

COMPETENCE

Competence

Welding consumables
for Grade P92 steel for Power
Generation Applications **7**

Welding Consumable
Optimisation for the Welding
of High and Very High Yield
Strength Steels **15**

The Influence of Chemical
Analysis on the Tensile
Strength of Nickel Base Weld
Metal for 9% Nickel Cryogenic
Steel Applications **25**

Schweißzusätze für P92
Stähle für Anwendungen im
Kraftwerksbereich **7**

Optimierung von
Schweißzusätzen für
hochfeste Stähle **15**

Einfluss der chemischen
Zusammensetzung auf die
Zugfestigkeit von Nickel-
Basis-Schweißgütern
bei kaltzähnen Anwendungen
mit 9% Nickel-Stahl **25**



COMPETENCE

Foreword

The decisions that are being made by Air Liquide Welding regarding the choices regarding innovation for the developments to be carried out by its research staff will have an important effect on the welding business in the coming five years.

At the same time, Air Liquide Welding must also maintain the recognised and extensive expertise of the global offer from OERLIKON.

The increasing demand for energy has been identified by Air Liquide Welding as a global trend, not just from those countries with an existing high demand. To take advantage of this situation, there are several areas of development for welding consumables, equipment and processes, but ALW must be selective.

This is why ALW has decided to introduce a new process for managing innovation and the selection and management of projects. We believe this will enable us to address our customers' expectations and requirements more closely and to be more selective in our development choices and more precise in terms of the technical specifications for our research centre.

In high-growth business segments, particularly those relating to energy generation, the areas of development are primarily linked to improving productivity, reducing the weight of welded assemblies and developing innovative welding consumables for assembling new materials.

The developments presented in this fifth issue of our OERLIKON Competence magazine by the employees of the CTAS obviously contribute to the achievement of ALW's objectives and I would like to take this opportunity to thank them for their work.

- The continuation of the building of thermal power plants using coal or oil in all countries, particularly emerging countries, combined with new environmental regulations, has led to the development of welding consumables that are suitable for welding 9%Cr steels of the P92 type, where, in addition to conventional products (solid wire), we have decided to develop cored wire solutions for TIG and SAW in order to be able to adapt very rapidly to any need for change that may be necessary during the operation of these plants.
- Developments of Very High Strength Steels applications are entirely aimed at supporting the strong tendency to reduce the thickness of steel and simultaneously produce high strength, high toughness joints.
- The large and increasing need to store and transport gas in liquid form has led us to develop welding consumables for cryogenic applications, specifically designed for welding the 9% Ni steels that are used to build LNG storage tanks. The experience acquired for the development of 9% Ni consumables also allows us to anticipate future cryogenic applications.

We are convinced that you will appreciate these articles in this new issue of Competence and we hope to be able to tell you more about the new subjects of development selected by our Air Liquide Welding group very soon.

KOMPETENZ

Vorwort

Die richtigen Entscheidungen und das konsequente Umsetzen bei zukunftsweisenden, innovativen Entwicklungsprojekten werden den Erfolg von Air Liquide Welding in den kommenden fünf Jahren wesentlich bestimmen. Parallel zu dieser Grundlagenforschung muss aber auch das umfangreiche Know-how für das bestehende OERLIKON-Programm weiter gepflegt und ausgebaut werden.

Der wachsende Energiebedarf wurde von Air Liquide Welding als weltweiter Trend erkannt – und das nicht nur in Ländern mit bestehender hoher Nachfrage. Um diese Situation zu nutzen wird auf verschiedenen Gebieten entwickelt: Schweißzusätze, Anlagen und Verfahren. Dabei müssen Schwerpunkte gesetzt werden.

Es wurde daher ein neues Verfahren für das Innovationsmanagement sowie die Auswahl und Abwicklung von Projekten eingeführt. Wir sind davon überzeugt, dass wir dadurch die Erwartungen unserer Kunden besser erfüllen können und in der Lage sein werden, die richtigen Entwicklungsprojekte zu bestimmen und unserem Forschungszentrum präzise technische Spezifikationen vorzugeben.

In Geschäftsbereichen mit hohem Wachstum, besonders in der Energiegewinnung, liegen die Entwicklungschancen vor allem in der Verbesserung der Produktivität, der Verringerung des Gewichts geschweißter Teile und in der Entwicklung innovativer Zusätze für das Schweißen neuer Grundwerkstoffe.

Die Entwicklungen von CTAS Mitarbeitern, die in der fünften Ausgabe unserer Zeitschrift "Oerlikon Competence" vorgestellt werden, tragen eindeutig zur Verwirklichung der ALW Ziele bei und ich möchte dem Team an dieser Stelle für seine Arbeit danken.

- Der Bau von Kohle- oder Öl-Wärmekraftwerken auf der ganzen Welt, vor allem in den Schwellenländern und die neuen Umweltrichtlinien führten zur Entwicklung von Schweiß-zusätzen für 9%Cr Stähle wie P92. Hier haben wir uns dafür entschieden, neben den konventionellen Zusätzen (Massivdraht) auch Fülldrahtlösungen für das WIG- und UP-Schweißen zu entwickeln, so dass wir schnell auf eventuelle Änderungen reagieren können, die während des Betriebs dieser Kraftwerke notwendig sein könnten.
- Anwendungen mit hochfesten Stählen im Rahmen der immer weiter fortschreitenden Entwicklung, die Blechdicken zu verringern und gleichzeitig Verbindungen mit hoher Festigkeit und Zähigkeit herzustellen.
- Der hohe und wachsende Bedarf an Lager- und Transportmöglichkeiten für Flüssiggase führte zur Entwicklung von Zusätzen für kaltzähe Anwendungen, insbesondere für das Schweißen von 9% Ni Stählen, die für die Herstellung von Behältern zur Lagerung von flüssigem Erdgas eingesetzt werden. Auf die Erfahrung bei der Entwicklung der 9% Ni Zusätze können wir aufbauen, um Lösungen für weitere kaltzähe Anwendungen zu finden.

Wir wünschen Ihnen eine interessante Lektüre der Beiträge unserer neuen "Competence"-Ausgabe und hoffen, Ihnen bald mehr zu den neuen Entwicklungsthemen bei Air Liquide Welding berichten zu können.

These technical papers were selected for inclusion in OERLIKON Competence by the Editorial Panel, comprising: N. Monier, CTAS - C. de Giorgi, ALW-Expert - B. Schlatter, ALW-Expert - D.S. Taylor, ALW. The editor is G. Roure, ALW

Jean Paul Schmitt
Innovation Manager - Air Liquide Senior Expert Welding

Competence - Issue 5

Introduction

Welcome to the fifth edition of OERLIKON "Competence", the journal of OERLIKON welding technology. In this edition, there are three papers, the first article is the third in a trilogy of papers from AL CTAS which describes the development of welding consumables for 9%Cr, 92 grade creep resistant steel. The second paper describes consumable optimisation for the welding of high and very high yield strength steels. The final paper in this issue concerns the influence of chemical analysis on the tensile strength of nickel base weld metal for 9% nickel cryogenic steel applications.

"Welding Consumables for Grade P92 steel for Power Generation Applications"

In order to increase efficiency in thermal power plants, new martensitic grades of 9%Cr steels have been developed, such as P91 and P92 grades. These steel grades, especially ASTM Grade 92, have high creep resistance with a target maximum service temperature of approximately 610 °C for steam tube and pipe applications. As a consequence the best toughness / creep compromise has to be obtained to guarantee all the requirements. This article summarises the development of a new range of welding consumables for P92 steels which feature an innovative alloying regime utilising 1%Co, which raises the AC1 temperature and results in enhanced weld metal creep and toughness properties. Long term base material, all weld metal and cross weld creep performance evaluations were performed. As a result of this programme, the welding consumable range developed for P92 applications is as follows: SMAW: OERLIKON CROMOCORD 92 - GTAW: OERLIKON CARBOROD WF92 - SAW: OERLIKON OP F500/OE CROMO SF92*. As the steam temperature increases in power plant, it is also necessary to find new materials for casting turbines. In this field of castings materials, various 9-10%Cr variants have been developed and the CB2 grade has shown the best creep results. The initial results obtained for shielded metal arc welding electrodes (SMAW) are presented in this paper. The SMAW electrode developed for these CB2 applications is OERLIKON CROMOCORD CB2.

*flux cored SAW wire

"Welding Consumable Optimisation for the Welding of High and Very High Yield Strength Steels"

The welding of high yield strength steel grades is associated with the risk of hydrogen induced, cold cracking. It is noted that this cracking is no longer limited to the heat-affected zone, as in most steels, but can also occur in the deposited weld metal. The performance of the following OERLIKON products in this respect are discussed for welding of HYSS, the E11018-G SMAW electrode TENACITO 80 and the metal cored wires CITOFLUX M550 for the welding of Superelso 500 steel and CITOFLUX M700 for the welding of Superelso 702 steel. It is then shown that by precise optimisation of the nickel, chromium and molybdenum alloying contents, it is possible to meet simultaneously the minimum tensile strength and impact toughness properties in both the as-welded and stress relieved conditions. Based on these chemical compositions, different types of flux-wire combinations, as well as rutile flux cored and basic flux cored wires have been developed. The mechanical properties of welds deposited with these products are reported and open a discussion about the pertinence of using rutile-cored wires for these steel grades.

Competence - Heft 5

Einleitung

Herzlich willkommen zur fünften Ausgabe von "Competence" dem OERLIKON Fachmagazin für Schweißtechnik. Diese Ausgabe umfasst drei Beiträge. Der erste Beitrag ist der dritte einer 3-teiligen Reihe aus dem AL Forschungszentrum CTAS zur Entwicklung von Zusätzen für warmfeste 9% Cr Stähle des Typs T/P 92. Der zweite Beitrag behandelt die Optimierung von Schweißzusätzen für hochfeste Stähle. Der letzte Beitrag beschreibt den Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf die Zugfestigkeit von Nickel-Basis-Schweißgut für kaltzähe 9% Ni Stähle.

"Schweißzusätze für P92 Stähle für Anwendungen im Kraftwerksbereich"

Um den Wirkungsgrad von Wärmekraftwerken zu erhöhen, wurden neue martensitische Stahlsorten mit 9% Cr entwickelt, die Stähle P91 und P92. Diese Stahlsorten, insbesondere ASTM Typ 92, besitzen eine hohe Zeitstandfestigkeit bei einer angestrebten maximalen Einsatztemperatur um 610°C für Anwendungen an Dampfrohren und -leitungen. Daher muss ein Kompromiss zwischen Zähigkeit und Zeitstandfestigkeit gefunden werden, um alle Anforderungen bestmöglich zu erfüllen. Die vorliegende Arbeit fasst die Entwicklung der Schweißzusätze für P92 Stähle zusammen. Sie verfügen über eine neue Legierungs-zusammensetzung mit 1%Co, die zu einer Erhöhung der AC1-Temperatur führt und damit Zeitstandfestigkeit und Zähigkeit verbessert. Es wurden Langzeittests beim Grundwerkstoff, sowie Zeitstandversuche am reinen Schweißgut und an Schweißverbindungen durchgeführt. Diese Untersuchungen führten zu folgendem Schweißzusatz-Programm für P92-Anwendungen: E-HAND: OERLIKON CROMOCORD 92 - WIG: OERLIKON CARBOROD WF92 -UP: OERLIKON OP F500/OE CROMO SF92*. Da die Kraftwerke bei immer höheren Dampftemperaturen betrieben werden, müssen auch geeignete neue Werkstoffe für gegossene Turbinen gefunden werden. Bei den Gusswerkstoffen wurden verschiedene Varianten mit 9-10%Cr entwickelt, wobei der CB2-Typ die besten Ergebnisse zeigte. Die ersten Ergebnisse für das Schweißen mit Stabelektroden werden in dieser Arbeit vorgestellt. Die Stabelektrode für CB2-Anwendungen heißt: OERLIKON CROMOCORD CB2.

*UP-Fülldraht

"Optimierung von Schweißzusätzen für hochfeste Stähle"

Das Schweißen hochfester Stahlsorten ist immer mit dem Risiko Wasserstoff induzierter Kaltrisse verbunden. Die Rissgefahr ist nicht mehr nur auf die WEZ begrenzt, wie dies bisher bei den meisten Stahlsorten der Fall war, sondern ist auch im Schweißgut vorhanden. Hier werden Eigenschaften der folgenden OERLIKON Produkte beim Schweißen hochfester Stähle betrachtet: E11018-G Stabelektrode TEANCITO 80 und Fülldraht CITOFLUX M550 für das Schweißen des Stahls Superelso 500 sowie Fülldraht CITOFLUX M700 für Superelso 702. Anschließend wird dargestellt, dass nur durch eine präzise Abstimmung der Legierungselemente Nickel, Chrom und Molybdän die Mindestanforderungen an die Festigkeit und an die Kerbschlagzähigkeit erreicht werden können – sowohl im Schweißzustand als auch spannungsarmgeglüht. Verschiedene Draht-/Pulverkombinationen sowie rutile und basische Fülldrähte mit entsprechender chemischer Zusammensetzung wurden entwickelt. Die mechanischen Eigenschaften der mit diesen Schweißzusätzen hergestellten Schweißgüter werden diskutiert und dienen als Grundlage für die Entscheidung, ob auch rutile Fülldrähte für solche Stahlsorten geeignet sind.

“The Influence of Chemical Analysis on the Tensile Strength of Nickel Base Weld Metal for 9% Nickel Cryogenic Steel Applications”

9% nickel cryogenic steels are used for the manufacture of tanks to store liquid natural gas (LNG) at -163 °C and are usually welded with ErNiCrMo 3, 4 or 6 nickel base filler materials because high levels of cryogenic toughness are difficult to achieve with ferritic filler materials. The correct choice of welding consumable is driven by the tensile strength properties of 9% nickel steels which, according to ASTM, exhibit a minimum level of 690 MPa which corresponds to the highest range of tensile strength for nickel base alloys. This usually results in a discrepancy between the requirements of welding specifications and the mechanical properties of filler materials. This study investigated the different chemical routes leading to higher ultimate tensile strength of the weld metal produced with ErNiCrMo6 consumables in order to reliably attain the strength level of 690 MPa which is typically required. It was demonstrated that substitutional atoms exhibit a negligible effect on mechanical properties. Through an adjustment of the chemical analysis of an ErNiCrMo6 SMAW electrode it is possible to induce a sufficient level of precipitation to strengthen the weld metal without detrimentally affecting weld metal toughness. OERLIKON FREEZAL ENi9 SMAW electrode has been successfully developed using the principles identified in this study and is commercially available to customers.

Those readers of OERLIKON COMPETENCE who have previously registered will continue to receive future editions by post automatically. Otherwise, please complete the enclosed reply card to register for future editions, or visit www.oerlikon-welding.com and register on line.

Thank you,
David Taylor - Market Application Manager - Air Liquide Welding

“Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf die Zugfestigkeit von Nickel-Basis-Schweißgütern bei kaltzähen Anwendungen mit 9% Nickel-Stahl”

Kaltzähe Stähle mit 9% Nickel werden für die Herstellung von Behältern zur Lagerung von flüssigem Erdgas bei -163°C eingesetzt (LNG) und meist mit Nickel-Schweißzusätzen des Typs ErNiCrMo 3, 4 oder 6 verschweißt, da eine hohe Zähigkeit bei sehr tiefen Temperaturen mit ferritischen Zusätzen schwer zu erreichen ist. Die richtige Auswahl des Zusatzwerkstoffes wird von der Zugfestigkeit der 9%-Nickel Stähle bestimmt, die nach ASTM ein Mindestniveau von 690 MPa haben. Dies entspricht dem maximalen Zugfestigkeitsbereich bei Nickel-Basislegierungen und bedeutet häufig eine Diskrepanz zwischen den Spezifikationsanforderungen und den erreichbaren mechanischen Gütewerten der Schweißzusätze. Die Untersuchung beschreibt die verschiedenen Möglichkeiten über die chemische Zusammensetzung, die Zugfestigkeit von Schweißgütern, die mit ErNiCrMo 6 hergestellt wurden, zu erhöhen, um eine Zugfestigkeit von 690 MPa sicher zu erreichen. Es wurde gezeigt, dass der Austausch von Atomen einen zu vernachlässigenden Effekt auf die mechanischen Eigenschaften hat. Durch die Anpassung der chemischen Zusammensetzung der ErNiCrMo6 Stabelektrode ist es möglich, ein ausreichendes Maß an Ausscheidungen zu erzielen, um das Metall zu festigen, ohne die Zähigkeit negativ zu beeinflussen. Ausgehend von dieser Untersuchung wurde die OERLIKON Stabelektrode Freezal ENi 9 entwickelt, die Kunden im Handel beziehen können.

Die Leser, die OERLIKON COMPETENCE bereits abonniert haben, erhalten die zukünftigen Ausgaben weiterhin automatisch per Post. Wenn Sie noch kein Abonnent sind, füllen Sie bitte anliegende Antwortkarte aus oder melden Sie sich unter www.oerlikon-welding.com für die kommenden Ausgaben an.

Vielen Dank,
David Taylor - Market Application Manager - Air Liquide Welding

Welding consumables for Grade P92 steel for Power Generation Applications.

In order to increase efficiency in thermal power plants, new martensitic grades of 9%Cr steels have been developed in the 90's, such as P91 and P92 grades. They are now being used for steam tubes and pipes in power plant with advanced steam parameters. These grades, especially ASTM Grade 92, have high creep resistance with a target of a maximum service temperature around 610 °C. Even though these steels are used at high temperature, where toughness is not a matter of concern, it is important that the welded joints show a good toughness at room temperature, for fabrication and construction steps and for start up / shut down considerations. As a consequence the best toughness / creep compromise has to be obtained to guarantee all the requirements. The present work aims to summarise the philosophy of development of welding consumables for P92 steels by Air Liquide Welding. An optimised chemical composition, which features a promising toughness / creep compromise, has been obtained. More detailed considerations about this chemistry optimisation, done with the SAW process, were presented in the journal "Competence" N°3 and 4 [1, 2]. Welded joints were then produced using the gas tungsten arc (GTAW), shielded metal arc (SMAW) and submerged arc (SAW) processes. Short term creep resistance of all weld metal specimens was measured to be within the base material acceptance criteria. Long term base material, all weld metal and cross weld creep performance evaluations have been performed.

