obtained in the SMAW joints, as a probable consequence of the slightly coarser microstructure developed (Figures 12 and 13).

The impact test results on SAW weld metal obtained on the 17,5 and 31,75 mm wall thickness pipes show that a PWHT at higher temperature is more beneficial to improve the toughness of the weldments (89 J (740°C x 2 h) vs. 56 J (710°C x 1,5 h) at RT).

CONCLUSION

Weldability tests were carried out on different sizes of grade 23 seamless pipes and tubes. The wall thicknesses covered in this study range from 3.8 to 31.75 mm. Both as-welded joints and PWHT joints were characterized.

The results obtained show that only the small size tubes with WT equal or lower than 12.5 mm could be welded without PWHT, because the impact energy in the weld metal is above the threshold of 27 J at room temperature even if the highest hardness reading in the heat affected zone is above 350HV10.

For larger wall thicknesses the PWHT is necessary and beneficial because this reduces the hardness to below 220 HV in SMAW joints and under 260 HV in SAW joints. Impact energy in the weld metal after PWHT of both SMAW and SAW joints satisfy the requirements of 27 J at RT; SMAW weld metal is above 27 J even at -20°C.

These differences between SMAW and SAW joints are probably due to the coarser microstructure obtained in SAW joints: further tests are on-going in order to enhance the properties of SAW joints.

The creep strength of the welded joint was also characterized and lies within the 80% scatter band of the parent material mean line; long-term tests on welded joints are on-going.

The results obtained in this research activity, conducted on materials already available on the market, show that tubes, pipes and weld metal present satisfactory performances according to the relevant current standards.

Fig.13: Welded joints and parent material creep properties



Bild 13: P23 ADxWS 219x31.75 mm SAW – Links: Makro-, rechts: Mikrostruktur

Die Kerbschlagergebnisse im UP-Schweißgut bei Rohren mit Wandstärken von 17,5 und 31,75 mm zeigen, dass die PWHT bei höheren Temperaturen sich günstiger auf die Zähigkeit der Nähte auswirkt (89J (740°C x 2h) gegenüber 56J (710°C x 1.5h) bei RT).

Die Zeitstandfestigkeit der UP-Schweißverbindungen lag außerhalb des 80% Streubandes des Grundwerkstoffes. Dabei konnten keine wesentlichen Unterschiede in der Zeitstandfestigkeit von unbehandeltem und wärmebehandeltem Material festgestellt werden.

SCHLUSSFOLGERUNG

Es wurden Schweißversuche an nahtlosen Rohren unterschiedlicher Abmessungen aus Grad 23 Stahl durchgeführt. Die überprüften Wandstärken lagen zwischen 3,8 und 31,75 mm. Sowohl unbehandelte als auch wärmebehandelte Nähte wurde betrachtet.

Die Ergebnisse zeigen, dass nur kleine Rohre mit WS kleiner oder gleich 12,5mm ohne Wärmebehandlung geschweißt werden können, da die Kerbschlagarbeit im Schweißgut über dem Grenzwert von 27J bei Raumtemperatur liegt, auch wenn die höchste Härte in der WEZ über 350HV10 liegt.

Für größere Wandstärken ist eine Wärmebehandlung notwendig und wirkt sich günstig aus, da sie die Härte bei Verbindungen mit Stabelektroden auf unter 220 HV und bei UP-Verbindungen auf unter 260 HV senkt. Nach einer Wärmebehandlung werden sowohl bei den Verbindungen mit der Stabelektrode (SMAW) als auch mit dem UP-Verfahren die Anforderungen an die Kerbschlagarbeit von 27J bei RT erreicht; das Stabelektroden-Schweißgut liegt sogar bei -20°C über 27J.

Die Unterschiede zwischen Stabelektroden- und UP-Verbindungen sind wahrscheinlich auf die größere Mikrostruktur bei UP-Nähten zurückzuführen. Es werden weitere Tests durchgeführt, um die Eigenschaften des UP-Schweißgutes weiterzuentwickeln.

Die Zeitstandfestigkeit wurde ebenfalls analysiert und liegt innerhalb des 80% Streubandes des Grundwerkstoffes; Langzeittests an Schweißverbindungen laufen noch.

Die Ergebnisse aus dieser Forschung, die mit am Markt erhältlichen Materialien durchgeführt wurde, zeigen, dass Rohre, Rohrleitungen und Schweißgut zufriedenstellende Ergebnisse entsprechend den geltenden Standards aufweisen.

G. Cumino, A. Poli, S. Caminada, TenarisDalmine. Piazza Caduti 4 Luglio 1944, 1 - Dalmine - Italy
E. Bauné, E. Galand, B. Leduey. Air Liquide Welding / C.T.A.S., 13, rue d'Epluches - St.Ouen l'Aumone - France
A. Bertoni, G.Liberati. Air Liquide Welding, Via Vò di Placca, 56 – Due Carrare - Italy
A. Di Gianfrancesco, F. Cirilli. Centro Sviluppo Materiali, Via di Castel Romano 100, 00128 Roma, Italy

BIBLIOGRAPHY: / LITERATURHINWEISE:

- [1] Viswanathan R., Bakker W.T, Materials for boilers in Ultra Supercritical Power Plants, Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference, Miami Beach, Florida, 23-26 July 2000
- [2] Marshall A.W., Zhang Z., Holloway G.B., Welding consumables for P92 and T23 creep resisting steels, 5th International Conference Welding and Repair Technology for Power Plants 2002, Alabama 26-28 June 2002
- [3] Heuser H., Fuchs R., Properties of weldments in the creep resistant CrMo Steels T23/T24 and P91/P92 and E911 made with matching filler metals, 4th International EPRI Conference on Welding and Repairing Technology for Power Plants, Florida 2000
- [4] Lundin C.D., Peng Liu, Yan Cui, A literature review on characteristics of high temperature ferritic Cr-Mo steels and weldments, Welding research Council Bulletin n° 454, August 2000
- [5] Anelli E., Cumino G., Gonzalez G.C., Proceedings from Materials Solutions '97, Indianapolis 15-18 Sept. 1997, p. 67
- [6] Anelli E., Farsetti P., Cumino G., Rossi M.A., Proceedings 2nd Int. Pipeline Tech. Conf. Ostend, Sept. 1995, p. 377