As the steam temperature increases in the power plant, it is also necessary to find new materials for casting turbines. In this field of castings materials, various 9-10%Cr variants have been developed and

Schweißzusätze für P92 Stähle für Anwendungen im Kraftwerksbereich.

Um den Wirkungsgrad von Wärmekraftwerken zu erhöhen, wurden in den 90er Jahren neue martensitische Stahltypen mit 9% Cr entwickelt, die Stähle P91 und P92. Sie werden für Dampfrohren und -leitungen in Kraftwerken mit hoch entwickelten Dampfparametern eingesetzt. Diese Stahltypen, insbesondere der ASTM Grade 92, besitzen eine hohe Zeitstandfestigkeit bei einer angestrebten maximalen Einsatztemperatur um 610 °C. Auch wenn diese Stähle bei hohen Temperaturen eingesetzt werden, bei denen die Zähigkeit kein Problem darstellt, ist es wichtig, dass die Schweißnähte eine gute Zähigkeit bei Raumtemperatur aufweisen und zwar im Hinblick auf Herstellungs- und Konstruktionsphasen sowie auf Anlauf- / Abschaltphasen. Daher muss ein Kompromiss zwischen Zähigkeit und Zeitstandfestigkeit gefunden werden, um alle Anforderungen bestmöglich zu erfüllen. Die vorliegende Arbeit fasst die Philosophie von Air Liquide Welding bei der Entwicklung der Schweißzusätze für P92 Stähle zusammen. Eine optimierte chemische Zusammensetzung mit einem viel versprechenden Kompromiss zwischen Zähigkeit und Zeitstandfestigkeit wurde erzielt. Einzelheiten zur Optimierung der chemischen Zusammensetzung auf der Basis des UP-Schweißgutes wurden in den Heften Nr. 3 und Nr. 4 von „Competence“ [1, 2] vorgestellt. Danach wurden die Schweißverbindungen mit den Verfahren WIG (GTAW), Elektrodenhandschweißen (SMAW) und UP (SAW) hergestellt. Die Zeitstandfestigkeit bei kurzen Laufzeiten wurde an Proben aus reinem Schweißgut gemessen, um sicherzustellen, dass die Gewährleistungswerte des Grundwerkstoffes erreicht werden. Außerdem wurden Langzeittests beim Grundwerkstoff, sowie Zeitstandfestigkeitstests am reinen Schweißgut und an Schweißverbindungen durchgeführt.

Da die Kraftwerke immer höhere Dampftemperaturen nutzen, müssen auch geeignete neue Werkstoffe für gegossene Turbinen gefunden werden. Bei den Gusswerkstoffen wurden verschiedene Varianten mit 9-10%Cr entwickelt und über mehrere Jahre hinweg im Rahmen des

tested for many years within the European COST programme, which is an European cooperation in the field of scientific and technical research. Air Liquide Welding has been active in this programme for many years. Currently, the programme is COST 536 and concerns Alloy development for Critical Components of Environmentally Friendly Power plant (ACCEPT). Among the materials tested, the CB2 grade shows the best creep results and is now likely to be used in real service conditions. The first results obtained for shielded metal arc welding (SMAW) products are presented in this paper.

The present paper summarises the results obtained with P92 SAW consumables in a first part. The second part is dedicated to the adaptation of chemical analysis obtained on P92 with the SAW process to the other SMAW and GTAW processes. The final section discusses the development of new materials for castings and perhaps forgings required to improve the efficiency of thermal power plants.

This paper is the last of a trilogy in the OERLIKON journal "Competence" dedicated to the development history of the 92 steel grade welding consumables. It closes with some indications for a promising future for the 9-10%Cr steels with the CB2 grade. These results were first presented at the IIW Annual assembly in July 2008 and at the conference on New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels in May 2008.

P92 WELDING CONSUMABLES DEVELOPMENT

P92 SAW filler metal

The target when developing the Grade 92 welding consumable range was to guarantee at least the base material properties (ASTM A-335): $R_m \geq 620 \text{ MPa}$, $R_{p0.2} \geq 440 \text{ MPa}$ and $A \geq 20\%$. The targeted creep properties are in the scatter band of the base material. Moreover, the boiler code requires toughness V-notch values of 35 J/cm^2 at room temperature. Generally speaking, elements which increase creep resistance are detrimental for toughness in weld metal: the challenge is then to achieve the best toughness/creep compromise, while fulfilling these specifications.

A good starting point is to design the weld metal with a chemical analysis within the chemical range of the 92 grade, which is expected to lead to similar creep properties to the base material. Fine tuning of alloying additions to the welding consumables results in weld metal with the necessary creep enhancing elements. Working with flux cored wires is an efficient route for stepwise formulation to be performed more efficiently to develop optimised consumables which have to fulfil competing weldment properties, simultaneously.

COST-Programms (europ. Kooperation in wissenschaftlicher und technischer Forschung) getestet. Zurzeit wird im Rahmen von COST 536 an der Entwicklung von Legierungen für kritische Komponenten umweltfreundlicher Kraftwerke gearbeitet (ACCEPT). Von den getesteten Werkstoffen zeigt der Typ CB2 die besten Zeitstandeigenschaften und wird jetzt wohl unter realen Betriebsbedingungen eingesetzt. Die ersten Ergebnisse für das Schweißen mit Stabelektroden werden in dieser Arbeit vorgestellt.

Der erste Teil der vorliegenden Arbeit beschreibt die Ergebnisse, die mit P92 UP-Schweißzusätzen erzielt wurden. Im zweiten Teil geht es um die Anpassung der für das P92 UP-Verfahren entwickelten chemischen Zusammensetzung an die WIG- und Lichtbogenhandschweißverfahren. Der letzte Abschnitt schließlich beschäftigt sich mit der Entwicklung von neuen Werkstoffen für Guss- und Schmiedeteile, die zur Erhöhung des Wirkungsgrades von Kraftwerken erforderlich sind.

Diese Arbeit ist der letzte Teil einer dreiteiligen Reihe der OERLIKON "Competence", die sich mit der Geschichte der Schweißzusatzwerkstoffe für Stähle des Typs 92 beschäftigte. Sie schließt mit einigen Hinweisen auf eine viel versprechende Zukunft für die Stahltypen mit 9-10% Cr des Typs CB2. Die folgenden Ergebnisse wurden zum ersten Mal bei der IIW Jahreshauptversammlung im Juli 2008 vorgestellt, sowie bei der Konferenz „Neue Entwicklungen in der Metallurgie und der Anwendung von hochfesten Stählen“ im Mai 2008 (New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels).

ENTWICKLUNG VON P92 SCHWEIßZUSÄTZEN

P92 Schweißzusatz für das UP-Schweißen

Bei der Entwicklung von Schweißzusätzen für Stähle des Typs 92 war es das Ziel, mindestens die Eigenschaften des Grundwerkstoffes zu garantieren (ASTM A-335): $R_m \geq 620 \text{ MPa}$, $R_{p0.2} \geq 440 \text{ MPa}$ und $A \geq 20\%$. Die angestrebte Zeitstandfestigkeit sollte innerhalb des Streubandes des Grundwerkstoffes liegen. Außerdem verlangen die Vorschriften für Behälter eine Charpy-V-Zähigkeit von 35 J/cm^2 bei Raumtemperatur. Allgemein kann man sagen, dass Elemente, die die Zeitstandfestigkeit erhöhen, sich negativ auf die Zähigkeit im Schweißgut auswirken. Die Herausforderung besteht also darin, den besten Kompromiss zwischen Zähigkeit und Zeitstandfestigkeit zu finden und dabei die oben genannten Anforderungen zu erfüllen.

Ein guter Ansatzpunkt ergibt sich, wenn das Schweißgut so aufgebaut wird, dass die chemische Zusammensetzung innerhalb der chemischen Analyse der Grade-92-Stähle liegt, da ähnliche Zeitstandeigenschaften wie beim Grundwerkstoff erwartet werden können. Die Zugabe kleinster Mengen an Legierungselementen über den Zusatzwerkstoff ermöglicht eine Schweißgutanalyse mit allen Elementen, die zu einer Verbesserung der Zeitstandeigenschaften führen. Dabei zeigt sich die Bedeutung der Fülldrähte, denn sie erlauben eine effizientere, schrittweise Anpassung der Formel zur Optimierung der Zusatzwerkstoffe, gerade wenn die Elemente gegensätzliche Eigenschaften in der Schweißnaht bewirken.

The investigations on the influence of the different alloying elements (C, Cr, B, N, W, Ti, O) have been already presented in previous "Competence" editions, numbers 3 and 4. We have seen that they could have strong effects on micro-structure (formation or not of delta ferrite) and of course mechanical properties.

To avoid the formation of a delta-ferrite net which will be detrimental to toughness and creep resistance, austenite forming elements have to be present in the 92 chemistry. Co and Ni being fit for purpose, variations of these elements in the weld metal deposit have been studied. Despite the fact that the base metal contains a small amount of Ni, ALW has chosen to develop products based on the addition of Co instead of Ni.

A positive effect of Co alloying on toughness has indeed been reported [3]. Moreover Co does not significantly affect AC1 temperature, unlike Ni. Consequently it gives greater safety during PWHT, avoiding partial re-austenitisation if PWHT is performed at too high a temperature. This property can also be used to raise PWHT temperature to improve toughness, providing that the temperature range is narrow enough not to exceed the AC1 temperature.

Tables 1 and 2 show typical results obtained on all-weld metal deposits using the OE-Cromo SF92/OPF500 combination. All-weld metal samples have been generated using a 3.2 mm diameter wire, with the following welding parameters: 530 A, 29 V, 60 cm/min, heat input 15.4 kJ/cm using a , a pre-heating temperature of 250 °C and an interpass temperature of 250 °C. A Post Weld Heat Treatment 760 °C/4h with a heating and cooling rate of 50 °C/h has been used.

Isostress (85 MPa) creep rupture tests on all weld metal for various chemical compositions have confirmed that replacing 0.5%Ni by 1%Co was beneficial for creep resistance [1] (Figure 1).

ALW consumables for P92 grade have then been used for assembling the main steam piping of the supercritical power plant in Avedore (Denmark). Long term creep rupture

Table 1: Chemical composition of all weld metal of OE-Cromo SF92 / OPF500 combination with corresponding specification of T/P 92

Elements Elemente		BM P92		OE-Cromo SF92/OPF500 typical OE-Cromo SF92/OPF500 typische Werte
C	%	0.07	0.13	0.10
Mn	%	0.3	0.6	1.2
Si	%	-	0.5	0.2
Cr	%	8.5	9.5	8.5
Mo	%	0.3	0.6	0.42
V	%	0.15	0.25	0.21
Nb	%	0.04	0.09	0.045
W	%	1.5	2.0	1.5
Co	%	-	-	1.0
Ni	%	-	0.4	0.02
B	ppm	10	60	10
N	ppm	300	700	420

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffes T/P 92 und des reinen Schweißgutes, hergestellt mit der Draht-/Pulverkombination OE Cromo SF92/OPF 500

Table 2: All weld metal characterisation results using OE-Cromo SF92/OPF500 combination

Kv +20 °C (J/cm ²)	Rm (MPa)	Rp0.2 (MPa)	A (%)	Ac1 (°C)
140	730	588	22	802

Tabelle 2: Eigenschaften des reinen Schweißgutes, hergestellt mit OE-Cromo SF92/OPF500

Fig. 1: Influence of Cobalt and Nickel content on isostress (85MPa) creep resistance in SAW P92, values of base metal are from Nippon Steel Data Package [4]

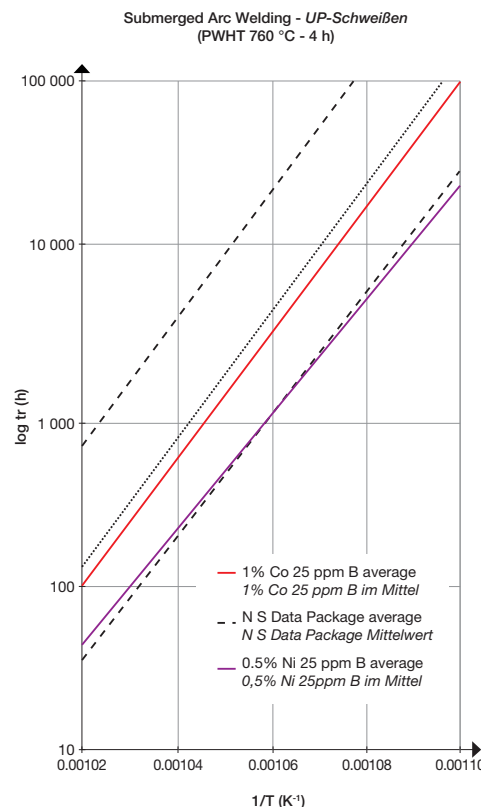


Bild 1: Einfluss von Kobalt und Nickel auf die Zeitstandfestigkeit (85MPa) beim UP-Schweißen von P92, Werte der Grundwerkstoffe aus: Nippon Steel Data Package [4]

Der Einfluss der verschiedenen Legierungselemente (C, Cr, B, N, W, Ti, O) wurde bereits in den Ausgaben Nr. 3 und 4 von „Competence“ beschrieben. Wir haben festgestellt, dass sie starke Auswirkungen auf das Mikrogefüge (Bildung von Delta-Ferrit) und damit auch auf die mechanischen Güterwerte haben können.

Um die Bildung eines Delta-Ferrit-Netztes mit negativen Auswirkungen auf Zähigkeit und Zeitstandfestigkeit zu vermeiden, muss die chemische Analyse der Schweißzusätze für P 92 Austenitbildner enthalten. Dafür eignen sich Co und Ni, die in unterschiedlicher Größenordnung im Schweißgut untersucht wurden. Obwohl der Grundwerkstoff einen geringen Anteil an Ni enthält, hat ALW entschieden, Zusätze mit Co- statt Ni-Zulegerungen zu entwickeln, da bei Co ebenfalls ein positiver Effekt auf die Zähigkeit festgestellt wurde [3]. Außerdem beeinflusst Co die AC1 Temperatur im Gegensatz zu Ni nur unwesentlich. Dadurch macht es die Wärmenachbehandlung sicherer und vermeidet eine teilweise Re-Austenitisierung, wenn die PWHT-Temperatur zu hoch ist. Diese Eigenschaft kann auch genutzt werden, um die PWHT-Temperatur zur Verbesserung der Zähigkeit zu erhöhen, vorausgesetzt die Temperaturspanne ist eng genug, so dass die AC1 Temperatur nicht überschritten wird.

Die Tabellen 1 und 2 zeigen typische Ergebnisse, die an reinem Schweißgut der Draht-/Pulverkombination OE-Cromo SF92/OPF500 erzielt wurden. Proben des reinen Schweißgutes wurden mit einem Draht Ø3.2mm und den folgenden Schweißparametern hergestellt: 530A, 29V, 60cm/min, Wärmeeintrag 15.4kJ/cm einer Vorwärmtemperatur von 250 °C und einer Zwischenlagentemperatur von 250 °C. Wärmenachbehandlung bei 760 °C/4h mit einer Aufwärm- und Abkühlzeit von 50 °C/h.

Zeitstandsversuche (85MPa) an reinen Schweißgütern mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung haben bestätigt, dass sich der Ersatz von 0,5%Ni durch 1%Co positiv auf die Zeitstandfestigkeit auswirkt [1] (Bild 1).

Die ALW P92-Zusätze wurden dann beim Bau der Hauptdampfleitung des superkritischen Kraftwerks in Avedore (Dänemark) eingesetzt. Zeitstandsversuche an UP-Zusätzen (bis zu 30000h) bei 600 °C wurden durchgeführt.

tests on SAW products (up to 30000 hrs) at 600 °C have been performed. The results are presented in Figure 2, which shows that weld metal creep rupture points are at the same level as the base material.

P92 SMAW filler metal

In order to get a homogeneous welding solution for 92 grade and due to good results obtained with the SAW combination, ALW has decided to develop a SMAW range containing 1% of Co instead of 0.5% of Ni. Tables 3 and 4 present chemical analyses and mechanical properties of two all weld metal deposits performed using SMAW electrodes in diameter 4.0 mm for these two alloying regimes. Preheating temperature of 250 °C and interpass temperature of 250 °C were applied. The two samples were Post Weld Heat Treated at 760 °C for 4 hours, with a heating and cooling rate of 50 °C/h. Heat input ranged between 11 and 12 kJ/cm.

As for the SAW process, we observed an improvement in toughness with the presence of Co and an increase in the transformation temperature of the weld metal (see Table 4), which safely allows performing PWHT at 760 °C.

Isostress (85 MPa) creep rupture tests on all weld metal with various chemical compositions have also confirmed that replacing 0.5%Ni by 1%Co was beneficial for creep resistance (Figure 3).

In light of these results, the all weld metal analysis of all SMAW electrode diameters has been finally designed with the same alloying philosophy as the SAW weld metal. All weld metal characterisations were prepared on buttered test plates using 2.5, 3.2 and 4.0 mm electrodes, according to AWS A5.5. They were performed with the following welding parameters:

- Ø 2.5 mm: 95 Amps, 21 V, heat input 6 kJ/cm,
- Ø 3.2 mm: 120 Amps, 23 V, heat input 8 kJ/cm,
- Ø 4.0 mm: 160 Amps, 23 V, heat input 11 kJ/cm,

Preheating temperature was 250 °C; interpass temperature of 250 °C. All samples were post weld heat treated at 760 °C for 4 hours, with a heating and cooling rate of 50 °C/h.

Fig. 2: Creep rupture characterisation of P92 consumables used in Avedore power plant

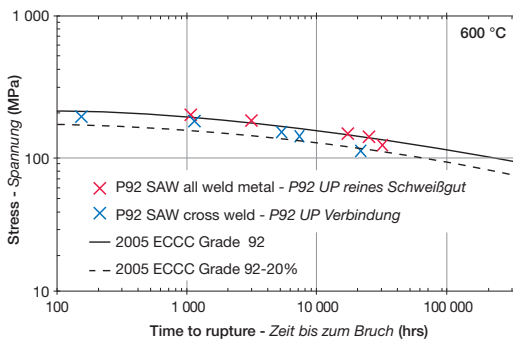


Bild 2: Zeitstandeigenschaften von P92-Zusätzen, die im Kraftwerk Avedore eingesetzt wurden

Table 3: All weld metal characterisation results using Ni or Co version of P92 SMAW electrodes in diameter 4.0 mm

Elements - Elemente	P92 - 0.5% Ni	P92 - 1% NiCo
	%	%
C	0.10	0.10
Si	0.17	0.18
Mn	1.12	1.09
P	0.009	0.009
S	0.009	0.010
Cr	8.6	8.7
Mo	0.53	0.52
Ni	0.47	0.06
Co	0.01	0.96
Nb	0.052	0.049
V	0.23	0.25
W	1.76	1.66
B	0.0040	0.0030
N	0.042	0.040

Table 3: Analyse des reinen Schweißgutes mit dem Ni- oder Co-Typ der P92 Stabelektrode mit Durchmesser 4.0mm

Table 4: All weld metal characterisation results using 0.5% Ni or 1% Co alloyed P92 SMAW electrodes

	Kv +20 °C (J/cm²)	Kv 0 °C (J/cm²)	Rm (MPa)	Rp 0.2 (MPa)	A (%)	Ac1 (°C)
P92 - 0.5%Ni	79	54	747	600	19	795
P92 - 1% Co	96	73	729	571	19	822

Table 4: Analyse des reinen Schweißgutes mit P92 Stabelektroden mit Zulegierung von 0,5% Ni bzw. 1% Co

Fig. 3: Influence of Cobalt and Nickel content on isostress (85 MPa) creep resistance in SMAW P92, values of base metal are from Nippon Steel Data Package [4]

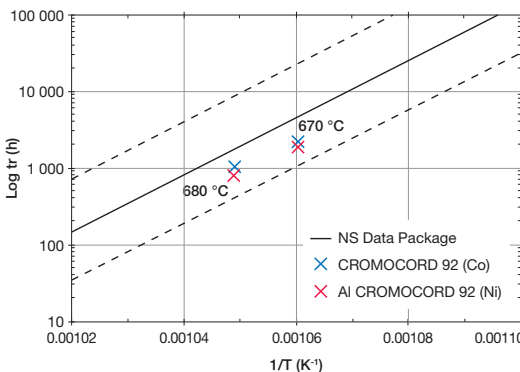


Bild 3: Einfluss des Kobalt- und Nickelgehaltes auf die Zeitstandfestigkeit (85MPa) bei SMAW von P92, Werte des Grundwerkstoffs aus: Nippon Steel Data Package [4]

Die Ergebnisse sind in Bild 2 zusammengefasst, das zeigt, dass die Zeitstandwerte auf dem gleichen Niveau wie beim Grundwerkstoff liegen.

P92 Schweißzusatz für das Lichtbogenhandschweißen (SMAW)

Um eine einheitliche Lösung für den P 92 Stahl zu haben und aufgrund der guten Ergebnisse mit der UP-Kombination, entschloss sich ALW, Stabelektroden für das E-Hand-Schweißen mit 1% Co statt 0.5% Ni zu entwickeln. Die Tabellen 3 und 4 zeigen die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Güterwerte zweier reiner Schweißgüter, die mit Stabelektroden Ø 4,0mm dieser beiden Legierungstypen hergestellt wurden. Vorwärmtemperatur 250 °C und Zwischenlagentemperatur 250 °C. Die beiden Proben wurden bei 760 °C für 4 Stunden mit einer Aufwärm- und Abkühlzeit von 50 °C/h nachbehandelt. Der Wärmeeintrag lag zwischen 11 und 12kJ/cm.

Beim UP Verfahren wurde mit Co eine Verbesserung der Zähigkeit beobachtet sowie eine Erhöhung der Umwandlungstemperatur des Schweißgutes (siehe Tabelle 4), was eine sichere Wärmenachbehandlung PWHT bei 760 °C erlaubt.

Zeitstandversuche (85MPa) an allen reinen Schweißgütern unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung haben ebenfalls bestätigt, dass sich die Zulegierung von 1%Co statt 0,5% Ni günstig auf die Zeitstandfestigkeit auswirkt (Bild 3).

Angesichts dieser Ergebnisse wurde die Analyse des reinen Schweißgutes aller Stabelektroden durchmesser nach derselben Legierungsphilosophie wie beim UP-Schweißgut hergestellt. Alle Schweißgutwerte wurden gemäß AWS A5.5 an gepufferten Testblechen mit Stabelektroden in den Durchmessern 2,5 / 3,2 und 4,0mm ermittelt. Folgende Schweißparameter wurden verwendet:

- Ø 2,5mm: 95A, 21V, Wärmeeintrag 6kJ/cm,
- Ø 3,2mm: 120A, 23V, Wärmeeintrag 8kJ/cm,
- Ø 4,0mm: 160A, 23V, Wärmeeintrag 11kJ/cm,

Vorwärmtemperatur: 250 °C; Zwischenlagentemperatur: 250 °C. Alle Proben wurden bei 760 °C für 4 Stunden nachbehandelt, bei einer Aufwärm- und Abkühlzeit von 50 °C/h.

Table 5 and 6 gather typical chemical analysis and mechanical properties of the all weld metal deposits. The toughness level is well above requirements.

P92 results on welded joints

Complementary joint characterisation of ALW consumables welded on P92 grade tubes was run in collaboration with Tenaris, tubular products manufacturer and Centro Sviluppo Materiali (Italy). The base materials were ASTM A213 T92 ODxWT 44.5 x 7.1 mm and 76 x 12.5 mm tubes, supplied by Tenaris. The smaller tube was TIG welded with the CARBOROD WF 92. The larger tube was welded with CARBOROD WF 92 and OE-CROMOCORD 92 SMAW electrodes. These results were first published in a common paper [5].

Joints were performed in the PF (5G1T) position (pipe with fixed horizontal axis), with an interpass temperature of 250 °C. A PWHT at 760 °C for 4 hours was then carried out with a heating and cooling rate of 50 °C/h. Heat input was in the 7 to 13 kJ/cm range for the SMAW process, and 26 to 45 kJ/cm for the GTAW process, the latter due to a low welding speed, particularly for the root pass. The requirement for UTS of the weld metal was slightly above the base material to ensure overmatching of the joint.

All joints successfully passed X-ray radiography controls. An evaluation of mechanical properties at room temperature (tensile tests, hardness and toughness) was carried out. Results are shown in Tables 7 and 8. Mechanical properties in weld metal and HAZ obtained after PWHT with SMAW or GTAW process fulfill the minimum requirements.

P92 Conclusions

As a result of a study of the effect of chemical elements on the creep / toughness compromise, an optimised chemical composition for all weld metal was obtained. Based on this chemical composition, Air Liquide Welding developed a full range of welding consumables dedicated to Grade 92 steels. Alloying with 1%Co is used, for enhanced creep, toughness properties and to raise the AC1 temperature.

All weld metal tests and tube joints characterisation were carried out, which demonstrated that satisfactory results are obtained according to relevant standards.

Table 5: Typical chemical composition of all weld metal for the different diameters of OE-CROMOCORD 92

Elements Elemente		BM P92		OE-CROMOCORD 92 typical OE-CROMOCORD 92 typisch
C	%	0.07	0.13	0.10
Mn	%	0.3	0.6	1.1
Si	%	-	0.5	0.2
Cr	%	8.5	9.5	8.7
Mo	%	0.3	0.6	0.49
V	%	0.15	0.25	0.22
Nb	%	0.04	0.09	0.040
W	%	1.5	2.0	1.7
Co	%	-	-	1.0
Ni	%	-	0.4	0.06
B	ppm	10	60	32
N	ppm	300	700	380

Tabelle 5: Typische chemische Zusammensetzung des reinen Schweißgutes von OE-CROMOCORD 92

Table 6: All weld metal characterisation results using the different diameters of OE-CROMOCORD 92

OE-CROMOCORD 92	Kv +20 °C (J/cm ²)	Rm (MPa)	Rp0.2 (MPa)	A (%)
Ø 2.5 mm	110	676	510	20
Ø 3.2 mm	93	741	587	21
Ø 4.0 mm	96	729	571	19

Tabelle 6: Mechanische Eigenschaften des reinen Schweißguts von OE-CROMOCORD 92 geschweißt mit verschiedenen Durchmesser

Table 7: Mechanical properties measured on T92 ODxWT 4.5 x 7.1 mm tube

Test	Zone	Results Ergebnis	Acceptance criteria Abnahmekriterien
Tensile at RT (MPa) Zugfestigkeit bei RT (MPa)	CW	-	UTS>660
Kv at RT (J/cm ²) Kv bei RT (J/cm ²)	WM	100	>35 at RT
	FL+1 mm	195	
	BM	165	
Hv10 max	WM	245	n/a
	HAZ	259	
	BM	244	Max 265 Hv

Tabelle 7: Mechanische Gütewerte gemessen am Rohr T92 ODxWT 44.5 x 7.1mm

Table 8: Mechanical properties measured on T92 ODxWT 76 x 12.5 mm tube

Test	Zone	Results Ergebnis	Acceptance criteria Abnahmekriterien
Tensile at RT (MPa) Zugfestigkeit bei RT (MPa)	CW	UTS 740	UTS>660
Kv at RT (J/cm ²) Kv bei RT (J/cm ²)	WM	41	>35 at RT
	FL+1 mm	149	
	BM	197	
Hv10 max	WM	252	n/a
	HAZ	260	
	BM	242	Max 265 Hv

Tabelle 8: Mechanische Gütewerte gemessen am Rohr T92 ODxWT 76 x 12.5mm

Die Tabellen 5 und 6 fassen die typische chemische Zusammensetzung und mechanischen Gütewerte des reinen Schweißgutes zusammen. Das Zähigkeitsniveau liegt deutlich über den Anforderungen.

P92 Ergebnisse an Verbindungsschweißungen

Ergänzende Versuche von Schweißverbindungen mit P92 Rohren und ALW Zusatzwerkstoffen wurden in Zusammenarbeit mit dem Rohrerhersteller Tenaris und der Materialentwicklungsanstalt in Italien (Centro Sviluppo Materiali) durchgeführt. Als Grundwerkstoffe wurden verwendet: ASTM A213 T92 ODxWT 44.5 x 7.1mm sowie 76 x 12.5mm Rohre, die von Tenaris geliefert wurden. Das kleinere Rohr wurde im WIG-Verfahren mit Carborod WF 92 geschweißt, das größere Rohr mit Carborod WF 92 und OE-Cromocord 92 Stabelektroden. Die Ergebnisse wurden zunächst in einem gemeinsamen Artikel veröffentlicht [5].

Die Schweißverbindungen wurden in Position PF (5G1T) (Rohr mit fester horizontaler Achse) und einer Zwischenlagentemperatur von 250 °C ausgeführt. Die Wärmenachbehandlung erfolgte dann bei 760 °C über 4h bei einer Aufwärm- und Abkühlzeit von 50 °C/h. Der Wärmeeintrag lag beim SMAW-Verfahren zwischen 7 bis 13kJ/cm und beim GTAW Verfahren zwischen 26 bis 45kJ/cm. Letzteres ist auf die niedrige Schweißgeschwindigkeit vor allem in der Wurzellage zurückzuführen. Die Anforderungen an die Zugfestigkeit des Schweißgutes lagen leicht oberhalb der gewährleisteten Werte des Grundwerkstoffes, um sicherzustellen, dass ein „Overmatching“ in der Verbindung erreicht wird.

Alle Schweißverbindungen durchliefen die Röntgenuntersuchung erfolgreich. Die Ergebnisse der Analyse der mechanischen Gütewerte bei Raumtemperatur (Zugfestigkeit, Härte und Zähigkeit) sind in den Tabellen 7 und 8 dargestellt. Die mechanischen Gütewerte

im Schweißgut und in der WEZ beim SMAW oder GTAW Verfahren erfüllen nach Wärmebehandlung die Mindestanforderungen.

P92 Schlussfolgerungen

Die Studie führte zu einer optimierten chemischen Zusammensetzung des reinen Schweißgutes, die den besten Kompromiss zwischen Zeitstandfestigkeit und Zähigkeit darstellt. Ausgehend von dieser chemischen Zusammensetzung hat Air Liquide Welding ein vollständiges Schweißzusatzwerkstoffprogramm für Stähle des Typs 92 entwickelt. Eine Zulegierung von 1% Co dient der Verbesserung der

Air Liquide Welding consumables dedicated to T/P92 steel are SMAW electrodes OE-CROMOCORD 92, TIG rods CARBOROD WF92 and a cored wire/flux combination for SAW OE-CROMO SF92/OP F500.

CB2 FOR CASTING TURBINES

The class of the 9-12% Cr steels offers the highest potential to meet the required property level (creep and oxidation resistance) for critical components located in the high temperature zone. As the steam temperature increases in the power plant, it is also necessary to find new materials for casting turbines. In that case, various 9-10%Cr variants have been developed and tested since many years within the COST program. Among the materials tested, the CB2 grade shows the best creep results and is now likely to be used in real service conditions. This grade contains 9 to 10% Cr, as well as Mo, Co, B and N (see Table 9). This kind of alloy is also studied to perform forging pipes in order to replace potentially in the future the grade 92 if the creep properties are improved sufficiently to compensate for a slightly higher price.

In order to take full advantage of the properties of this steel, it is necessary to have welding consumables leading to a creep resistance in the weld metal similar to that of the base metal. Even though this steel is used at high temperatures, in conditions where toughness is not a matter of concern, it is important that the welded joints show a good toughness at room temperature, for fabrication and construction steps and for start up / shut down considerations. As a continuation of its activities on CrMo steels [2, 7-9], Air Liquide Welding has developed matching filler materials for this new grade.

Within the COST program, a chemical composition, called WB2, suitable to weld CB2 materials was established some years ago. The objective for the development of this steel grade is to reach steam parameters of 600-620 °C, 240-300 bar, while an efficiency of 47% is targeted for power station applications. As of now, long-term creep tests on various cast steel melts are in progress at temperatures in the 550-650 °C range and the longest failure time has been obtained at 33100 hours, while the longest on-going test has run for over 74000 hours. Also, excellent properties on joints has been demonstrated and first applications have been already agreed upon in Europe and the United States, with projects now under construction.

Development of SMAW consumable for CB2 steel castings

Air Liquide Welding has developed a 4 mm diameter SMAW electrode according to WB2 specification. The toughness specification was 27 J at room temperature after PWHT.

All-weld-metal deposits were deposited for different diameters with a preheat of 200 °C and an interpass

Zeitstandfestigkeit, der Zähigkeitseigenschaften und der Steigerung der AC1 Temperatur.

Die Analysen umfassten sowohl reine Schweißgüter als auch Schweißverbindungen und haben gezeigt, dass zufriedenstellende Ergebnisse im Vergleich zu den geltenden Normen erzielt wurden.

Zu den Air Liquide Welding Schweißzusätzen für T/P92 Stahl gehören: die Stabelektrode OE-CROMOCORD 92, der WIG-Stab Carborod WF92 sowie die Draht-/Pulverkombination zum UP-Schweißen OE-CROMO SF92/OP F500.

CB2 FÜR TURBINEN AUS STAHLGUSS

Die Stähle des Typs 9-12% Cr haben das höchste Potential für die Erfüllung der Anforderungen (Zeitstandfestigkeit und Oxidationsbeständigkeit) an kritischen Komponenten in Hochtemperaturbereichen. Da die Dampftemperatur in den Kraftwerken immer weiter erhöht wird, müssen auch neue Werkstoffe für gegossene Turbinen gefunden werden. Dafür werden im Rahmen des COST-Programms seit einigen Jahren verschiedenen Varianten des 9-10%Cr-Typs entwickelt und getestet. Von den getesteten Werkstoffen verfügt der Typ CB2 über die besten Werte bei der Zeitstandfestigkeit und wird

wahrscheinlich jetzt unter realen Betriebsbedingungen eingesetzt. Dieser Werkstofftyp enthält 9 bis 10% Cr sowie Anteile von Mo, Co, B und N (siehe Tabelle 9). Der Legierungstyp wurde auch für die Rohrherstellung geprüft, um zukünftig eventuell den 92er Typ zu ersetzen, wenn die Verbesserung der Zeitstandfestigkeit groß genug ist, um einen etwas höheren Preis zu rechtfertigen.

Um die Vorteile dieses Stahltyps voll ausnutzen zu können, werden Schweißzusätze benötigt, die eine dem Grundwerkstoff ähnliche Zeitstandfestigkeit im Schweißgut erreichen. Auch wenn der Stahl bei hohen Temperaturen eingesetzt wird, also unter Bedingungen, bei denen die Zähigkeit kein Problem bereitet, müssen die Schweißverbindungen dennoch eine gute Zähigkeit bei Raumtemperatur aufweisen und zwar im Hinblick auf Herstellungs- und Konstruktionsphasen sowie auf Anlauf- / Abschaltphasen. Ergänzend zu den Zusätzen für die CrMo-Stähle [2, 7-9] entwickelte Air Liquide Welding auch Schweißzusätze für diesen neuen Werkstofftyp.