- [7] Bauné E., Bonnet C., Leduey B., Bertoni A., Development of consumables dedicated to the welding of new 2 1/4 Cr materials T/P23 and T/P24, AFAP European Symposium on Pressure Equipment, Paris, September 2004
- [8] New generation 2 1/4 Cr 1Mo pipe materials P23 and P24 for power generation and hydrogen service, Presentation by TNO within framework of research program, 2002-2003
- [9] E. Bauné, H. Cerjak, S. Caminada, C. Jochum, P. Mayr, J. Pasternak, Weldability and properties of new creep resistant materials for use in ultra supercritical coal fired power plants, Proceedings of the 8th Liege Conference, European Commission, Université de Liège, Liège, Belgium, Sept. 2006, to be published
- [10] Anelli E., Cesile M.C., Di Nunzio P.E., Cumino G., Tivelli M., Izquierdo A., Applications of metallurgical modelling to multi-pass girth welding of seamless linepipe, Proceedings "Application and evaluation of high-grade linepipes in hostile environments, Yokohama, 7-8 Nov. 2002

MIG-welding of Aluminium Alloys with Reduced Porosity using a Pulsed Sprayarc.

SCOPE

Building and packaging are the largest segments of the global aluminium market. However, the annual growth rate is higher in other segments, such as transportation and energy, at 4% to 10% per year.

This growth is a motor for innovation and the introduction of new technologies. Transportation (automotive, aircraft, aerospace and shipbuilding industries) or energy engineering activities are gradually introducing welded structures or components fabricated from sheet, plate, extruded and cast products.

In order to be more competitive, welding processes have to provide cost effective solutions in terms of productivity, quality and an improved environment for the welders and operators. At the same time, the quality requirements for automatic and manual MIG welding have increased.

In this programme, the technological objectives of Air Liquide and Air Liquide Welding were focused on improving weld quality when MIG welding, while retaining or increasing the high productivity potential of the process.

IMPROVEMENT OF THE GMAW PROCESS

State of the art

Gas Metal Arc Welding (GMAW) is a high productivity welding process but the welds produced can contain porosity. This drawback has restricted the industrial impact of the process. In this case, the cause of the porosity is the fact that hydrogen is 20 times more soluble in the liquid state ($0.69 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$) than in the solid state ($0.036 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$), Figure 1. Thus the risk increases with the temperature reached in the weld pool.

With this process, contaminants are dissociated in the arc and hydrogen is dissolved in the droplets during the transfer of metal from the wire to the weld pool, as well as in the weld pool itself, due to the partial pressure of hydrogen in the arc atmosphere above the molten pool. When solidification takes place, porosity will form if the hydrogen content of the weld pool is greater than the solubility in the solid state. Sources of hydrogen such as

Porenreduziertes MIG Schweißen von Alu-Werkstoffen durch gepulsten Lichtbogen.

EINLEITUNG

Die Bau -und Verpackungsindustrie sind die größten Verarbeiter im Aluminium Weltmarkt.

Jedoch ist das jährliche Wachstum in anderen Bereichen wie Transport und Energie viel größer (4% zu 10% pro Jahr).

Das Wachstum ist der Motor für Innovation und die Einführung neuer Herstellungsprozesse und neuer Technologien. Transportwesen (Automobilindustrie, Luftfahrt, Raumfahrt und Schiffbau) oder die Energiegewinnung führen allmählich Schweißkonstruktionen oder Komponenten unter Verwendung von Blech, Platten, Guss- oder Spritzgussprodukten ein.

Um wirtschaftlicher produzieren zu können, müssen Schweißprozesse wirtschaftliche, qualitativ hochwertige und anwenderfreundliche Lösungen bieten.

Die Anforderungen sind sowohl beim automatisierten als auch beim manuellen Schweißen gestiegen.

Ziel dieser Entwicklung war, die Qualität des MIG-Schweißens zu verbessern, ohne dabei die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu beeinträchtigen.

VERBESSERUNG DES GMAW VERFAHRENS (METALL-INERTGAS-SCHWEIßVERFAHREN - MIG)

Stand der Technik

Der MIG Prozess erlaubt eine sehr hohe Produktivität. Die Schweißnähte weisen aber bei diesem Prozess oft eine hohe Porosität auf. Dieser Nachteil hat die industrielle Verbreitung des Verfahrens eingeschränkt. Die Poren entstehen dadurch, dass Wasserstoff im flüssigen Zustand 20x löslicher ist ($0.69 \text{ cm}^3/100\text{g}$) als im festen Zustand ($0.036 \text{ cm}^3/100\text{g}$). Bild.1. Somit steigt das Risiko mit der Temperatur, die das Schweißbad erreicht.