Vor einigen Jahren wurde im Rahmen des COST-Programms ein Zusatz WB2 entwickelt, dessen chemische Zusammensetzung zum Schweißen von CB2 Werkstoffen geeignet war. Ziel bei der Entwicklung dieses Stahltyps für Kraftwerksanwendungen ist das Erreichen von Dampfparametern von 600-620 °C und 240-300 Bar bei einem Wirkungsgrad von 47%. Im Augenblick laufen Zeitstandversuche mit verschiedenen Schmelzen bei Temperaturen im Bereich von 550-650 °C. Die längste Laufzeit bis zum ersten Bruch betrug 33100 Stunden, während die längste Laufzeit aktuell bei 74000 Stunden liegt. Es wurden auch ausgezeichnete Eigenschaften an Verbindungsnahten erzielt und ein erster Einsatz bei geplanten Projekten wurde in Europa und den USA bereits vereinbart.

Entwicklung von SMAW Zusätzen für CB2 Stahlguss

Air Liquide Welding hat eine Stabelektrode mit 4mm Durchmesser entsprechend der WB2 Gewährleistungswerte entwickelt. Die Zähigkeitsanforderungen betragen 27J bei Raumtemperatur nach Wärmenachbehandlung (PWHT).

Table 9: Typical chemical composition (weight%) of studied CB2 base material [6]

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Co	N	B
CB2	0.12	0.20	0.88	9.2	0.17	1.49	0.21	0.06	0.98	0.020	0.011

Tabelle 9: Typische chemische Zusammensetzung (Gewichtsanteil) des überprüften CB2 Grundwerkstoffes [6]

temperature of 250 °C. Welding parameters as follow:

- Ø 3.2 mm: 116 Amps, 22 V, heat input 8 kJ/cm,
- Ø 4.0 mm: 160 Amps, 24 V, heat input 12 kJ/cm,
- Ø 5.0 mm: 206 Amps, 26 V, heat input 13 kJ/cm,

Different types of PWHT were performed: 760 °C/2 h, 760 °C/4 h, 750 °C/10 h and 730 °C/24 h with a heating and cooling rate of 50 °C/h. The typical chemical composition of weld metal is presented in Table 10. The mechanical properties obtained with the different diameters and PWHT are presented in Table 11, showing results which conform to requirements both in terms of tensile properties and toughness. A micrograph of the martensitic type of microstructure is presented in Figure 4.

The Ac1 transformation temperature of the weld metal has been determined at 830 °C.

CB2 Conclusions

Matching consumables for the new grade CB2 have been developed. These products show satisfactory results. The chemical composition of these filler materials is nearly fixed but modifications are still possible to take into account any modification of the chemical composition from the steel maker or special customer requests. These products are available for testing by fabricators.

Table 10: Typical chemical composition of all weld metal for the different diameters of CB2 SMAW electrodes

Elements Elemente		CB2 weld metal typical CB2 Schweißgut typische Werte
C	%	0.11
Mn	%	0.5
Si	%	0.2
Cr	%	9.5
Mo	%	1.5
V	%	0.19
Nb	%	0.045
Co	%	0.95
Ni	%	0.7
B	ppm	65
N	ppm	170

Tabelle 10: Typische chemische Zusammensetzung des reinen Schweißguts der CB2 Stabelektroden

Table 11: Mechanical properties of the CB2 SMAW all-weld-metal deposits

PWHT	Requirements Anforderung	Kv + 20 °C (J/cm ²)	Rm (MPa)	Rp0.2 (MPa)	A (%)
		>35	-	547	-
760 °C / 2 h	Ø 3.2 mm	43	788	650	18.5
	Ø 4.0 mm	43	818	683	18.9
	Ø 5.0 mm	50	767	626	18.9
760 °C / 4 h	Ø 3.2 mm	58	757	607	22.6
	Ø 4.0 mm	66	763	614	19.5
	Ø 5.0 mm	55	739	595	19.9
730 °C / 24 h	Ø 3.2 mm	60	781	641	18.5
	Ø 4.0 mm	54	890	770	15.6
	Ø 5.0 mm	49	761	623	19.4
750 °C / 10 h	Ø 4.0 mm	38-36-44 (39)	798	660	19.1
	Ø 4.0 mm	-	427*	407*	12.1*

Note: * values obtained at 600 °C (all the other characterisations were performed at room temperature).

Anmerkung: * Werte bei 600 °C (alle anderen Bestimmungen bei Raumtemperatur).

Tabelle 11: Mechanische Gütewerte des reinen Schweißguts hergestellt mit der CB2 Elektrode

Fig. 4: Microstructure of CB2 weld metal

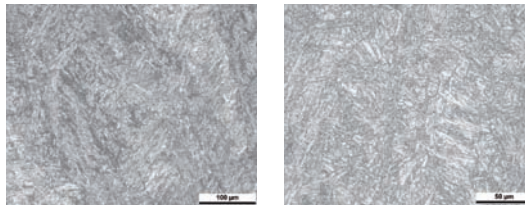


Bild 4: Mikrogefüge des CB2 Schweißguts

Reine Schweißgüter wurden mit unterschiedlichen Durchmessern bei einer Vorwärmtemperatur von 200 °C, einer Zwischenlagentemperatur von 250 °C und folgenden Schweißparametern hergestellt:

- Ø 3,2mm: 116A, 22V, Wärmeeintrag 8 kJ/cm,
- Ø 4,0mm: 160A, 24V, Wärmeeintrag 12 kJ/cm,
- Ø 5,0mm: 206A, 26V, Wärmeeintrag 13 kJ/cm,

Folgende Wärmenachbehandlungen wurden durchgeführt: 760 °C/2h, 760 °C/4h, 750 °C/10h und 730 °C/24h bei einer Aufheiz- und Abkühlzeit von 50 °C/h. Die typische chemische Zusammensetzung des Schweißgutes ist in Tabelle 10 zusammengefasst. Die mechanischen Gütewerte für die unterschiedlichen Durchmesser und Wärmenachbehandlungen werden in Tabelle 11 gezeigt. Es ergeben sich konforme Ergebnisse sowohl bei der Zugfestigkeit als auch bei der Zähigkeit. Bild 4 zeigt einen Mikroschliff des martensitischen Mikrogefüges.

Die Ac1 Umwandlungstemperatur des Schweißguts lag bei 830 °C.

CB2 Zusammenfassung

Die entwickelten Schweißzusätze entsprechen den Anforderungen des neuen Werkstofftyps CB 2. Die chemische Zusammensetzung liegt fest, wobei Änderungen zur Anpassung an eine geänderte chemische Analyse der Stahlhersteller oder auf besonderen Kundenwunsch möglich sind. Zu Testzwecken sind diese Produkte auf Nachfrage erhältlich.

C. CHOVELT - E. GALAND - G. EHRHART- B. LEDUEY

AIR LIQUIDE / CTAS -13 rue d'Epluches, Saint Ouen l'Aumône, 95315 Cergy Pontoise, France.

BIBLIOGRAPHY: / LITERATURHINWEISE:

[1] A. Vanderschaeghe, J. Gabrel and C. Bonnet, "Mise au point des consommables et procédures de soudage pour l'acier grade 92", AFIAP, 2001.

[2] C. Chovel, E. Galand and B. Leduey, "Effect of various factors on toughness in P92 SAW weld metal", International Institute of Welding IIW document II-C-341-07.

[3] A.M. Barnes and D.J. Abson, "The effect of composition on microstructural development and toughness of weld metals for advanced high temperature 9-13%Cr steels", 2nd International Conference Integrity of High Temperature Welds, 10-12 Nov. 2003, London.

[4] Nippon Steel Corporation: "Data Package for NF616 Ferritic Steel (9Cr-0.5Mo-1.8W-Nb-V)"; Second edition, March 1994.

[5] E. Bauné, E. Galand, B. Leduey, G. Liberati, M. Engelaart, S. Caminada, G. Cumino, A. Di Gianfrancesco, L. Cipolla, "Advanced Ferritic High Chromium Grades For Power Generation Applications: Similar And Dissimilar Weldability Assessment And Long-Term Performances", Symposium on Heat Resistant Steels and Alloys for USC Power Plants 2007, July 3-6, 2007, Seoul, Korea.

[6] T-U. Kern, M. Staubli and B. Scarlin, "The European Efforts in Material Development for 650°C USC Power Plants – COST 522", ISIJ International, vol. 42 (2002), n°12, pp. 1515.

[7] 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, Sept. 2006, Liège, Belgium.

[8] G. Cumino, A. Poli, S. Caminada, E. Bauné, E. Galand, B. Leduey, A. Bertoni, F. Cirilli, A. Di Gianfrancesco, "Grade 23 and 24 tubes, pipes and welded joints production: materials, consumables and process developments", EPRI Welding and Repair Conference, June 2006, Florida, USA.

[9] E. Bauné, E. Galand, B. Leduey, G. Liberati, G. Cumino, S. Caminada, A. Di Gianfrancesco, L. Cipolla; "Grades 23 and 92 : Weldability Assessment & Long-Term Performances for Power Generation Applications", International Welding/Joining Conference IWJ-Korea 2007, May 10-12, 2007, COEX, Seoul, Korea.

Welding Consumable Optimisation for the Welding of High and Very High Yield Strength Steels.

The welding of high yield strength steel grades is associated with the risk of hydrogen induced, cold cracking. The current performance of welding consumables in this respect is discussed in the first section of this paper.

It is then shown that by precise optimisation of the nickel, chromium and molybdenum alloying contents, it is possible to meet simultaneously the minimum tensile strength and impact toughness properties in both the as-welded and stress relieved conditions.

Based on this chemical composition, different types of flux-wire combinations, as well as rutile flux cored and basic flux cored wires have been developed. The mechanical properties of welds deposited with these products are reported and open to a discussion about the pertinence of using rutile-cored wires for these steel grades.

INTRODUCTION

The continuous trend to reduce the weight of structures has caused steelmakers to increase yield strength limits to higher and higher values. Susceptibility to welding difficulties, such as the risk of cold cracking or not achieving the minimum mechanical properties required, increases with each increase in yield strength. The first part of this article illustrates the relationship between the risk of hydrogen induced cracking and the choice of welding consumables, with the level of mechanical properties of the steels being welded, by means of implant and Tekken tests. It should also be noted that this cracking mechanism is no longer limited to the heat-affected zone, as in most steels, but can also occur in the deposited weld metal.

The simultaneous achievement of the required levels of yield strength and deposit toughness requires precise definition of the chemical composition of the weld metal. The second part of this article describes the process of optimisation of the chemical composition based on neural network modelling and the results obtained in terms of the development of welding consumables for S690 steel grades (0.2% proof stress at >690 MPa).

Optimierung von Schweißzusätzen für hochfeste Stähle.

Das Schweißen hochfester Stahltypen ist immer mit dem Risiko Wasserstoff induzierter Kaltrisse verbunden. Der erste Teil dieser Arbeit behandelt deshalb den Einfluss von Schweißzusätzen auf die Wasserstoffrissebildung.

Anschließend wird dargestellt, dass nur durch eine präzise Abstimmung der Legierungselemente Nickel, Chrom und Molybdän die Mindestanforderungen an die Festigkeit und an die Kerbschlagzähigkeit erreicht werden können – sowohl im Schweißzustand als auch spannungsarmgeglüht.

Verschiedene Draht-/Pulverkombinationen sowie rutile und basische Fülldrähte mit entsprechender chemischer Zusammensetzung wurden entwickelt. Die mechanischen Eigenschaften der mit diesen Schweißzusätzen hergestellten Schweißgüter werden diskutiert und dienen als Grundlage für die Entscheidung, ob auch rutile Fülldrähte für solche Stahltypen geeignet sind.

EINLEITUNG

Durch den anhaltenden Trend zur Gewichtsreduzierung im Metallbau wurde in der Stahlherstellung die Streckgrenze immer weiter erhöht. Die möglichen Probleme beim Schweißen, wie z. Bsp. Kaltrisse oder das Nichterreichen der geforderten mechanischen Gütewerte, steigt mit der Zunahme der Streckgrenze. Im ersten Teil dieser Arbeit wird auf den Zusammenhang zwischen der Wasserstoffrissegefahr und der Festigkeit der Schweißzusätze und entsprechenden Stähle durch Implant- und Tekken-Tests eingegangen. Außerdem wird gezeigt, dass die Rissegefahr nicht mehr nur auf die WEZ begrenzt ist wie dies bisher meist der Fall war, sondern auch im Schweißgut vorhanden ist.

Um sowohl die geforderte Streckgrenze als auch die Zähigkeit des Schweißguts zu erreichen, ist eine exakte Einstellung der chemischen Zusammensetzung des Schweißgutes erforderlich. Im zweiten Teil werden das Verfahren zur Optimierung der chemischen Zusammensetzung durch neuronale Netzwerke erklärt, sowie die Ergebnisse der Entwicklung von Schweißzusätzen für Stähle des Typs S690 (0,2% Dehngrenze >690 MPa) beschrieben.

Abschließend wird darauf eingegangen, dass die Weiterentwicklung rutiler Fülldrahtelektroden in den letzten Jahren zu guten Kerbschlagwerten bei niedrigen Temperaturen geführt hat und zwar mit und ohne Wärmenachbehandlung. Daher scheint es an der Zeit, basische Schweißzusätze, die einer fachmännischen Verarbeitung

Finally, the development of rutile flux cored wires in recent years has enabled good levels of impact toughness to be obtained at low temperatures both with and without heat treatment. Under the circumstances, it seems attractive to replace basic welding consumables that require skilled handling, by rutile-based products, which enable a significant increase in productivity. The use of these products is discussed in the third and final section.

TRENDS IN WELDING CONSUMABLES FOR HIGHER STRENGTH STEELS IN RELATION TO HYDROGEN INDUCED CRACKING

Cold cracking is undoubtedly the defect of primary concern when welding high strength steels. Cold cracking is a result of a combination of three factors: the level of hydrogen in the deposited weld metal, the imposed stresses and the susceptibility of the microstructure.

The mode of hydrogen diffusion in the weld metal and in the heat-affected zone was presented by Granjon [H. Granjon 84] for steels with conventional microstructures. The maximum hydrogen level occurs in the most "hardenable" area in terms of chemical composition, i.e., the area where the transformation of austenite to ferrite occurs last. This is also the region with the highest volume fraction of martensite. For the most commonly used structural steels, the welding consumables produce a weld deposit that is less "hardenable" than the base metal. This is why the majority of cold cracking problems occur in the heat-affected zone. In contrast, in higher strength steels, the welding consumables may produce a deposited weld metal whose composition is richer in alloying elements than the base metal in order to simultaneously ensure compliant levels of both strength and impact toughness. In this case, it is the weld metal that becomes the most "hardenable" area and therefore the most likely to be affected by cracking.

The first part of this section will address the problem of hydrogen induced cracking in the heat-affected zone as a function of the diffusible hydrogen content of the welding consumables. In the second part, Tekken tests [IS91] will be discussed, that were carried out on the same steel grades, highlighting the development of these steels, which has recently lead to a shift in the incidence of cold cracking from the heat-affected zone to the weld metal.

The welding processes and consumables were chosen in order to achieve two levels of diffusible hydrogen. Primarily, it is related to the metal-cored wires. This was due to the low levels of diffusible hydrogen associated with this type of welding consumable: in this study, they were respectively 1 and 1.3 ml / 100 g of deposited weld metal. A basic E11018 G-type MMA electrode was used to demonstrate the effect of a higher hydrogen level than that of the flux cored wires, 4 ml / 100 g deposited weld metal, on cold cracking.

Characterisation of the behaviour of the heat-affected zone of high strength steels as a function of the diffusible hydrogen content attributable to the welding consumables.

An initial series of implant tests was conducted by the Institut de Soudure. These tests enabled the maximum allowable stress to be determined during the cooling period

bedürfen, durch Produkte auf Rutil-Basis zu ersetzen, die eine deutliche Produktivitätssteigerung möglich machen. Der Einsatz dieser Produkte wird im dritten Teil besprochen.

ENTWICKLUNGSTRENDS BEI SCHWEISSZUSÄTZEN FÜR HOCHFESTE STÄHLE IM HINBLICK AUF WASSERSTOFF INDUZIERTER RISSBILDUNG

Kaltrisse sind sicher die meist gefürchteten Fehler bei der Verarbeitung hochfester Stähle. Kaltrisse entstehen durch eine Kombination von drei Faktoren: dem Wasserstoffgehalt im Schweißgut, den anstehenden Spannungen und einem kritischen Mikrogefüge.

Granjon [H. Granjon 84] beschrieb bereits die Wasserstoffdiffusion im Schweißgut und in der WEZ für Stähle mit konventionellen Mikrogefügen. Der höchste Wasserstoffgehalt entsteht in den Bereichen, die aufgrund der chemischen Zusammensetzung am leichtesten härtbar sind, d.h. in Bereichen, in denen die Umwandlung von Austenit zu Ferrit zuletzt erfolgt. Das sind auch die Bereiche mit dem größten Martensitanteil. Bei den gängigen Baustählen wird mit Schweißzusätzen gearbeitet, die Schweißgüter erzeugen, die weniger härtbar sind als der Grundwerkstoff. Daher treten die meisten Kaltrissprobleme in der WEZ auf. Im Gegensatz dazu müssen Schweißzusätze für hochfeste Stähle im Schweißgut einen höheren Anteil an Legierungselementen als im Grundwerkstoff aufweisen, um so die Anforderungen an die Streckgrenze und die Kerbschlagzähigkeit zu erfüllen. In diesem Fall wird das Schweißgut zum am stärksten härtbaren Bereich und daher am anfälligsten für Risse.

Im ersten Teil dieser Veröffentlichung wollen wir das Problem der Wasserstoff induzierten Risse in der WEZ hochfester Stähle in Abhängigkeit vom Wasserstoffgehalt in den Schweißzusätzen betrachten. Danach werden die Tekken-Tests [IS91] besprochen, die an denselben Stahltypen durchgeführt wurden und die Entwicklung der Stähle aufzeigen, die in jüngster Zeit zu einer Verschiebung der Kaltrisse von der WEZ in das Schweißgut geführt haben.

Die Schweißverfahren und Schweißzusätze wurden so gewählt, dass zwei Größenordnungen an diffusiblem Wasserstoff entstehen. Für ein niedriges Niveau an diffusiblem Wasserstoff wurden die dafür typischen Metallpulverfülldrähte verwendet. Bei dieser Untersuchung lag der Wasserstoffgehalt bei 1 und 1,3ml / 100g Schweißgut. Mit einer basischen Stabelektrode des Typs E11018 G konnte im Gegensatz zu den Fülldrähten der Einfluss eines höheren Wasserstoffgehalts (4ml / 100g Schweißgut) auf die Kaltrissneigung gezeigt werden.

Verhalten der WEZ hochfester Stähle in Abhängigkeit vom Gehalt an diffusiblem Wasserstoff in den Schweißzusätzen

Eine erste Versuchsreihe mit Implant-Tests wurde vom franz. Schweißinstitut (Institut de Soudure) durchgeführt. Durch diese Versuche konnte die maximale Spannung für eine bestimmte Abkühlzeit zwischen 800 und 500 °C ermittelt werden, in der keine Risse auftreten. Die Testreihe umfasste zwei Kombinationen aus Stahl und Metallpulver-Fülldraht mit einer Mindeststreckgrenze von 500 MPa und 700MPa (Tabelle 1). Die Ergebnisse wurden ohne Vorwärmen erreicht.

Bei der Kombination aus dem Stahl SUPERELSO 500 und dem

from 800 to 500 °C in which no cracks occur. The tests involved two steel/metal cored wire combinations, representing minimum yield strengths of 500 MPa and 700 MPa, respectively (Table 1). The results were obtained without preheating.

For the combination SUPERELSO 500 steel and OERLIKON CITOFLUX M550 metal cored wire, the applied stress reached the nominal yield strength of 500 MPa without risk of cracking over a cooling period that exceeded 4 seconds. This corresponds to a heat input (MAG) that is greater than 10 kJ/cm for base metal thicknesses exceeding 15 mm. Thus, the low level of the diffusible hydrogen associated with the filler wire gives virtually complete security.

For the steel grade with the highest yield strength (SUPERELSO 702) used with CITOFLUX M700 metal cored wire, no cracks were observed at the nominal stress of the steel for cooling times from 800 °C to 500 °C that exceeded 9 seconds. Based on these times, it is possible to determine the corresponding heat input using a diagram such as that of IRSID (French Iron and Steel Research Institute) [IRSID 77]. Accordingly, it was found that the threshold heat input (MAG) for thick sections is 21 kJ/cm. Lower stress levels enable a reduction in the cooling time. Thus, stress levels of 500 MPa and 300 MPa enable cooling times from 800 °C to 500 °C, of 8 seconds and 4 seconds, respectively. In the case of metal cored wires and thicker sections, the heat inputs are 20 kJ/cm and 10 kJ/cm, respectively. Accordingly, this allows for larger freedom in the choice of welding parameters. It is interesting to note that the microstructures associated with higher yield strengths become increasingly susceptible to cold cracking, the higher the strength level. As proof, it is sufficient to compare the susceptibility to cracking of the SUPERELSO 500 and 702 steels at a stress of 500 MPa. Whereas the former does not require any precautions to be taken, the latter will require a minimum cooling rate of 8 seconds.

The discussion so far applies to the very low diffusible hydrogen levels of the metal cored wires under consideration. Figure 1 shows that the maximum allowable

Table 1: Chemical analyses of the base metals and ISO all weld metals using OERLIKON CITOFLUX M550 and CITOFLUX M700 cored wires and OERLIKON TENACITO 80 MMA electrode

	SE500	SE702	CF M550	CF M700	TEN 80
C	0.06	0.11	0.07	0.08	0.07
Mn	1.37	0.85	1.08	1.82	1.65
Si	0.24	0.26	0.34	0.52	0.4
S	0.001	0.0005	0.022	0.017	0.006
P	0.005	0.010	0.015	0.013	0.012
As	0.015	0.03	-	0.013	-
Ni	0.58	1.27	1.61	2.26	1.5
Cr	0.13	0.51	0.02	0.025	0.3
Mo	0.22	0.48	0.37	0.72	0.4
Cu	0.11	0.34	-	0.057	-
Al	0.017	0.093	0.013	0.012	-
Nb	0.001	0.003	-	0.001	-
Ti	0.001	0.005	0.007	0.014	-
V	0.049	0.001	-	0.017	-
B	-	17	<5	9	-
O	21	7	685	445	-
N	65	53	38	38	-

Tabelle 1: Chemische Analyse von Grundwerkstoff und Schweißgut hergestellt mit OERLIKON CITOFLUX M550 und CITOFLUX M700 Fülldrähten sowie OERLIKON Stabelektroden TENACITO 80

Fig. 1: Assessment of the impact of the level of diffusible hydrogen on the incidence of hydrogen induced cracking-type defects based on the results of implant tests performed with OERLIKON CITOFLUX M700 metal cored wire and TENACITO 80 MMA electrodes when welding SUPERELSO 702 steel [IS91]

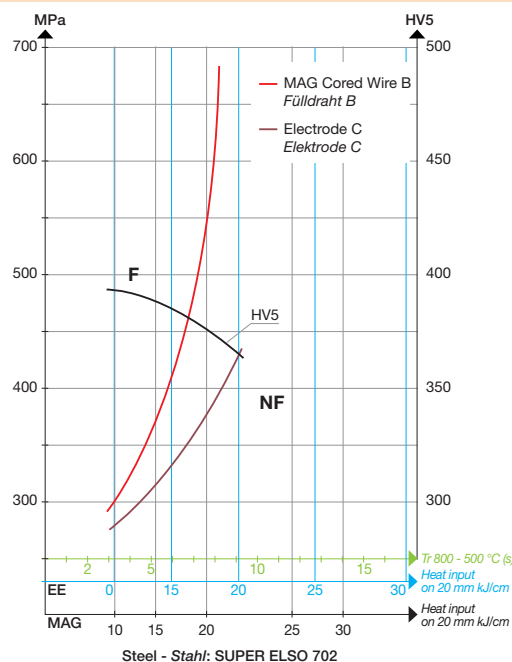


Bild 1: Einfluss des diffusiblen Wasserstoffes auf die Wasserstoff induzierte Rissbildung auf Basis der Implant-Tests mit dem Metallpulverfülldraht OERLIKON CITOFLUX M700 und der Stabelektrode TENACITO 80 an dem Stahl SUPERELSO 702 [IS91]

Metallpulverfülldraht OERLIKON CITOFLUX M550 erreichte die angelegte Spannung die nominale Streckgrenze von 500MPa ohne Riss-Risiko bei einer Abkühlzeit von über 4 Sekunden. Das entspricht einem Wärmeeintrag (MAG) von mehr als 10kJ/cm bei Grundwerkstoffdicken von >15mm. Der geringe Anteil an diffusiblem Wasserstoff in Zusammenhang mit diesem Schweißzusatz bedeutet also quasi absolute Sicherheit.

Beim Stahltyp mit der höchsten Streckgrenze (SUPERELSO 702), der mit dem Metallpulverfülldraht CITOFLUX M700 verarbeitet wurde, zeigten sich bei der nominalen Spannung des Stahls bei Abkühlzeiten von 800 °C auf 500 °C von über 9 Sekunden keine Risse. Ausgehend von diesen Zeiten ist es möglich, den entsprechenden Wärmeeintrag mit einem Diagramm wie dem des IRSID (Forschungsinstitut für Stahl und Eisen in Frankreich) [IRSID 77] zu ermitteln. Entsprechend wurde festgestellt, dass der Grenzwert für Streckenergie (MAG) für dicke Materialien bei 21 kJ/cm liegt. Niedrigere Spannungen ermöglichen eine Verringerung der Abkühlzeit. So sind bei Spannungswerten von 500 MPa und 300 MPa Abkühlzeiten zwischen 800 °C und 500 °C von 8 Sekunden oder 4 Sekunden möglich. Bei Metallpulverfülldrähten und dicken Blechen liegt der Wärmeeintrag bei 20 kJ/cm und 10 kJ/cm. Daraus ergibt sich eine größere Bandbreite bei der Wahl der Schweißparameter. Es ist interessant festzustellen, dass Mikrogefüge mit hohen Streckgrenzen mit steigender Streckgrenze immer anfälliger gegenüber Kaltrissen werden. Als Beweis genügt es, die Rissanfälligkeit der SUPERELSO 500 und 702 Stähle bei einer Belastung von 500 MPa zu prüfen. Wo im ersten Fall keinerlei Vorsichtsmaßnahmen erforderlich sind, ist beim zweiten Typ eine Mindestabkühlgeschwindigkeit von 8 Sekunden erforderlich.

Bisher bezog sich die Betrachtung auf sehr niedrige Gehalte an diffusiblem Wasserstoff, die bei Metallpulverfülldrähten typisch sind. Bild 1 zeigt, dass die zulässige Spannung sinkt, wenn der vom Schweißzusatz eingebrachte Wasserstoffanteil steigt. Bei einer Abkühlzeit von 9 Sekunden zwischen 800 °C und 500 °C wurde bei Verwendung des Metallpulverfülldrahtes die nominale Belastung des Stahls erreicht, während beim Schweißen mit der Stabelektrode TENACITO 80 der zulässige Grenzwert bei nur 415MPa lag. Dieser Rückgang ist auf die

stress decreases when the hydrogen level contributed by the welding consumables increases. At a cooling time of 9 seconds between 800 °C and 500 °C, the steel's nominal stress was achieved using the metal cored wire, whereas when welding was performed using TENACITO 80 MMA electrodes, the permissible limit was only 415 MPa. This decline is attributable to the 4.5 ml of diffusible hydrogen per 100 g of deposited weld metal. It should be noted that for most standards these two products are included under the same classification, whereas their relative stress limits are quite different.

In a structure, there are welds where the welding position and the time frame of execution will induce both rapid cooling rates and high levels of stress. In such cases, the cooling time may be increased by means of pre-heat or post-weld heat treatment. The previously referenced study published by the Institut de Soudure showed that the crack-free stress tolerated by welds deposited using cored-wires at an heat input of 15 kJ/cm, i.e., at a cooling rate Δt (800-500 °C) of 6 seconds, increased from 415 MPa to 700 MPa by applying a preheat of 100 °C and a post-weld heat treatment of 100 °C for 45 min. For the TENACITO 80 MMA electrode, using the same heat input so a cooling rate Δt (800-500 °C) of 6.5 seconds, the critical stress increased from 300 MPa to 700 MPa with a similar heat treatment, but allowing double the time for the post-weld heat treatment.

Hydrogen Induced Cracking in the Weld Metal: The Role of Welding Consumables

The developments of recent years of high strength steels have caused a shift in hydrogen induced cracking from the heat-affected zone to the weld-metal. This has been clearly demonstrated by the Tekken tests conducted by the Institut du Soudure. Two sets of tests were conducted: the first set was intended to apply a particular stress in the weld-metal using a Y-groove geometry, while the second was intended to test the heat-affected zone using a semi-V groove.

Without taking special precautions, when welding SUPERELSO 702 steel with CITOFLUX M700 metal cored wire, there is a tendency to cold cracking. The Tekken test in a semi-V groove showed that effective protection of the heat-affected zone required preheating at 125 °C and a post-weld heat treatment at the same temperature for at least 30 minutes, under particularly severe conditions, as the heat input of 7 kJ/cm corresponded to a Δt (800-500) of 2.5 seconds. Under these conditions, the Y-groove tests indicated an occurrence of cracking in the weld metal. Under the same conditions of cooling and heat-treatment, MMA electrode welding consistently showed the occurrence of cracking in the weld metal, including the V-groove geometry that was intended to test the heat-affected zone.

In general, for modern high yield strength steels, the preheating and post-weld heat treatment temperatures and times are determined by the risk of cold cracking in the weld metal. It is not uncommon for this to lead to an increase of this temperature by some fifty degrees above the temperature required for the steel. This may generate significant costs as well as an uncomfortable working environment for the welders.

This is why MMA electrodes with very low diffusible hydrogen, packaged in watertight containers have been developed for these types of steel [Leduey 92]. The maximum amount of

4,5ml diffusiblen Wasserstoff pro 100g Schweißgut zurückzuführen. Dabei ist zu bedenken, dass diese beiden Produkte in den meisten NormEinstufungen dieselbe Klassifikation aufweisen, während die relativen Spannungsgrenzen doch deutliche Unterschiede aufweisen.

Es gibt Bauteile mit Schweißnähten, wo Schweißposition und Schweißdauer zu hohen Abkühlgeschwindigkeiten und Spannungen führen. In solchen Fällen kann die Abkühlzeit durch Vorwärmen oder durch Nachwärmen erhöht werden. Die weiter oben bereits angeführte Studie des Institut de Soudure zeigt, dass die Spannungen, bei denen keinen Risse auftreten bei mit Fülldraht hergestellten Nähten und einem Wärmeeintrag von 5kJ/cm, d.h. bei einer Abkühlgeschwindigkeit Δt (800-500°C) von 6 Sekunden, von 415MPa auf 700MPa ansteigen könnten, wenn auf 100°C vorgewärmt und bei 100 °C für 45 Min. nachgewärmt würde. Beim Einsatz einer Stabelektrode (TENACITO 80) erhöhte sich bei gleichem Wärmeeintrag, also bei einer Abkühlgeschwindigkeit Δt (800-500 °C) von 6,5 Sekunden, die kritische Spannung bei ähnlicher Wärme-führung von 300MPa auf 700MPa, wobei allerdings doppelt so lange nachgewärmt wurde.

Wasserstoff induzierte Risse im Schweißgut: Einfluss der Schweißzusätze

Die jüngsten Entwicklungen höherfester Stähle haben zu einer Verschiebung der wasserstoffinduzierten Rissbildung von der WEZ in das Schweißgut geführt. Das haben die Tekken-Tests des Institut du Soudure klar nachgewiesen. Zwei Testreihen wurden durchgeführt. In der ersten Testreihe sollte mit einer Y-Nahtvorbereitung eine bestimmte Spannung auf das Schweißgut wirken, während in der zweiten Testreihe mit einer halben V-Naht die WEZ analysiert werden sollte.

Ohne besondere Vorkehrungen besteht beim Schweißen des Stahltyps SUPERELSO 702 mit dem Fülldraht CITOFLUX M700 eine Neigung zu Kaltrissen. Der Tekken-Test mit der halben V-Nahtvorbereitung zeigte, dass für einen effektiven Schutz der WEZ ein Vorwärmen von 125 °C und ein Nachwärmen bei gleicher Temperatur für mindestens 30 Min. erforderlich ist. Dies wurde unter besonders kritischen Bedingungen erreicht, da der Wärmeeintrag von 7kJ/cm einer Abkühlgeschwindigkeit Δt (800-500) von 2,5 Sekunden entspricht. Unter diesen Bedingungen entstanden Risse in dem mit Y-Nähten geprüften Schweißgut. Bei den gleichen Bedingungen für das Abkühlen und Nachwärmen ergaben sich bei der Stabelektrode durchweg Risse im Schweißgut, und zwar auch bei der Nahtvorbereitung als halbe V-Naht, die der Analyse der WEZ dienen sollte.

Im Allgemeinen werden bei modernen hochfesten Stahltypen die Vorwärm- und Nachwärmtemperaturen sowie deren Dauer vom Kaltrissrisiko im Schweißgut bestimmt. Es ist nicht unüblich, dass aufgrund dieser Tatsache die Temperaturen um 50 Grad über den für den Stahl erforderlichen Wert hinaus erhöht werden. Das kann erhebliche Kosten verursachen und die Arbeit des Schweißers wesentlich erschweren.

Aus diesem Grund wurden für diese Stahltypen Stabelektroden mit sehr geringem Gehalt an diffusiblem Wasserstoff und wasserdichter Verpackung entwickelt. [Leduey 92]. Der maximale Gehalt an diffusiblem Wasserstoff beträgt dabei 3ml pro 100g Schweißgut (bei Öffnen der Verpackung). Damit wurde erreicht, dass die Vorwärm- und Nachwärmtemperaturen nicht mehr vom Schweißgut allein, sondern praktisch zu gleichen Teilen vom Grundwerkstoff und vom Schweißgut bestimmt werden.

diffusible hydrogen obtained is 3 ml per 100 g of deposited weld metal (when the packaging is opened). The objective is achieved that pre-heat and post-weld heat treatment temperatures are no longer determined by the weld metal alone, but are almost equally determined by the base metal and the weld metal.

OPTIMISATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF WELDING CONSUMABLES FOR E690-TYPE STEEL GRADES

There are many commercial products which meet the required minimum yield strengths, with or without heat treatment. However, it became apparent that obtaining a satisfactory level of impact toughness at -20 °C after a stress relief heat treatment could not be taken for granted. This is why a study of the influence of chemical composition was carried out, whether this was a function of additions of alloying elements or of impurities related to the raw materials used to manufacture the welding consumables.

Concerning alloying elements, it is well known that the influence of carbon on mechanical properties becomes stronger the more the structure is hardenable. Silicon is known to increase mechanical strength and accelerate the kinetics of precipitation. Manganese is also added for hardening purposes as well as for its positive effect on the toughness of the weld metal by microstructural refinement. But, it accelerates the process of temper embrittlement during cooling after stress relief heat treatment. Chromium and molybdenum are essential for sufficient weld metal hardenability in order to achieve minimum yield strength or tensile strength while maintaining a low carbon content. Cr and Mo precipitates may be formed during the stress relief heat treatment. Nickel increases toughness without involving the risk of precipitation of brittle phases.

Concerning impurities, oxygen is known to affect the toughness of the weld metal, with or without heat treatment. Nitrogen causes embrittlement by interstitial solid solution hardening. During stress relief heat treatments, it is one of the elements causing precipitation. Finally, the group comprising phosphorus, tin, antimony and arsenic has a marked influence on temper embrittlement, especially in areas with an as-welded microstructure. The influence of this group is generally described by the Bruscato index. This author has proposed several indices. The index of nickel steels (3.5%), alloyed with chromium (1.75%), molybdenum (0.5%) and vanadium (0.1%) was selected because it is closest in chemical composition to the welds discussed in this study:

$$Y = (10Sb + 5Sn + 2P + As) / 100 \text{ (concentrations in ppm)} \quad [\text{BRUSCATO.R.M. 1997}]$$

The chemical analyses examined are reported in Table 2 and their related mechanical properties in Table 3.