Während des Schweißens werden Verunreinigungen vom Lichtbogen zersetzt und mit den übergehenden Tropfen als Wasserstoff in das Schweißgut eingebracht. Eine direkte Wasserstoffaufnahme der Schmelze erfolgt durch den Wasserstoffpartialdruck in der Atmosphäre über dem Schmelzbad. Während der Erstarrung entstehen Poren, wenn der Wasserstoffgehalt im Schmelzbad größer ist als die maximale Löslichkeit im festen Zustand. Wasserstoffquellen wie Kohlenwasserstoffe (Fett und Öle),

Fig.1: Solubility of Hydrogen in Aluminium

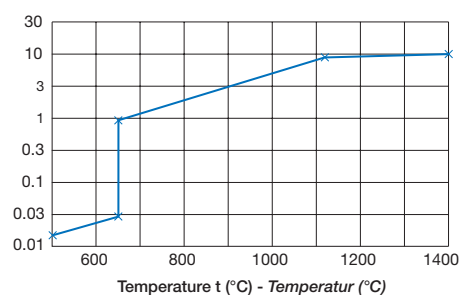


Bild 1: Gelöster Wasserstoff in Aluminium

hydrocarbons (grease or oil), humidity and air are the main contaminants. It is possible to deal with them on a step-by-step basis, as described in Figure 2.

Figure 2 - Typical Contamination Problems and Recommendations

Sources of Hydrogen Entrapment	State of the Art Solutions
Grease, oil, moisture on the joint	Degreasing, brushing, scraping.
Moisture on the welding consumable	Storage and use of the filler wire in sealed, inert and heated dispensers.
Moisture inside gas cylinders and hoses	Storage and quality of the welding gases. The gas lines must be tested (for air leaks and moisture) up to the contact tip. Selection of material for the gas line (low moisture permeability).
Leaks with air entering through fittings in the gas line	Temperature control at the inlet and outlet of the cooling system (temperature must not be lower than the ambient temperature).
Moisture on the welding nozzle (internal condensation)	Short arc length. Dedicated parameters, welding speed, position, enlargement of the molten pool to facilitate the degassing of the molten pool.
Turbulence of the gas flow allowing air to enter into the gas shielding	

In addition to the general state-of-the-art recommendations, other solutions have been investigated, so far:

- “Metallurgical” solution: using a filler metal containing cobalt in order to increase pore nucleation sites. [Ref. 1]. This filler metal is not commercially available.
- Mechanical or Electrical solutions:
 - direct mechanical vibration of the molten pool [Ref. 2]
 - stirring of the molten pool by applying electromagnetic fields outside the welding circuit [Ref. 3]. The action of electromagnetic forces on the molten metal is generated by the external application of an alternating magnetic field perpendicular to the components to be welded.
 - stirring of the molten pool through the application of significant changes to the pulsed MIG or TIG welding current, which induces, in both cases, a refinement of the solidification structure and accelerates the degassing of hydrogen. [Ref.5]
 - extension of the molten pool to enhance degassing

Two principles were selected for this development programme:

- the action of important variations of the electromagnetic forces on the molten metal generated directly by the arc, with a specific spray arc interrupted at constant frequency, as used in the pulsed arc mode - a modulated spray arc.
- the axial enlargement of the weld pool using MIG double tandem wires.

State of the art

Principle for Generating the Modulated Signal

As opposed to pulsed MIG welding, where the parameters are set to detach one droplet per pulse at the end of the peak current or at the beginning of the ground current, the modulated spray process is designed to induce a stirring of the molten pool: the transfer of metal takes place only when the current is high in the spray range.

Various signals were tested to evaluate the influence of the wave shape, frequency and base time on the level of porosity.

Feuchtigkeit und Luft sind die Hauptverunreinigungen. Es ist möglich, so wie nachstehend in Bild 2 gezeigt, dagegen vorzugehen.

Bild 2 - Typische Verunreinigungsprobleme und Empfehlungen

Mögliche Quellen für Wasserstoffeintrag	Lösungsmöglichkeiten
Fett, Öl, Feuchtigkeit auf dem Blech	entfetten, bürsten, verschrotten.
Feuchtigkeit der Zusatzwerkstoffe	Lagerung und Verwendung von Zusatzwerkstoffen in versiegelten inertem und beheizten Behältern.
Feuchtigkeit in Gasflaschen und -schläuchen	Lagerung und Qualität der Gase. Die Gasschläuche müssen bis zur Kontaktdüse geprüft werden. Auswahl der Gasschläuche unter dem Gesichtspunkt niedriger Feuchtigkeitsdurchlässigkeit.
Lecks, durch die Luft durch Anschlüsse in die Gasleitung dringen kann	Temperaturkontrolle Ein- und Ausgang des Kühlsystems (Temperatur muss unter der Raumtemperatur liegen).
Feuchtigkeit auf der Schweißdüse (interne Kondensation)	Kurzer Lichtbogen. Geeignete Parameter Schweißgeschwindigkeit, Position, Ausdehnung des Schmelzbades zur besseren Entgasung.
Verwirbelungen des Gasflusses durch die Luft in das Schutzgas eindringen kann	

Zu den Empfehlungen zum jetzigen Stand der Technik, wurden bisher auch schon andere Lösungswege angegangen:

- “Metallurgische” Lösungen mit einem Zusatzwerkstoff, der Kobalt enthält [Quelle 1]. Dieser Zusatzwerkstoff ist im Handel nicht erhältlich.
- Mechanische oder elektrische Lösungen:
 - direkte mechanische Vibration des Schmelzbades [Quelle 2]
 - Bewegen des Schmelzbades durch elektromagnetische Felder außerhalb des Schweißprozesses [Quelle 3]. Die Wirkung der elektromagnetischen Kräfte auf das geschmolzene Metall wird erzielt durch die externe Anwendung eines magnetischen Wechselfeldes, das senkrecht zu den zu schweißenden Werkstücken verläuft.
 - Bewegen des Schmelzbades durch Veränderungen des gepulsten MIG oder TIG Schweißstromes, wodurch in beiden Fällen eine Verfeinerung der Erstarrungsstruktur und eine Beschleunigung der Entgasung des Wasserstoffs erreicht werden [Quelle 5]
 - Ausdehnung des Schmelzbades, um das Entgasen zu erleichtern

Zwei dieser Möglichkeiten wurden für unsere Versuche ausgewählt:

Der Einfluss elektromagnetischer Kräfte auf das geschmolzene Metall, direkt hervorgerufen durch einen speziellen Sprühlichtbogen, der mit konstanter Frequenz unterbrochen wird, wie dies beim Pulsen der Fall ist. Es handelt sich also um einen modulierten Sprühlichtbogen.

MIG Modulierter Sprühlichtbogen

Prinzip für die Generierung des Modulationssignals

Im Gegensatz zum MIG Impulslichtbogen, bei dem pro Puls nur ein Tropfen am Ende eines Impulses oder am Anfang der Grundstromphase abgeschmolzen wird, wurde der modulierte Sprühlichtbogen so eingestellt, dass er das Schweißbad aufwühlt.

Der Materialübergang findet hier nur in der Hochstromphase (Sprühlichtbogen) statt. Verschiedene Signale wurden getestet, um den Einfluss der Impulsform, der Frequenz und der Grundstromzeit auf die Porosität zu ermitteln.

The signal shown in Figure 3 was then selected to be programmed into the EPROM of the transistorised controlled power source, OERLIKON 458 (synergic generator).

Experimental Approach

The efficiency of the process has been evaluated by using contaminated and non-contaminated gases. Tests have been performed by producing the same bead, using a conventional spray and a modulated spray technique with current modulation.

The differences were then assessed by visual radiographic tests, and macrographic examinations.

Pore generation by Contamination of the Shielding Gas

Two reliable procedures (Fig.4) have been used:

- by humidifying the shielding gas with small additions of water vapour, obtained by using a mixture of pure Argon and water saturated Argon. The moisture content was measured at the torch.
- through direct introduction of hydrogen from a "main" cylinder (Ar + 2.5% H₂) into the shielding gas (pure Argon).

It can be noted that to obtain an equivalent 50 mm² pore surface area, contamination needs to be two to two-and-a-half times higher in terms of volume when H₂ is used instead of H₂O as the contaminant.

Evaluation of the Porosity Level

The criteria for the soundness of the weld metal were evaluated on the basis of ISO 10042 and NF A89.220, Figure 5. Criteria have been directly expressed:

- either as a radiographic score following the CTAS method: 3 sizes of porosity were considered: N1, N2 and N3 being the number of pores of a given size in a length of 3 x 20 mm

$N1 = < 0.5 \text{ mm}, 0.5 < N2 < 1 \text{ mm and } N3 > 1 \text{ mm}$

The final radiographic score is given by :

$Nt = 0.5 N1 + N2 + 2xN3$

each score being the average of three samples

- or in terms of ratio: cumulative surface area of the porosity / Surface area of the beads.

Where the cumulative surface area of the pores is evaluated in 1500 mm² of bead surface area (100 mm length x 15 mm width).

Fig.3: Comparison between Pulsed MIG and the Modulated Spray MIG Technique

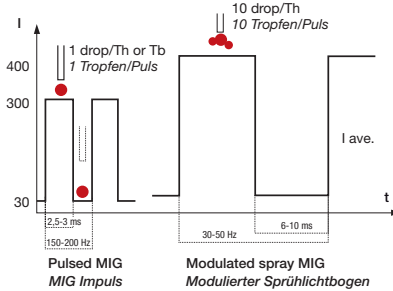


Bild 3: Vergleich zwischen einem MIG Impulslichtbogen und einem modulierten MIG Sprühlichtbogen

Fig.4: Surface Area of the pores according to the H₂ or H₂O content of the shielding gas

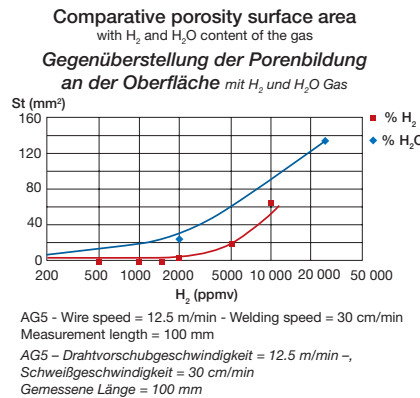


Bild 4: Oberflächenporosität abhängig von H₂ bzw. H₂O Verunreinigungen des Schutzgases.

Das in Bild 3 gezeigte Signal wurde ausgewählt und ein EPROM der transistor-gesteuerten Stromquelle OERLIKON CITOMAG 458 (Synergicstromquelle) programmiert.

Versuchsansatz

Die Effizienz des Verfahrens wurde mit verunreinigtem und nicht verunreinigtem Gas getestet. Die Tests wurden so durchgeführt, dass sowohl mit dem konventionellen Sprühlichtbogen als auch mit dem strommodulierten Lichtbogen im Aussehen vergleichbare Nähte entstanden. Die Unterschiede bei den inneren Nahtfehlern wurden dann durch Röntgentests und durch Makroschliffuntersuchungen ermittelt.

- Porenbildung durch Verunreinigungen des Schutzgases

Zwei verlässliche Verfahren wurden verwendet (Quelle 4):

- ein Befeuchten des Schutzgases durch kleine Beimischungen von Wasserdampf, was erreicht wurde durch die Verwendung einer Mischung von reinem Argon mit wassergesättigtem Argon, der Wassergehalt wurde am Brenner gemessen .
- die direkte Zufuhr von Wasserstoff über eine Flasche (Ar + 2.5% H₂) in das Schutzgas (reines Argon).

Es kann festgestellt werden, dass zur Erreichung einer 50 mm² Porenoberfläche, die Verunreinigung 2 bis 2,5 mal so stark sein muss, wenn H₂ statt H₂O als Verunreinigung verwendet wird.