The impact test values were recorded under the weld cap in order to sample as-welded solidification structures, which are generally areas with the lowest toughness. Taking into account the small number of tests in relation to the number of variables, it is difficult to directly address the precise role of each chemical element on the various properties. This is especially true considering that some elements, such as manganese, may have contradictory effects on the results

OPTIMIERUNG DER CHEMISCHEN ZUSAMMENSETZUNG VON SCHWEISSZUSÄTZEN FÜR STÄHLE DES TYPES E690

Es gibt viele Schweißzusätze auf dem Markt, die die Anforderungen an die Mindeststreckgrenze erfüllen – mit oder ohne Wärmebehandlung. Es hat sich aber gezeigt, dass man nicht davon ausgehen konnte, nach dem Spannungsarmglühen eine zufrieden stellende Kerbschlagzähigkeit bei -20 °C zu erreichen. Daher wurde der Einfluss der chemischen Zusammensetzung untersucht, unabhängig davon, ob die chemischen Elemente zulegiert wurden oder aus Verunreinigungen von Rohstoffen stammen, die zur Herstellung der Schweißzusätze verwendet wurden.

Es ist bekannt, dass der Einfluss des Legierungselementes Kohlenstoff auf die mechanischen Eigenschaften umso größer wird, je härter das Gefüge ist. Silizium trägt bekanntlich zur Steigerung der Festigkeit bei und beschleunigt die Ausscheidungsreaktionen. Mangan wird ebenfalls zum Härten zulegiert sowie wegen seines positiven Effekts auf die Zähigkeit des Schweißguts durch Verfeinerung des Mikrogefüges. Allerdings beschleunigt es die Versprödung während des Abkühlens nach dem Spannungsarmglühen. Chrom und Molybdän sind wichtig für eine ausreichende Härbarkeit des Schweißguts, um die Mindestanforderungen an Streckgrenze und Zugfestigkeit zu erfüllen, bei gleichzeitig niedrigem Kohlenstoffgehalt. Während des Spannungsarmglühens können Cr- und Mo-Ausscheidungen entstehen. Nickel erhöht die Zähigkeit, ohne die Gefahr des Entstehens von Versprödungsphasen.

Bei den Verunreinigungen ist Sauerstoff für seine Auswirkung auf die Zähigkeit bekannt – und zwar mit und ohne Wärmebehandlung. Stickstoff führt zur Versprödung durch die Bildung von Einlagerungsmischkristallen. Beim Spannungsarmglühen ist er eines der Elemente, die zu Ausscheidungen führen. Schließlich hat die Gruppe Phosphor, Zinn, Antimon und Arsen, wesentlichen Einfluss auf die Anlassversprödung, vor allem in Bereichen mit einem Mikrogefüge in unbehandeltem Zustand. Der Einfluss dieser Legierungselemente wird im Allgemeinen durch den Bruscato-Faktor beschrieben. Dieser Autor hat verschiedene Indizes vorgestellt. Die Indizes für Nickel-Stahl (3,5%), mit Zulegierung von Chrom (1,75%), Molybdän (0,5%) und Vanadium (0,1%) wurden herangezogen, weil ihre chemische Zusammensetzung am besten mit den in dieser Arbeit untersuchten Schweißverbindungen übereinstimmt:

$$Y = (10Sb + 5Sn + 2P + As) / 100 \text{ (Konzentrationen in ppm)} \quad [\text{BRUSCATO.R.M. 1997}]$$

Die betrachteten chemischen Analyse sind in Tabelle 2 dargestellt und die entsprechenden mechanischen Gütewerte in Tabelle 3.

Die Kerbschlagzähigkeit wurde unter der Decklage geprüft, um Proben aus unbehandelten Erstarrungsstrukturen zu haben, da dies gewöhnlich Bereiche mit der niedrigsten Zähigkeit sind. Unter Berücksichtigung der geringen Anzahl an Tests im Vergleich zur Anzahl der Variablen ist es schwierig, sofort die genaue Rolle jedes chemischen Elementes bei den verschiedenen Eigenschaften festzustellen. Das gilt besonders für Elemente wie zum Beispiel Mangan, die entgegengesetzte Auswirkungen auf die erzielten Ergebnisse haben können. Eine häufig eingesetzte Berechnungs-

Table 2: Chemical compositions of the E690-type welds included in this study (submerged arc welding, heat input 21.7 kJ/cm, inter-pass temperature <150 °C, except for 5973 - MIG welding and 5975 - MMA welding, same heat input). The content is expressed as a percentage, except for oxygen and nitrogen, which are expressed in ppm

	347	341	190	R892	369	159	5973	478	105	10	86	81	142	966	124	5975	5971	40
C	0.089	0.079	0.087	0.11	0.083	0.082	0.082	0.09	0.077	0.112	0.084	0.11	0.1	0.111	0.12	0.071	0.077	0.088
Si	0.25	0.3	0.25	0.25	0.25	0.32	0.64	0.24	0.36	0.29	0.32	0.32	0.42	0.36	0.41	0.31	0.31	0.33
Mn	1.36	1.48	1.56	1.53	1.51	1.66	1.57	1.5	1.78	1.65	1.85	1.79	1.96	1.82	1.99	1.53	1.85	1.97
S	0.001	0.001	0.005	0.003	0.002	0.004	0.003	0.001	0.001	0.003	0.004	0.004	0.002	0.007	0.001	0.004	0.003	0.003
Cr	0.23	0.25	0.28	0.28	0.31	0.32	0.33	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.37	0.38	0.39	0.39	0.46	0.48
Mo	0.4	0.43	0.32	0.5	0.52	0.38	0.45	0.6	0.4	0.38	41	0.008	0.44	0.37	0.43	0.45	0.34	0.49
Ni	1.43	1.57	1.25	1.87	1.7	1.33	1.86	1.82	1.24	1.14	1.32	1.17	1.33	1.47	1.43	1.92	2.25	1.6
V	0.003	0.004	0.006	0.009	0.004	0.006	0.004	0.004	0.003	0.003	0.011	0.01	0.003	0.005	0.031	0.014	0.011	0.004
N	65	69	47	38	59	32	114	69	35	41	50	49	33	37	28	104	77	42
O	260	230	290	260	155	279	258	240	262	184	272	217	187	214	199	320	215	236
P	0.008	0.01	0.0104	0.001	0.009	0.008	0.006	0.011	0.01	0.014	0.012	0.013	0.01	0.013	0.01	0.007	0.013	0.015
Sn	0.003	0.003	0.0034	0.003	0.002	0.0024	0.007	0.002	0.004	0.013	0.003	0.003	0.0032	0.003	0.0033	0.003	0.004	0.013
As	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.0026	0.002	0.003	0.0045	0.005	0.003	0.0027	0.0038	0.004	0.0037	0.003	0.002	0.003
Sb	0.0005	0.0005	0.001	0.0005	0.0005	0.002	0.0005	0.001	0.002	0.0005	0.003	0.0013	0.0015	0.002	0.0022	0.0005	0.0005	0.002
Y	3.8	4.3	4.98	4.4	3.5	5.06	5.4	4.5	6.45	10.3	7.1	5.67	5.48	6.5	6.22	3.7	5.3	11.8

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung des Schweißgutes Typ E690 aus dieser Studie (UP-Verfahren, Wärmeeintrag 21,7kJ/cm, Zwischenlagentemperatur <150 °C, außer bei 5973 - MIG Schweißen und 5975 - Elektrodenhandschweißen, gleicher Wärmeeintrag). Gehalt in %, außer bei Sauerstoff und Stickstoff, die in ppm angegeben sind

Table 3: Mechanical properties (tensile strength (Rm) and yield strength (Re) in MPa, impact energy (KV) at -40 °C in Joules) before and after heat treatment (580 °C 3 to 6 hours, cooling rate: 50 °C/h) for the E690-type welds studied (submerged arc welding, heat input of 21.7 J/cm, interpass temperature <150 °C, except for MIG welding of 5973 and MMA welding of 5975, same heat input).

	347	341	190	RSC 2	369	159	5973	478	105	10	86	81	142	966	124	5975	5971	40
Rm (SR)	756	720	690	826	836	749	890	806	758	858	808	744	859	825	922	865	870	863
E0.2% (SR)	691	640	611	749	769	675	810	734	680	782	732	663	774	751	864	785	810	783
KV (SR)	111	122	108	46	68	104	15	20	65	17.3	21	4.3	25	18	6	12	8	11
Rm	770	746	727	830	856	799	914	805	820	910	821	818	892	887	954	926	1006	913
E0.2%	756	677	612	771	797	692	783	756	686	790	730	730	813	787	878	800	843	848
KV	118	105	99	83	128	109	Nm	98.5	73.3	53	53	28	60.3	59.3	48.7	Nm	Nm	64.3

SR = stress relieved - SR = spannungsamgeglüht

Tabelle 3: Mechanische Gütewerte (Zugfestigkeit (Rm) und Streckgrenze (Re) in MPa, Kerbschlagenergie (KV) bei -40 °C in J) vor und nach Wärmebehandlung (580 °C 3 bis 6h, Abkühlgeschwindigkeit: 50 °C/h) des untersuchten Schweißgut an E690-Stahl (UP-Verfahren, Wärmeeintrag 21,7J/cm, Zwischenlagentemperatur <150 °C, außer bei MIG-Schweißen von 5973 und Elektrodenhandschweißen von 5975, gleicher Wärmeeintrag.)

obtained. A frequently-used calculation method is multivariate regression; however, this implies changes of variables and results that are linear and continuous. A metallurgical process conducive both to high mechanical strength and good toughness is the outcome of several often competing effects that are definitely non-linear and sometimes discontinuous. This is why data processing was performed using a neural network-type software. Such an algorithm cannot be represented by an equation. On the other hand, it requires fewer tests in order to arrive at a precise answer and allows modelling of complex non-linear and non-parametric systems as well as the identification of correlations that are not detectable by more conventional systems.

First of all, it should be recalled that the number of tests was small to guarantee a reliable response, even when using a neural system. However, based on similar studies, it may be stated that the algorithm has sufficient robustness to be used for an initial development approach. The results obtained will require more precise subsequent validation. The low number of tests may be offset by defining the range of variation of those elements with an unambiguous effect on the mechanical properties:

- Welding trials have shown that a silicon content below 0.3% does not have a deleterious effect on operating performance. Also, the hardening effect of this element and its effect on the kinetics of precipitation have been intentionally limited in order to maintain a good level of impact toughness.

methode ist die multilineare Regression. Dazu gehören monotone, lineare und kontinuierliche Änderungen der Variablen und Ergebnisse. Ein metallurgisches Verfahren aber, das zugleich hohe Festigkeitswerte und eine gute Zähigkeit erzielen soll, ist das Ergebnis unterschiedlicher, oft gegensätzlicher Wirkungen. Daher wurden die Daten mit einer Neural-Network-Software (neuronalen System) ausgewertet. Dieser Algorithmustyp kann mit einer Gleichung nicht dargestellt werden. Andererseits sind weniger Versuche notwendig, um zu präzisen Ergebnissen zu kommen und er ermöglicht die Simulation komplexer, nicht-linearer und nicht-parametrischer Systeme sowie die Entdeckung von Korrelationen, die durch konventionellere Methoden nicht gefunden werden.

Es ist hier stets zu bedenken, dass die Anzahl der Tests zu gering war, um ein zuverlässiges Ergebnis zu erhalten, auch bei Einsatz eines neuronalen Systems. Aber auf der Grundlage ähnlicher Studien kann festgestellt werden, dass der Algorithmus robust genug ist, um als Einstieg für einen Entwicklungsansatz eingesetzt zu werden. Die erzielten Ergebnisse machen eine nachfolgende, präzisere Bewertung erforderlich. Die geringe Testanzahl kann durch ein Eingrenzen der Bandbreite der Elemente, die eine eindeutige Wirkung auf die mechanischen Eigenschaften haben, ausgeglichen werden:

- Schweißversuche haben gezeigt, dass ein Siliziumgehalt von unter 0,3% die Verarbeitungseigenschaften nicht verschlechtert. Damit wurde auch der Härtungseffekt dieses Elementes sowie seine Auswirkung auf die Kristallisationskinetik absichtlich eingeschränkt, um ein gutes Niveau an Kerbschlagzähigkeit zu halten.

- Control of purity of the constituents of welding consumables enables a maximum value to be set for sulphur (0.006%) and vanadium (0.009%), and to limit the nitrogen content between 40 and 60 ppm and the Bruscato index between 5 and 6. For these last two elements, lower values would be preferable [BONNET 1986 & 1987] [BAILEY1994], but this is difficult to achieve in an industrial context.
- The results associated with specimen 478 show a significant reduction in impact toughness after stress relief, which cannot be attributed to a temper embrittlement phenomenon, since the Bruscato index values remain low. The same test was characterised by a small change in yield strength before and after heat treatment. When exceeding a 0.5% threshold, molybdenum seems to be causing a secondary hardening effect by the formation of carbide-type compounds. Conversely, as added for its hardening effect, molybdenum must exceed a threshold of 0.4%, as shown by tests 347, 341 and 190, in order to ensure a minimum tensile strength of 690 MPa.
- The basic character of these products ensures an oxygen concentration below 250 ppm without difficulty.

Optimisation was carried out by limiting the manganese content between 1.4% and 1.6% to meet the chemical composition requirements of the ASME standard for 11018-type products. Nickel did not appear to have a dominant effect relative to other chemical elements: it was removed from the problem variables, while being kept within the average values of the range recommended by ASME (1.8%). In addition, nickel has a well-known beneficial effect both on impact toughness and yield strength, without the risk of the onset of precipitation. In examining the results, the problem may be simplified by taking into account only yield strength values after heat treatment. In fact, it can be readily concluded that yield strength values without heat treatment are higher than those after treatment and that tensile strength values are closely correlated with yield strength values. According to the same reasoning, a good impact toughness level can be found by taking into account only the values after heat treatment, since in this study, they were almost consistently lower than the as welded values.

Initial data simulation obtained by using the neural network software enabled the following forecast of chemical composition (Table 4).

Two wires were experimentally developed based on the chemical analysis in Table 4, as described. The chemical compositions and corresponding mechanical characteristics are reported in Tables 5 and 6.

- Eine kontrollierte Reinheit der Stoffe, aus denen Schweißzusatzwerkstoffe bestehen, ermöglicht die Festlegung eines Maximalwertes für Schwefel (0,006%) und Vanadium (0,009%) und die Begrenzung des Stickstoffgehaltes auf 40 bis 60 ppm sowie des Bruscato-Faktors auf 5 bis 6. Für die beiden letzten Elemente wären geringere Werte besser [BONNET 1986 & 1987] [BAILEY1994], aber dies ist in einer industriellen Fertigung nur schwer zu erreichen.
- Die Ergebnisse aus der Probe 478 zeigen einen deutlichen Rückgang der Kerbschlagzähigkeit nach Spannungsarmglühen, der nicht auf ein Versprödungsphänomen zurückzuführen sein kann, da der Bruscato-Faktor niedrig bleibt. Bei demselben Test ergab sich eine leichte Änderung in der Streckgrenze vor und nach der Wärmebehandlung. Wenn eine Schwelle von 0,5% überschritten wird, scheint Molybdän durch die Bildung von Karbidverbindungen eine sekundäre Härtung zu verursachen. Andererseits muss Molybdän, wie die Versuche 347, 341 und 190 gezeigt haben, wenn es aufgrund seiner Härtungswirkung eingesetzt wird, die Schwelle von 0,4% überschreiten um eine Mindestzugfestigkeit von 690 MPa zu garantieren.

Table 4: Chemical composition forecast produced by the neural network software

	Optimisation - Optimierung
C (%)	0.08
Si	0.3
Mn (%)	1.58
Cr (%)	0.3
Mo (%)	0.52
V (%)	0.008
N (ppm)	60
Y	5.7
O	200
E0.2 % (TT) calculated - errechnet	734
KV TT -40 °C (TT) calculated - errechnet	60

Tabelle 4: Chemische Analyse, erstellt vom neuronalen Netzwerk

Table 5: Verification of the simulation results; chemical analyses and mechanical characteristics of the optimised products

	R892	369
C	0.11	0.08
Si	0.25	0.25
Mn	1.53	1.51
S	0.003	0.002
Cr	0.28	0.31
Mo	0.5	0.52
Ni	1.87	1.7
V	0.009	0.004
N	38	59
O	260	155
P	0.011	0.009
Sn	0.003	0.002
As	0.002	0.002
Sb	0.0005	0.0005
Y	4.4	3.5

Tabelle 5: Überprüfung der Simulationsergebnisse; chemische Analyse der optimierten Produkte

Table 6: Verification of the simulation results - actual and predicted (in parentheses) mechanical characteristics of the optimised products

	RSC2	369
Rm RS (MPa)	826	826
E0.2 % RS (MPa)	749 (730)	769 (733)
KV RS -40 °C	46 (59)	68 (54)
Rm (MPa)	830	856
E0.2 % (MPa)	771	797
KV -40 °C	83	128

Tabelle 6: Überprüfung der Simulationsergebnisse - tatsächliche und vorhergesagte (in Klammern) mechanische Eigenschaften der optimierten Produkte

der nicht auf ein Versprödungsphänomen zurückzuführen sein kann, da der Bruscato-Faktor niedrig bleibt. Bei demselben Test ergab sich eine leichte Änderung in der Streckgrenze vor und nach der Wärmebehandlung. Wenn eine Schwelle von 0,5% überschritten wird, scheint Molybdän durch die Bildung von Karbidverbindungen eine sekundäre Härtung zu verursachen. Andererseits muss Molybdän, wie die Versuche 347, 341 und 190 gezeigt haben, wenn es aufgrund seiner Härtungswirkung eingesetzt wird, die Schwelle von 0,4% überschreiten um eine Mindestzugfestigkeit von 690 MPa zu garantieren.

- Die basischen Eigenschaften dieser Produkte stellen eine Sauerstoffkonzentration von <250 ppm problemlos sicher.

Um die Vorgaben des ASME-Codes an die chemische Analyse von 11018-Produkten zu erfüllen, bezog sich die Optimierung auf die Begrenzung des Mangengehalts auf 1,4% bis 1,6%. Nickel schien im Vergleich zu anderen chemischen Elementen keine wesentliche Auswirkung zu haben. Es wurde deshalb aus den Problem-Variablen herausgenommen, wobei seine Durchschnittswerte allerdings innerhalb des von ASME empfohlenen Bereichs (1,8%) gehalten wurden. Außerdem ist bekannt, dass Nickel sich günstig auf Kerbschlagzähigkeit und Streckgrenze auswirkt, ohne das Risiko von Ausscheidungen. Hinsichtlich der Ergebnisse ist eine Vereinfachung des Problems möglich, indem die Werte der Streckgrenze nach Wärmebehandlung herangezogen werden. Es ist nämlich leicht festzustellen, dass die Streckgrenze ohne Wärmebehandlung höher ist als nach einer Wärmebehandlung und dass die Zugfestigkeit eng mit der Streckgrenze zusammenhängt. Nach der gleichen Überlegung kann eine gute Kerbschlagzähigkeit nur erreicht werden, wenn die Werte nach Wärmebehandlung herangezogen werden, denn in dieser Untersuchung waren sie fast durchgängig niedriger als im unbehandelten Zustand.

Eine erste Datensimulation mit dem neuronalen Netzwerk ergab folgende Analyse-Vorhersage (Tabelle 4).

Zu Versuchszwecken wurden zwei Drähte auf Grundlage der chemischen Analyse in Tabelle IV, wie beschrieben, hergestellt. Die chemische Analyse und die mechanischen Eigenschaften finden Sie in den Tabellen 5 und 6.

Despite the small number of tests, the forecast produced by the neural network system enables products to be defined with characteristics that meet the minimum requirements for welding S690 steels.

The mechanical properties were obtained by performing chemical balancing corresponding to the following contents: 0.25-0.3% chromium, 0.45-0.5% molybdenum, ~1.5% manganese and carbon close to 0.09%. Utilisation of a neural network system enables fast optimisation and cost effective testing. In contrast, the disadvantage is that it does not enable a metallurgical interpretation of the results obtained. Additional tests will therefore be necessary in order to understand the metallurgical causes of the optimisation process. Neural systems are based on the principle of self-learning: in order to work, they need a minimum number of tests, so that the addition of further results progressively increases the accuracy of their prediction. Addition of further tests in the future will enable "liberating" some of the variables from the range limits defined in this paper, thereby exploring their effects on the mechanical characteristics in a broader perspective. The desired results can certainly be achieved by more than a single solution. It will then be possible to propose other chemical compositions that will reflect a different compromise among the various metallurgical processes that are involved.

RECOMMENDATIONS FOR THE USE OF RUTILE CORED WIRES FOR WELDING HIGHER YIELD STRENGTH STEELS

The significant reduction in residual elements associated with raw materials as well as the selection of strips or tubes used in the production of rutile flux cored wires has enabled high levels of impact toughness at -40 °C to be attained in recent years. Accordingly, the use of such rutile flux cored wires has become widespread in a number of applications due to their productivity and ease of operation, not only at the expense of MMA electrodes but also of basic flux cored wires. Using chemical optimisations, as described in the previous section, it is also possible to reach high levels of yield strength or tensile strength. However, these characteristics can only be obtained using welding conditions which are somewhat restrictive.

The objective of this third section is to show that there may be incompatibilities between the results obtained using all-weld metal welds, as the certification bodies require manufacturers of welding consumables to characterise their products, and the qualification of operational welding procedures by the fabricator.

Unlike basic flux systems, rutile-containing consumables transfer titanium into the weld. Titanium is well known as a very strong hardening agent. Accordingly, in order to achieve a yield strength of 690 MPa for example, the amount of alloying elements such as chromium or molybdenum to be added to a weld would be quite different from that described above. An illustration of this effect is presented in Table 7, where

Trotz der geringen Anzahl an Versuchen ermöglichen es die Vorausberechnungen des neuronalen Systems Produkte zu definieren, die die Mindestanforderungen zum Schweißen von S690 Stählen erfüllen.

Die mechanischen Eigenschaften wurden mit folgender Analyse erreicht: 0,25-0,3% Chrom, 0,45-0,5% Molybdän, ~1,5% Mangan und ca. 0,09% Kohlenstoff. Der Einsatz eines neuronalen Systems ermöglicht eine schnelle Optimierung und kosteneffektive Versuche. Der Nachteil dabei ist jedoch, dass eine metallurgische Interpretation der erzielten Ergebnisse nicht möglich ist. Daher werden zusätzliche Versuche notwendig sein, um die metallurgischen Ursachen des Optimierungsprozesses zu verstehen. Neuronale Systeme beruhen auf dem Prinzip des Selbstlernens. Damit sie funktionieren, bedarf es einer Mindestanzahl an Versuchen, so dass das Hinzufügen weiterer Ergebnisse die Genauigkeit der Vorhersagen erhöht. Durch weitere Versuche wird es möglich sein, die hier gemachten Einschränkungen einiger Variablen aufzuheben und damit ihre Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften auf einer breiteren Basis untersuchen zu können. Es gibt sicher mehrere Lösungen, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Auch andere chemische Zusammensetzungen können vorgeschlagen werden, die dann einen anderen Kompromiss zwischen den verschiedenen metallurgischen Prozessen darstellen.

EMPFEHLUNGEN ZUR VERWENDUNG RUTILER FÜLLDRÄHTE ZUM SCHWEISSEN HÖHERFESTER STÄHLE

Eine wesentliche Reduzierung der Verunreinigungen bei den Rohstoffen, der Auswahl des Bandstahl- oder des Rohmaterials für die Herstellung von rutilen Fülldrähten hat in den letzten Jahre dazu geführt, hohe Kerbschlagzähigkeiten bei -40 °C zu erreichen. Aus diesem Grund und wegen der guten Verarbeitungsbedingungen und Produktivität werden heute anstelle von Stabelektroden oder basischen Fülldrähten bei einer Reihe von Anwendungen rutiler Fülldrähte eingesetzt. Durch Optimierungen der chemischen Zusammensetzung wie weiter oben beschrieben ist es auch hier möglich, höhere Streckgrenzen und Zugfestigkeiten zu erreichen. Allerdings können diese Eigenschaften nur unter genau festgelegten Schweißbedingungen erzielt werden.

Im dritten Teil soll nun gezeigt werden, dass zwischen den Ergebnissen, die an reinen Schweißgütern (ohne Aufmischung) erzielt werden und den praxisnahen Verfahrensprüfungen durchaus Diskrepanzen bestehen können.

Anders als bei basischen Fülldrähten kommt es bei rutilhaltigen Typen zu einem Titan-Zubrand in der Schweißnaht. Titan ist als starkes Härtungselement bekannt und dementsprechend wäre der Anteil der Legierungselemente wie Chrom oder Molybdän, die zur Erreichung einer Streckgrenze von 690MPa zugegeben werden müssen, ein ganz anderer als der oben beschriebene. Tabelle 7 illustriert diesen Effekt. Hier wird die chemische Zusammensetzung einer Schweißverbindung, die mit einem rutilen Fülldraht hergestellt wurde, mit UP-Schweißnähten verglichen, die mit einer Draht-/Pulver Kombination aus basischem Pulver und

Table 7: Comparison of chemical compositions and mechanical properties between rutile and basic systems

	28HL6	28HL3	28HL5	347	341	RSC2	159
Es (KJ/cm)	17.5	17.5	17.5	21.7	21.7	21.7	21.7
C (%)	0.061	0.064	0.07	0.089	0.079	0.11	0.082
Si (%)	0.38	0.39	0.41	0.25	0.3	0.25	0.32
Mn (%)	1.38	1.29	1.63	1.36	1.48	1.53	1.66
Cr (%)	0	0	0	0.23	0.25	0.28	0.32
Mo (%)	0.068	0.15	0.22	0.4	0.43	0.5	0.38
Ni (%)	1.74	1.78	1.71	1.43	1.57	1.87	1.33
Ti (%)	0.046	0.046	0.045	0.006	0.006	0.006	0.006
N (ppm)	32	31	32	65	69	38	32
Rm (MPa)	662	718	762	770	746	830	799
E0.2% (MPa)	593	667	698	756	677	771	692
KV -40 °C	109	73	74	118	105	83	109.3

Tabelle 7: Vergleich chemische Analyse und mechanische Eigenschaften zwischen rutilen und basischen Zusätzen

the chemical composition of a weld made with a rutile flux cored wire is compared with submerged arc welds, welded using a basic flux, in combination with a metal cored wire. The level of mechanical properties was similar, despite a zero chromium content, half the molybdenum content and lower carbon values. This similarity of mechanical properties can only be explained by the increase in the titanium concentration from 60 to 450 ppm. It is also interesting to note the extremely powerful effect of molybdenum on the mechanical properties: an increase from 0.07 to 0.22% is sufficient to increase the tensile strength by 100 MPa. These results illustrate the wide variation in mechanical properties at even small changes in chemical composition. Accordingly, the dilution of the base metal into the weld metal must also be taken into consideration. Table 7 illustrates this effect through the characterisation of a rutile flux cored wire without dilution, and in welded joints that are representative of those made by fabricators. The welding consumables must conform to the yield strength limits imposed by the construction codes and measured on all weld metal deposits. Tests performed using basic welding consumables have demonstrated that the mechanical properties of welds were obtained with chemical compositions similar to those of steels. Due to the powerful hardening effect of titanium and molybdenum, rutile products enable properties to be achieved via a quite different chemistry in the weld metal than in the base metal.

Conversely, dilution of the base metal into the weld joint contributes to chromium or molybdenum content in more or less small amounts. According to the tests reported in Table 5, a gain of 95 MPa was obtained by the addition of 0.07% molybdenum, 0.02% carbon and 0.2% chromium. Proposed certification based on representative weld joints would enable reducing the excessive alloying necessary for the all weld metal test. For example, a rutile flux cored wire certified for S600 steel, when used in weld joints, may offer properties that are sufficient to comply with the requirements of S690 steels, both regarding the yield strength and impact toughness at -40 °C after heat treatment. Another wire approved for S690 steel may provide a tensile strength in weld joints that is higher by some 100 MPa than that of the all weld metal. A general trend shows that increasing one of the two properties represented by tensile strength and toughness is achieved to the detriment of the other. High yield strength steels are no exception to this rule, as shown in Figure 2.

Failure to take such differences into account in product certification has caused fabricators to use basic welding consumables, which are detrimental in terms of productivity,

Metallpulverfülldraht hergestellt wurden. Obwohl das Schweißgut kein Chrom- und nur die Hälfte des Molybdän-Gehaltes bei gleichzeitig niedrigeren Kohlenstoffwerten aufweist, ist das Niveau der mechanischen Eigenschaften ähnlich. Diese Ähnlichkeit der mechanischen Eigenschaften kann nur mit der Erhöhung des Titan-Gehaltes von 60 auf 450ppm erklärt werden.

Die ausgesprochen starke Wirkung von Molybdän auf die mechanischen Eigenschaften ist sehr interessant: Eine Erhöhung von 0,07 auf 0,22% reicht aus, um die Zugfestigkeit um 100MPa zu steigern.

Die Ergebnisse zeigen die starken Veränderungen bei den mechanischen Eigenschaften bei nur geringfügigen Änderungen in der chemischen Zusammensetzung. Daher hat die Aufmischung des Grundwerkstoffes in das Schweißgut einen großen Einfluss und muss entsprechend berücksichtigt werden. Tabelle VIII zeigt diesen Effekt anhand eines Analysenvergleiches zwischen reinem Schweißgut und der Verbindungsschweißung an einer praxisnahen X-Naht mit einer rutilen Fülldrahtelektrode.

Die Schweißzusatzwerkstoffe müssen die von den Konstruktionsvorschriften geforderten Streckgrenzen im reinen Schweißgut erfüllen. Bei den Versuchen mit basischen Zusatzwerkstoffen zeigte sich, dass die mechanischen Eigenschaften der Schweißnähte durch eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie die der Stähle erzielt wurden. Aufgrund der starken Härtungswirkung von Titan und Molybdän können die mechanischen Eigenschaften bei rutilen Zusätzen mit chemischen Zusammensetzungen erreicht werden, die sich von denen des Grundwerkstoffes deutlich unterscheiden. Andererseits führt die Aufmischung des Grundwerkstoffes in die Schweißnaht zur Bildung von mehr oder weniger geringen Gehalten an Chrom und Molybdän. Gemäß den Versuchen in Tabelle V wurde durch die Zugabe von 0,07% Molybdän, 0,02% Kohlenstoff und 0,2% Chrom eine Steigerung von 95 MPa erzielt.

Bei einer Produktauswahl auf der Basis repräsentativer Schweißverbindungen wäre es möglich, die „Über-Legierung“, die für das Erreichen der Werte im reinen Schweißgut notwendig ist, zu verringern. Zum Beispiel könnte ein rutiler Fülldraht, der für den Stahltyp S 600 zugelassen ist, in Schweißverbindungen Werte erreichen, die ausreichen würden, um die Anforderungen für S690 Stähle zu erfüllen, und zwar sowohl bei der Streckgrenze als auch bei der Kerbschlagzähigkeit bei -40 °C nach Wärmebehandlung. Ein anderer Draht, der für S690 Stähle zugelassen ist, könnte in Schweißverbindungen eine Zugfestigkeit erreichen, die einige 100 MPa über der des reinen Schweißguts liegt. Ein allgemeiner Trend zeigt, dass die Erhöhung einer der beiden Eigenschaften Zugfestigkeit und Zähigkeit zu Lasten der anderen geht. Wie Bild 2 zeigt, bilden hochfeste Stähle keine Ausnahme von dieser Regel.

Wenn diese Unterschiede bei der Produktauswahl nicht berücksichtigt werden, führt dies dazu, dass die Hersteller bei Grundwerkstoffen mit

Table 8: Chemical compositions and mechanical properties obtained using a rutile flux cored wire (CITOFLEX R82SR) according to the following welding conditions (X-weld joint geometry, bevel angle 60°, thickness 38 mm, welded vertically up, base metal NQ1)

	All Weld Metal Reines Schweißgut	X-Joint (high zone) X-Naht (oberer Bereich)	Steel - Stahl (NQ1) YS >550 MPa
C (%)	0.066	0.083	0.15
Si (%)	0.35	0.34	0.24
Mn (%)	1.5	1.3	0.32
Cr (%)	0.043	0.25	1.45
Mo (%)	0.009	0.079	0.4
Ni (%)	0.92	1.09	2.77
Ti (%)	0.057	0.046	0.003
Rm (MPa)	641	736	-
E0.2% (MPa)	591	681	-
KV 50 °C	137	47	-

Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften bei Einsatz eines rutilen Fülldrahtes (CITOFLEX R82SR) mit folgenden Schweißbedingungen: X Nahtgeometrie, Nahtvorbereitung 60°, Stärke 38mm, Schweißposition senkrecht steigend, Grundwerkstoff NQ1

Fig. 2: Changes of the yield strength at 0.2% and the impact toughness at -40 °C after heat treatment, for S690 steel-type welds

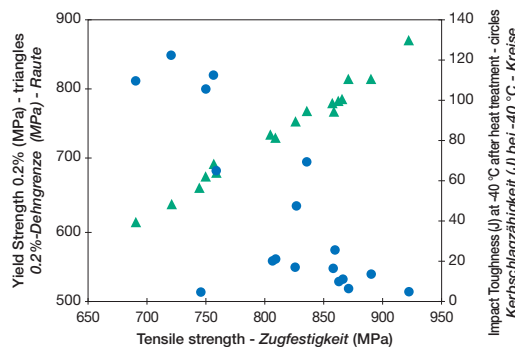


Bild 2: Änderungen 0,2%-Dehngrenze und der Kerbschlagzähigkeit bei -40 °C bei Schweißnähten an Stählen des Typs S690 nach Wärmebehandlung

for steel grades with demanding mechanical properties, whereas the deposition rate of a rutile flux cored wire can be 50% higher than that of a basic flux cored wire. In addition, welders would also benefit from products that offer highly superior operating characteristics.

CONCLUSIONS

This article discusses some of the difficulties encountered in welding higher yield strength steels. The hydrogen level introduced by the choice of welding consumables for a given yield strength should be as low as possible in order to limit the application of pre-heat and post-weld heat treatments. An increase in tensile strength is conducive to the formation of microstructures that are proportionately more sensitive to the phenomenon of hydrogen induced, cold, cracking: a choice of welding consumables characterised by very low diffusible hydrogen for a given level of stress enables either a reduction in the conditions of the pre-heat or post-weld heat treatment or a widening of the applicable range of welding parameters. The development of products in recent years, both in the selection of raw materials and in the choice of packaging types, has enabled a considerable reduction of preheat and post-weld heat treatment temperatures. Currently, in some cases, this temperature is equally determined either by the weld metal or by the steel.

Using a neural network-type modelling and optimisation system has enabled the formulation and subsequently validation of a chemical composition suitable for S690-type steel, welding with or without heat treatment, based on a limited number of tests. The advantage of such systems is therefore the capability to develop welding consumables in a short time. Conversely, they do not enable the representation of the processes studied by an equation. Therefore the metallurgical interpretation of the role of each chemical element requires further test work. For example, the role of manganese on the kinetics of temper embrittlement may be highlighted by a set of widely different cooling rates at the end of the heat treatment cycle. Compliance with the proposed analytical ranges in making welded joints becomes much easier if the mechanical properties are achieved by alloying elements with similar roles both in the weld metal and in the steel.