- Bewertung des Porenhäufigkeit

Die Gütebewertung des Schweißgutes erfolgte auf der Basis der ISO 10042 und NF A 89.220, Bild 5. Folgender Bewertungsmaßstab wurde angelegt:

- entweder als Röntgenergebnis gemäß CTAS Methode: 3 Porengrößen werden betrachtet: N1, N2 und N3, wobei dies die Anzahl der Poren einer bestimmten Größe bezogen auf eine Länge von 3 x20 mm sind.

$N1 = < 0.5 \text{ mm}, 0.5 < N2 < 1 \text{ mm und } N3 > 1 \text{ mm}$

Das abschließende Röntgenergebnis ergibt sich:

$Nt = 0.5 N1 + N2 + 2x N3$, wobei jedes Ergebnis der Durchschnitt aus drei Mustern ist

- oder als ein Verhältnis ausgedrückt: kumulierte Oberfläche der Poren / Oberfläche der Raupen, wobei die kumulierte.

Oberfläche der Poren auf 1500 mm² Raupenoberfläche bewertet wird (100 mm Länge x 15 mm Breite).

Fig.5: Acceptance Criteria of the various Classes

NF A 89-220	Where / Wo	Class E	Class 1	Class 2
Maximum ϕ of acceptable pores Maximal akzeptabler ϕ der Poren	$e < 25$ $e > 25$	0.1625 e - 0.0625 4 mm	0.2 e 5 mm	0.2375 e + 0.0625 6 mm
Apparent surface area of the pores Sichtbare Oberfläche der Poren	$l < 15$	St = l (0.02 l + 0.4)	St = l (0.04 l + 0.8)	St = l (0.06 l + 1.2)
	$15 < l < 20$	St = l (0.1 l + 0.48)	St = l (0.2 l + 1.6)	St = l (0.3 l + 2.4)
	$l > 20$	St = 1.2	St = 2.4	St = 3.6
ISO 10042		Class B	Class C	Class D
Maximum ϕ of acceptable pores Maximal akzeptabler ϕ der Poren		10 mm	1.5 mm	2.0 mm
Apparent surface area of the pores Sichtbare Oberfläche der Poren		St = 2 e	St = 4 e	St = 8 e

Bild 5: Akzeptanzkriterien der verschiedenen Klassen

• Evaluation of the Essential and Supplementary Parameters

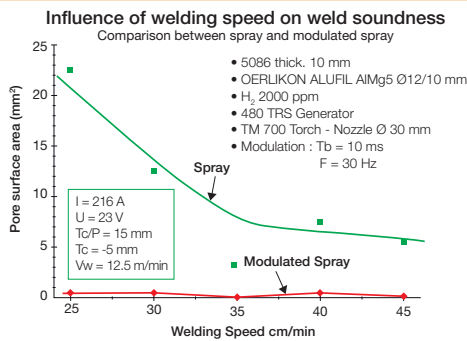
- Influence of the shape and of the frequency of the signal on the soundness of the weld (Figure 6): tests were carried out using sine, triangle and square wave for different wire feed rates. As shown in Figure 6, it always appears that the square signal is the most efficient regarding the soundness of the weld and that its efficiency is maximised in the range 30 to 60 Hz.

N.B: - Contamination of the weld was made by humidifying the shielding gas.

- radio score as defined before

- Influence of Welding Speed (Figure 7): in the range of welding speed from 25 to 45 cm/min (Figure 7), "modulated" spray shows a significant reduction of porosity and the remaining low level is not affected by the welding speed. Thus, it allows the conclusion that such vibrations of the molten pool must alter the solid-liquid interface and its progression in 3 directions. The presumed effects must therefore be of the same nature as those already observed during pulsed TIG welding or AC TIG welding of aluminium alloys. This improvement for this process, reputed to be "clean" from the point of view of porosity, must be even more significant in this case, as the risk of H₂ contamination of the filler metal through the arc is much higher.

Fig7: - Influence of Welding Speed



- Influence of Wire Feed Speed (Figure 8): the range of wire feed speeds investigated, as shown in Figure 8, approximately corresponds to the spray transfer of metal for that wire diameter. Even for relatively low spray pore density levels; the influence of current modulation is quite remarkable.

The corresponding reduction of porosity when using the spray technique appears to be unaffected by the wire feed speed.

- Influence of the Metal Transfer Mode (Figure 9):

as summarized in Figure 9, the

Fig.6: - Influence of the Shape and Frequency of the Signal on Pore Formation

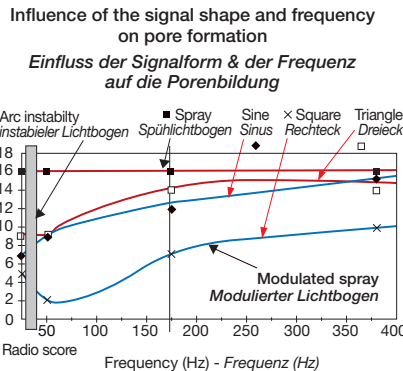


Bild 6: Einfluss der Signalform und Frequenz auf die Porenbildung.

• Bewertung der wesentlichen und zusätzlichen Parameter

- Einfluss der Form und der Frequenz des Signals auf die Güte der Schweißnaht (Bild 6):

Es wurden Versuche mit verschiedenen Signalformen, Sinus-, Dreieck- und Rechteckwellen und unterschiedlichen Drahtvorschubgeschwindigkeiten durchgeführt. Das Ergebnis war immer so wie in Bild 6 gezeigt: Das Rechtecksignal erwies sich hinsichtlich der Nahtgüte als das beste Signal. Der optimale Bereich der Frequenz liegt bei 30 bis 60 Hz.

Anmerkung: - Verunreinigung der Naht erfolgte durch Befeuchten des Schutzgases.

- Röntgenergebnis wie oben definiert.

- Einfluss auf die Schweißgeschwindigkeit (Bild 7):

Im Bereich der Schweißgeschwindigkeit von 25 bis 45 cm/min (Bild 7), zeigt der "modulierte Sprühlichtbogen" eine wesentliche Verringerung der Porosität. Der kleine verbleibende Rest an Poren ist nicht durch die Schweißgeschwindigkeit beeinflussbar. Daher kann man annehmen, dass solche Vibrationen des Schweißbades den Erstarrungsprozess verändern. Die Effekte müssen daher ähnlich sein wie die, die beim Puls-WIG Schweißen und AC WIG-Schweißen von Aluminiumlegierungen beobachtet werden. Diese Verbesserung des MIG-Prozesses, der hinsichtlich der Porosität schon zu den sauberen Verfahren zählt, ist umso höher zu bewerten, als hier das Risiko des H₂-Eintrages über den Zusatzwerkstoff viel höher ist.

Bild 7: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit.

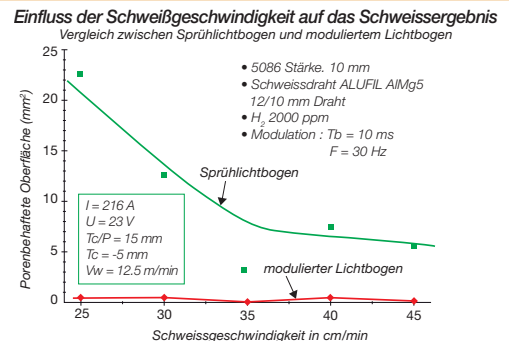


Fig8: - Influence of Wire Feed Speed

Influence of welding feed speed on weld soundness Comparison between spray and modulated spray

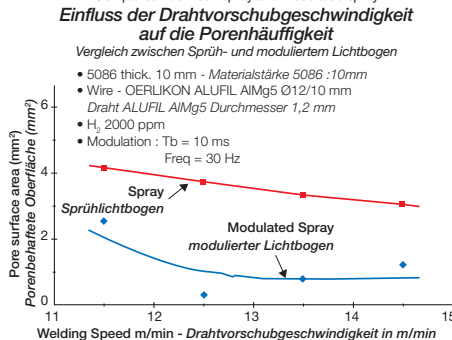


Bild 8: Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit

- Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit (Bild 8):

Der untersuchte Bereich der Vorschubgeschwindigkeit, wie in Bild 8 gezeigt, ist bei diesem Drahtdurchmesser gekennzeichnet durch einen Werkstoffübergang im Sprühlichtbogen. Sogar bei relativ niedriger Porendichte beim Sprühlichtbogenschweißen ist der Einfluss der Strommodulation recht bemerkenswert. Eine Reduzierung der Porosität bei beiden Lichtbogenarten scheint von der Drahtvorschubgeschwindigkeit jedoch wenig beeinflusst.

- Einfluss des Tropfenüberganges (Bild 9) Wie in Bild 9 dargestellt ist der positive

efficiency of the modulation is most effective when spray arc is used with a normal arc length or an increased arc length.

For a given wire feed rate, for which it is possible to weld in different conditions (arc length, constant or pulsed current), it appears, Figure 9, that the modulation of the welding current as described above, results in the lowest level of porosity, whatever the contamination of the arc atmosphere.

Moreover, Figure 9 indicates that apart from the improved soundness, the modulation of the welding current allows an increase in the depth of penetration and the wetting of the bead. Consequently, this would lead to an improvement of the fatigue resistance.

Fig.9: - Relationship between the Transfer Mode and the Level of Porosity

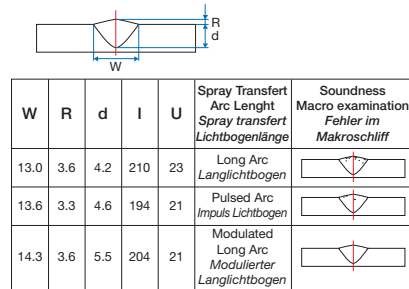
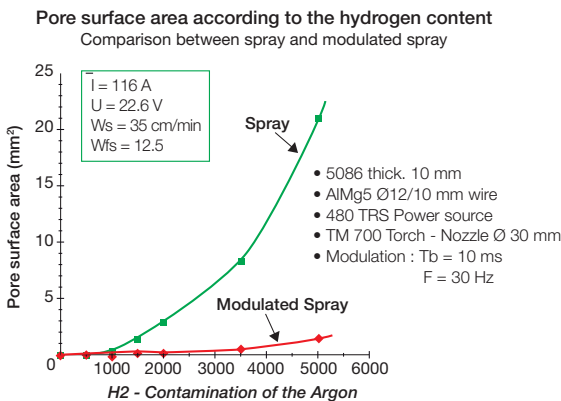


Bild 9: Beziehung zwischen Lichtbogenart / Tropfenübergang und Porositätsniveau

Results and Performance of Pore Reduction in the Modulated Spray Mode

In the least favourable case, on beads initially contaminated by the introduction of H₂ in the shielding gas (Figure 10), the performance of modulation complies, for example, with the maximum pore ratio limit of 0.007 for acceptance to the exceptional Class E of NF A 89.220 (Figure 11).

Fig.10: Performance of Current Modulation on H₂ contamination of the shielding gas



On other aluminium series alloys such as 6061(AISI) or 1050 (pure Al), results were obtained which are consistent with those achieved on 10 mm thick 5086 material (Figure 11). Other aluminium alloy series were not included in this study but are just as sensitive to the phenomenon of porosity and the benefits of this process would also be applicable.

Process Validation with Representative Fabricators

This development study has led to the introduction of this new-patented process [References 5 and 6], and the OERLIKON CITOWAVE range of arc welding equipment.

Einfluss des modulierten Sprühlichtbogens groß, wenn eine normale oder eine große Lichtbogenlänge verwendet wird.

Für eine gegebene Drahtvorschubgeschwindigkeit, bei der man unter verschiedenen Bedingungen schweißen kann (Lichtbogenlänge, konstanter oder gepulster Strom) zeigt Bild 9, dass die Modulation des Schweißstroms es ermöglicht, das niedrigste Poreniveau zu erreichen, unabhängig von der Verunreinigung der Lichtbogenatmosphäre.

Außerdem lässt sich mittels der Modulation auch eine Erhöhung der Einbrandtiefe und ein verbessertes Anfließverhalten des Bades erzielen, wodurch eine Erhöhung des Ermüdungswiderstandes erreicht wird. (Bild 9).

Ergebnisse Porenverringern durch den "modulierten Sprühlichtbogen"

Die Bilder 10 und 11 zeigen, dass beim Schweißen unter stark mit Wasserstoff verunreinigtem Schutzgas selbst im ungünstigsten Fall durch die Modulation des Lichtbogens die hohen Anforderungen für die max. Porenrate nach Class E der NF A89.220 erfüllt werden.

Bild 10: Leistung der Strommodulation auf H₂ Verunreinigungen in Schutzgas

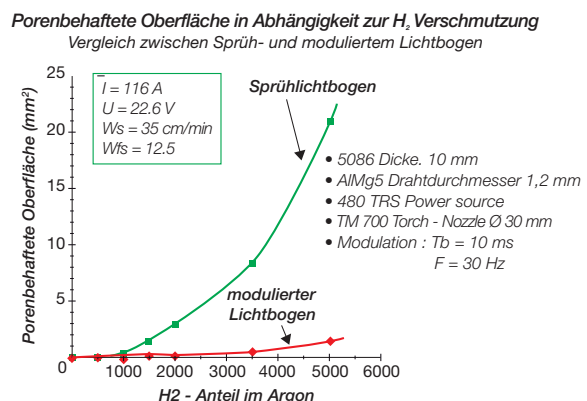


Fig.11: Performance of Current Modulation with regard to NF A89.220

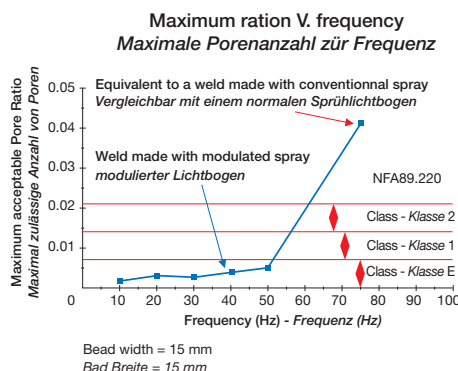


Bild 11: Maximale Porenanzahl zur Frequenz

Bei anderen Materialien wie 606 (AISI) oder 1050 (reines Al), erhalten wir Ergebnisse, die vergleichbar mit dem 10 mm starkem 5086 Material (Bild 11) sind. Für andere Legierungen, die in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt wurden, aber ebenso empfindlich gegenüber Porosität sind, können die Vorteile dieses Verfahrens ebenso genutzt werden.

Verfahrensbewertung mit repräsentativen Kunden:

Der neue patentierte Prozess wurde in die Stromquellen CITOMAG 458 sowie in die neue CITOWAVE Reihe implementiert.

The synergetic curves were determined for the most common aluminium alloys:

pure aluminium 1050 and alloys of the 5000-6000 series, in combination with :

- wire types 1100, 5356 and 4043 diameters 1.2 and 1.6 mm (OERLIKON ALUFIL AIMg5, ALUFIL AISi5)
- shielding gases: Argon and Argon/Helium (80-20) mixture (AL ARCAL 1 and 32).

Taking into account the remarks of the representative fabricators, these curves were initially established for the wire speed range 10 to 12.5 m/min (for wire diameter 1.2 mm) and have been extended from 4 to 13 m/min. For a constant frequency of modulation, it is necessary to establish, for each wire diameter, a good correlation between the base time and the wire feed speed with minimum current, associated with the beginning of spray transfer, Figure 12.

Currently, 2 applications areas have been investigated :

- Transportation: Shipbuilding activities (Defence and Fast Ferries) using automatic and manual welding
- Energy Transport (welding of underground electric lines) when manual welding.

Conclusions of the Development of Modulated Spray

Following this development study and the conclusions of the preliminary test work with representative fabricators, it is now possible to identify the most influential parameters of modulation.

• *Essential Modulation Parameters*

- Transfer technique:
To a large extent, it determines the initial state of porosity in the joint (Figure 10) and the effect of the modulation: "Long-Arc" spray technique (23 V) appears to be the least favourable as it allows a greater pick up of hydrogen by the droplets and the molten pool. Additionally, with a high arc voltage, the sensitivity of the gas shield to external disturbance increases and can increase contamination.

- Modulated Signal:
At constant average current, the frequency and shape of the signal (Figure 5) significantly influences the efficiency of the modulation. Concerning the frequency, best results are obtained with a square wave and with a frequency range from 30Hz to 50Hz. This parameter was kept constant for this development programme. In that condition and as defined before in Figure 12, it is necessary to retain one adapted correlation between the ground time, the wire feed speed and the peak current in order to reach spray transfer during the peak current phase.

Fig.12: Extended Wire Feed Speed Range for the Operating Curves included in the EPROM (Modulation Frequency 30Hz)

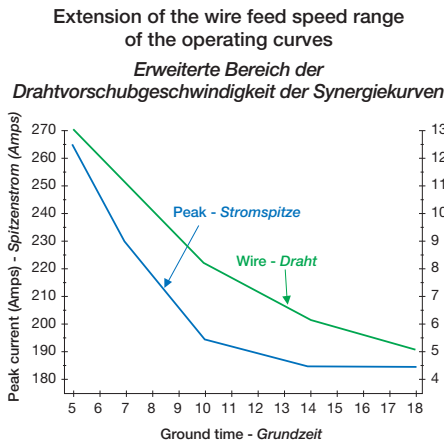


Bild 12: Erweiterter Bereich der Drahtvorschubgeschwindigkeit der für die im Eprom enthaltenen Synergiekurven (Frequenz-modulation 30Hz).

Die Synergiekurven können für die gebräuchlichsten Aluminiumlegierungen eingesetzt werden :

reines Aluminium 1050 und Legierungen der 5000-6000 Reihen in Kombination mit:

- Drahttypen 1100, 5356 und 4043 Durchmesser 1.2 und 1.6 mm,
- Schutzgase: Argon (ARCAL 1) und Argon/Helium 80/20 (ARCAL 32)

Kundenwünschen entsprechend wurden die Kurven von anfänglich 10 bis 12.5 m/min Drahtvorschub (für Drahtdurchmesser 1.2 mm) auf 4 bis 13 m/min erweitert. Für eine konstante Frequenz der Modulation ist es notwendig für jeden Drahtdurchmesser eine optimale Abstimmung zwischen Basiszeit und dem Drahtvorschub zu finden (Bild 12).

Bis heute wurde der Prozess in 2 Marktsegmenten erprobt und analysiert:

- Transport: Schiffbau (Militärbereich und Schnellfähren) Sowohl beim automatisierten und manuellen Schweißen.
- Energietechnik (Schweißen von unterirdischen Stromleitungen) - manuell.

Schlussfolgerungen zur Entwicklung des "modulierten Sprühlichtbogens":

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse und der Schlussfolgerungen aus den ersten Tests mit repräsentativen Kunden, hat man heute die wichtigsten Einflussgrößen der Lichtbogen-Modulation erkannt.

• *Wesentliche Modulationsparameter*

- Transfertechnik:
Zu einem großen Teil beeinflusst sie das Anfangsstadium der Porosität der Naht (Bild 10) und die Wirkung der Modulation: Der Langlichtbogenbereich (23 V) scheint am ungünstigsten zu sein, da er eine größere Aufnahme von Wasserstoff durch die Tropfen und das Schmelzbad ermöglicht. Außerdem steigt die Empfindlichkeit des Gasschutzes bei hoher Lichtbogenstromspannung und kann dadurch die Verunreinigung erhöhen.
- Moduliertes Signal:
Bei konstantem Durchschnittsstrom beeinflussen die Frequenz und die Form des Signals (Bild 5) wesentlich die Effizienz der Modulation. Für die Frequenz ergeben sich die besten Ergebnisse mit einer Rechteckwelle und einer Frequenz von 30 bis 50 Hz. Diese Parameter wurden für die Versuchsreihe konstant gehalten. Unter dieser Bedingung und wie in Bild 12 definiert, ist es notwendig, eine Relation zwischen Grundstromzeit, Drahtvorschub und Maximalstrom einzuhalten, um den Spraytransfer in der Maximalstromphase zu erreichen.

• *Secondary Modulation Parameters*

On the basis of current results in the spray range evaluated, wire feed speed and welding speed have no significant effect on the efficiency of modulation.

Using this greater understanding of the process, significant improvements in weld quality can now be achieved in combination with an increase in the competitiveness of the MIG process, which has the advantage of higher welding speeds and higher deposition rates than those achievable using the TIG process.

• Sekundäre Modulationsparameter

Bei allen durchgeführten Tests hatten Drahtvorschub- und Schweißgeschwindigkeiten keine wesentliche Auswirkung auf die Effizienz der Modulation.

Durch diese Untersuchung wurden Möglichkeiten aufgezeigt, die zu einer deutlichen Qualitätsverbesserung führen und damit das MIG-Schweißen mit seiner höheren Wirtschaftlichkeit dem WIG-Schweißen qualitativ vergleichbar macht.

J.M. Fortain. Air Liquide, CTAS, France
W. Kippes, M. Ortmann. Air Liquide Welding Germany

BIBLIOGRAPHY: / LITERATURHINWEISE:

- [1] Internal Report ALCOA Technical Center 1975 - BINGER, W.N. YANOK and MICHNUK.
- [2] Effect of electromagnetic stirring on weld solidification structure of Aluminium Alloys Trans JWRI Vol 7 (2) 1978.
- [3] US Patent 5.508.493 Method of MAG Welding and welding apparatus DAIHEN.
- [4] US Patent 5.473.139 Method of MAG Welding and welding apparatus TOYOTA. Pulsed Arc Welding and welding apparatus having a consumable electrode wire.

- [5] FR. Patent 9712975 Procédé et dispositif de soudage MIG Spray Modulé. SAF - La soudure Autogène Française.
- [6] JNS5 Novembre 1997 - Amélioration de la compacité en Soudage MIG des alliages d'Aluminium - J.M FORTAIN, Ph.LEFEBVRE, O.MATILE, G.PLOTTIER. SAF - La soudure Autogène Française.



Contact / Kontakte :

Air Liquide Welding France
13, rue d'Épluches
BP 70024 Saint-Ouen l'Aumône
95315 Cergy Pontoise Cedex
Tel. : +33 1 34 21 33 33 - Fax : +33 1 34 21 31 30
Internet: www.oerlikon-welding.com



www.airliquide.com

Founded in 1902, Air Liquide is the world leader in industrial and medical gases and related services. The company has offices in 70 countries and employs a work force of 35,900. Drawing on constantly renewed technologies, Air Liquide develops groundbreaking solutions used in making countless everyday products and in helping to preserve life.

Air Liquide Welding France reserves the right to carry out modifications to its machinery without prior notice.
The manufacturer accepts no liability for illustrations, descriptions and characteristics, which are for information only.

© OERLIKON - W 000 288 883 - 07 11 - J 5000
PLDB 4662 - Photos couverture - Shutterstock