This paper also discusses the difficulty in using rutile consumables for welding high yield strength steels. The analytical constraints required for simultaneously achieving yield strengths that also comply with high levels of impact toughness, are incompatible with characterisations that are performed at the same time on all weld metal and on welded joints. The hardening role of titanium should be taken into account as it involves smaller additions of alloying elements compared to basic flux systems. Taking into consideration the dilution of the base metal in the weld by welding joints for product certification would enable the use of rutile-cored wires and would have the benefit of both higher productivity and increased operator comfort.

hohen mechanischen Gütewerten basische Zusatzwerkstoffe einsetzen, die sich nachteilig auf die Produktivität auswirken, denn die Abschmelzleistung eines rutilen Fülldrahtes kann 50% über der eines basischen Fülldrahtes liegen. Außerdem würden die Schweißer von Produkten mit deutlich besseren Schweißigenschaften profitieren.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag werden einige der Schwierigkeiten beim Schweißen hochfester Stähle behandelt. Der Wasserstoffgehalt, der durch den Zusatzwerkstoff eingebracht wird, sollte - in Abhängigkeit von der Streckgrenze - so gering wie möglich sein, um Vorwärmen und Wärmenachbehandlungen weitestgehend zu vermeiden. Durch eine Erhöhung der Zugfestigkeit entstehen Mikrogefüge, die empfindlicher gegenüber Wasserstoff induzierten Kaltrissen sind. Die Wahl von Schweißzusatzwerkstoffen mit einem geringen Wasserstoffgehalt für ein bestimmtes Spannungsniveau führt entweder zu einer Reduzierung der Temperatur beim Vorwärmen oder Nachwärmen oder zu einer breiteren Spanne bei der Wahl der einsetzbaren Schweißparameter. In den letzten Jahren führte die Entwicklung der Zusatzwerkstoffe, sowohl bei der Auswahl der Rohstoffe als auch der Verpackungstypen zu einer beträchtlichen Senkung der Temperaturen beim Vorwärmen und Nachwärmen. Heute lässt das Schweißgut oft die gleichen Temperaturen zu wie der Grundwerkstoff.

Durch den Einsatz eines neuronalen Netzwerks zur Simulation und Optimierung konnte mit einer begrenzten Anzahl von Versuchen zunächst eine Formel entwickelt und dann bestätigt werden, deren chemische Analyse für das Schweißen des Stahles S690 geeignet ist. Der Vorteil solcher Systeme ist also die Möglichkeit, in kurzer Zeit Schweißzusatzwerkstoffe zu entwickeln. Andererseits lassen sich die untersuchten Prozesse nicht als Gleichung darstellen. Daher bedarf die metallurgische Interpretation der Wirkung jedes chemischen Elementes weiterer Versuche. Die Wirkung von Mangan auf die Kinetik der Anlassversprödung kann zum Beispiel durch eine Versuchsreihe mit unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten nach dem Wärmebehandlungszyklus ermittelt werden. Die Einhaltung der vorgegebenen Analyse-Spannen bei der Herstellung der Schweißverbindungen wird vereinfacht, wenn die mechanischen Eigenschaften durch Legierungselemente erreicht werden, die im Schweißgut und im Stahl ähnliche Aufgaben erfüllen.

Außerdem befasst sich diese Arbeit mit den Schwierigkeiten beim Einsatz rutiler Zusatzwerkstoffe für hochfeste Stähle. Die Anforderungen an die chemische Zusammensetzung zum Erreichen hoher Streckgrenzen und gleichzeitig hoher Kerbschlagzähigkeiten, sowohl im Schweißgut als auch an den Schweißverbindungen, sind nicht in Übereinstimmung zu bringen. Die Härteigenschaften von Titan müssen berücksichtigt werden, da hierdurch weniger Elemente zulegiert werden müssen als bei basischen Produkten. Die Berücksichtigung der Aufmischung des Grundwerkstoffs in die Schweißnaht bei der Herstellung von Verbindungsnahten könnte die Verwendung von rutilen Fülldrähten möglich machen und sowohl die Produktivität erhöhen als auch die Schweißigenschaften für die Schweißer positiv beeinflussen.

C. BONNET - B. LEDUEY - P. ROUAULT

AIR LIQUIDE - CTAS Technical Centre for Welding Applications (CTAS)

13 - 17, Rue d'Epluches - 95310 Saint Ouen l'Aumône France

Tel.: 33 1 34 21 30 47- Fax:33 1 34 21 30 34 - E-mail: bruno.leduey@airliquide.com

BIBLIOGRAPHY: / LITERATURHINWEISE:

- BRUSCATO, R.M., 1997 - Proceeding of ASTM Conference, Miami Florida, Nov.1987
GRANJON, H, MURRY,G - Soudage et Techniques Connexes, 1984, No. 9/10, p. 350.
BAILEY, N, 1994 - In book: Weldability of ferritic steels, Abington Publishing, 1994, chap 10, p214
BONNET, C, GASPARD ANGELLI, A, 1986 - Soudage et Techniques Connexes, May-June 1986
BONNET, C, 1987 - Techniques de l'Ingénieur, M1365, 1987

- INSTITUT DE SOUDURE FRANÇAIS, DEBIEZ,S, GAILLARD,R, MALTRUD,F, 1991
Report no. 27 212, July 1991.
IRSID 1977 - Handbook "Courbes de dureté / paramètres de refroidissement en conditions de soudage", Publications de l'IRSID, 1977, p. 25
LEDUEY, B, BONNET,C, DAMAGNEZ,P, 1992 - Soudage et Techniques Connexes p 15, July - August 1992

The Influence of Chemical Analysis on the Tensile Strength of Nickel Base Weld Metal for 9% Nickel Cryogenic Steel Applications.

9% nickel cryogenic steels are usually welded with ErNiCrMo 3, 4 or 6 nickel filler materials because a high level of toughness at cryogenic temperatures (-196 °C) is difficult to achieve with ferritic filler materials. The correct choice of welding consumable, either austenitic steel or nickel alloy, is driven by the tensile strength properties of 9% nickel steels which, according to ASTM, exhibits a minimum level of 690 MPa. This corresponds to the highest range of tensile strength for nickel base alloys. This usually results in a discrepancy between the requirements of welding specifications and the mechanical properties of filler materials.

ErNiCrMo 6, is a less expensive nickel base alloy which is the most often used, and is characterised by the lower mechanical properties when compared with ErNiCrMo3 or 4. In the first part of this paper, different chemical compositions of all weld metal which could lead to an increase of tensile strength are reviewed. Starting from an austenitic structure, one solution is the modification of the crystallographic cell. This could be by substituting a middle size atom such as nickel with a larger one such as tungsten or molybdenum. It is also possible to achieve metal hardening by the precipitation of intermetallics or carbonitrides which reduce dislocation displacements. Mechanical properties measured on all weld metal deposits are given.

In a second part, a recent example of welding with the OERLIKON Freezal ENi9 (ErNiCrMo6) MMA electrode is detailed.

Key words

- Cryogenic steels welding
- Ultimate tensile strength
- Chemical analysis
- Heat input
- Cooling rate
- Work hardening
- M.M.A

Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf die Zugfestigkeit von Nickel-Basis-Schweißgütern bei kaltzähen Anwendungen mit 9% Nickel-Stahl.

Schlüsselwörter

- Schweißen von kaltzähem Stahl
- Zugfestigkeit
- Chemische Zusammensetzung
- Wärmeeintrag
- Abkühlrate
- Kaltverfestigung
- Stabelektrode

Kaltzähe Stähle mit 9% Nickel werden normalerweise mit Nickel-Schweißzusätzen des Typs ErNiCrMo 3, 4 oder 6 verschweißt, da eine hohe Zähigkeit bei sehr tiefen Temperaturen (-196 °C) mit ferritischen Zusätzen schwer zu erreichen ist. Die richtige Auswahl des Zusatzwerkstoffes – ob austenitisches Material oder Nickellegierungen – wird von der Zugfestigkeit der 9%-Nickel Stähle bestimmt, die nach ASTM ein Mindestniveau von 690 MPa haben. Dies entspricht dem maximalen Zugfestigkeitsbereich bei Nickel-Basislegierungen und bedeutet häufig eine Diskrepanz zwischen den Spezifikationsanforderungen und den erreichbaren mechanischen Gütewerten der Schweißzusätze.

ErNiCrMo6 ist die am häufigsten verwendete, etwas preiswertere Nickel-Basis-Legierung und verfügt über schlechtere mechanische Gütewerte als zum Beispiel ErNiCrMo 3 oder 4. Im ersten Teil dieser Arbeit werden verschiedene chemische Zusammensetzungen von Schweißgütern beschrieben, die zu einer Steigerung der Zugfestigkeit führen sollen. Ausgehend von der austenitischen Struktur ist die Modifizierung der kristallographischen Zelle eine Lösungsmöglichkeit. Dies geschieht durch den Ersatz eines mittelgroßen Atoms wie Nickel durch ein größeres Atom wie Wolfram oder Molybdän. Es ist also möglich, durch das Ausscheiden von intermetallischen Verbindungen oder Carbonitriden einen Härtungseffekt im Metall zu erzielen, der die Versetzungsbewegung verringert. Die mechanischen Eigenschaften aller Schweißgüter werden ebenfalls angegeben.

Im zweiten Teil wird auf ein Anwendungsbeispiel mit der OERLIKON Stabelektrode Freezal Ni 9 eingegangen.

The results presented in the first part of this paper were first published in the Eurojoin 3 conference [1]. A second paper will be published in OERLIKON Competence dealing with solutions to reduce the propensity to hot cracking and the influence of the welding parameters on tensile strength when welding 9% nickel cryogenic steels, focusing on the SAW process.

INTRODUCTION

The welding of 9% nickel steels generally involves nickel base filler materials. In fact, it is difficult to obtain satisfactory weld metal toughness at -196 °C with ferritic filler materials. Choosing austenitic material results in a difficulty: construction codes generally require the yield strength and ultimate tensile strength of the weld metal to match or exceed that of the base metal. 9% nickel steel specifications require a minimum tensile strength of 690 MPa. The mechanical properties of austenitic stainless steels are too low and generally nickel base alloys such as ErNiCrMo3, ErNiCrMo4 or ErNiCrMo6 are chosen (Table 1) because their mechanical properties may match the required codes and specifications.

It can be seen in Table 1 that ErNiCrMo6 exhibits the lowest ultimate tensile strength of the three grades. The main applications of 9% nickel steels are for the storage of liquid gases (tanks, vessels...). Such constructions are built using two main types of welds: flat and horizontal/vertical welds which are generally carried out using the submerged arc process with welds made in the vertical up position usually being produced with MMA electrodes. On the other hand, there are usually cost constraints when choosing a nickel base MMA electrode. In fact, ErNiCrMo6 type MMA electrodes are produced on nickel core wire, with alloying elements being introduced by the coating, while the ErNiCrMo4 and ErNiCrMo3 types are produced on nickel alloy core wires. This generally results in ErNiCrMo6 MMA electrodes being the most cost effective composition. The final choice is thus determined by the balance of cost / mechanical properties. The purpose of this paper is to investigate the possibility to increase mechanical properties by the chemical balance of alloying elements in accordance with the requirements of the ErNiCrMo6 specification.

INFLUENCE OF CHEMICAL ANALYSIS ON ULTIMATE TENSILE STRENGTH

The different chemical mechanisms for hardening a material are well known [3]. Two of them will be investigated in this paper. The first one is based on the introduction of foreign atoms into the crystallographic unit cell. It may be through solid solution substitutions; the foreign atoms introduced are metallic and their atomic radius is selected to be as different as possible from the size of the nickel atom. Increasing the content of alloying elements which are well known to be precipitation formers is a second solution. Precipitation forming can also be effective due to these elements increasing the kinetics of precipitation.

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden zum ersten Mal bei der Eurojoin 3 Conference [1] veröffentlicht. In OERLIKON Competence wird ein zweiter Beitrag veröffentlicht werden, der speziell für das UP-Schweißen Lösungen zur Verringerung von Heißrissen aufzeigt, sowie den Einfluss der Schweißparameter auf die Zugfestigkeit beleuchtet.

EINLEITUNG

Zum Schweißen von 9%-Nickel Stählen werden im Allgemeinen Nickel-Basis-Zusätze eingesetzt. Es ist schwierig, mit ferritischen Zusätzen eine zufrieden stellende Zähigkeit bei -196 °C zu erreichen. Bei der Verwendung austenitischer Materials ergibt sich eine Schwierigkeit: Die Bauvorschriften fordern normalerweise, dass die Streckgrenze und die Zugfestigkeit des Schweißguts das Niveau des Grundwerkstoffs erreichen oder übertreffen. Spezifikationen für 9% Nickel-Stahl fordern eine Mindest-Zugfestigkeit von 690MPa. Die mechanischen Güterwerte von austenitischen rostfreien Materialien erreichen das nicht und üblicherweise werden dann Nickel-Basis-Legierungen wie ErNiCrMo3, ErNiCrMo4 oder ErNiCrMo6 eingesetzt (Tabelle 1), da deren mechanische Eigenschaften die geforderten Codes und Spezifikationen meist erfüllen.

Table 1: Chemical analysis and mechanical properties of nickel base alloys typically used for the welding of 9% Ni steels [2]

	ErNiCrMo 3	ErNiCrMo 4	ErNiCrMo 6
C	0.1	0.02	0.1
Mn	1	1	2 - 4
Fe	7	4 - 7	10
Si	0.75	0.2	1
Cu	0.5	0.5	0.5
Ni	55 min	-	55 min
Co	-	2.5	-
Cr	20 - 23	14.5 - 16.5	12 - 17
Nb	3.15 - 4.15	-	0.5 - 2
Mo	8 - 10	15 - 17	5 - 9
W	-	3 - 4.5	1 - 2
Rm	760	690	620

Table 1: Chemische Analyse und mechanische Güterwerte von Nickel-Basis-Legierungen, die typischerweise für das Schweißen von 9% Nickel -Stählen [2] eingesetzt werden

Tabelle 1 zeigt, dass ErNiCrMo6 den niedrigsten Zugfestigkeitswert der drei Typen aufweist. Im Wesentlichen wird 9%-Nickel Stahl bei der Lagerung von Flüssiggasen (Tanks, Kessel, etc.) eingesetzt. Diese Behälter werden hauptsächlich mit zwei Schweißnahttypen/-positionen gebaut: Stumpfnähte in PA- und PC-Position. Diese Schweißung erfolgt normalerweise im UP-Verfahren, während zum Schweißen in steigender Position gewöhnlich eine Stabelektrode verwendet wird. Allerdings gibt es bei der Auswahl einer Nickel-Basis-Elektrode oft Kostenzwänge. Stabelektroden des Typs ErNiCrMo6 werden mit einem Nickel-Kerndraht hergestellt und die weiteren Legierungselemente über die Umhüllung eingebracht, während die ErNiCrMo4 und ErNiCrMo3 Typen Kerndrähte aus einer Nickel-Legierung haben. Daher sind Stabelektroden des Typs ErNiCrMo6 kostengünstiger zu fertigen. Letztendlich wird die Auswahl also durch einen Kompromiss zwischen Kosten und mechanischen Güterwerten bestimmt. Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, ob die mechanischen Eigenschaften durch eine bestimmte chemische Zusammensetzung - innerhalb der Grenzen der ErNiCrMo6 Spezifikation - verbessert werden können.

EINFLUSS DER CHEMISCHEN ANALYSE AUF DIE ZUGFESTIGKEIT

Die unterschiedlichen chemischen Möglichkeiten, die beim Härten eines Werkstoffes greifen, sind bestens bekannt [3]. Zwei davon werden in dieser Arbeit untersucht. Die erste beruht auf der Einführung eines fremden Atoms in die kristallographische Einheitszelle, zum Beispiel durch Substitution bei festen Lösungen (Mischkristallhärtung). Die eingeführten Fremdatome sind Metalle und ihr Atomradius wird so gewählt, dass der Größenunterschied zum Nickelatom möglichst groß ist. Die Erhöhung des Anteils an Legierungselementen, die als Ausscheidungsbildner bekannt sind, ist die zweite Möglichkeit (Ausscheidungshärtung). Das Bilden von Ausscheidungen kann ebenfalls durch Elemente verbessert werden, die die Ausscheidungskinetik positiv beeinflussen.

Variations in chemical composition have been investigated with the manufacture of a range of MMA electrodes with different molybdenum, tungsten, carbon, and niobium contents. These MMA electrodes were 4mm diameter. They were all welded with the same welding conditions. The resulting all weld metals have been characterised in terms of chemical analysis, as well as toughness and tensile properties. The results are summarised in table 2.

Verschiedene chemische Zusammensetzungen wurden bei der Herstellung einer Reihe von Elektroden mit unterschiedlichen Anteilen an Molybdän, Wolfram, Kohlenstoff und Niob untersucht. Diese Stabelektroden hatten einen Durchmesser von 4mm und wurden alle unter denselben Schweißbedingungen verarbeitet. Die entsprechenden Schweißgüter wurden chemisch und mechanisch (Zähigkeit und Zugfestigkeit) geprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Table 2: Chemical analysis and mechanical characterisations of all weld metal deposits which indicate out the role of substitutional and precipitation promoting alloying elements

A02	Effect of substitutional atoms on UTS Einfluss der Substitutionsatome auf die UTS				Effect of precipitation forming elements on UTS Einfluss der Ausscheidungsbildner auf die UTS								Effect of tungsten and molybdenum atoms on precipitation kinetics and related effect on UTS Einfluss von Wolfram- und Molybdänatomen auf die Ausscheidungskinetik und auf die UTS					
	A26	A31	A35	A37	A10-2	A12-2	A29	A27	A30	A32	A21	A36	A34	A33	A32	A24		
C	0.04	0.06	0.06	0.03	0.03	0.06	0.07	0.07	0.07	0.09	0.06	0.4	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	
Si	0.29	0.3	0.22	0.15	0.13	0.31	0.3	0.27	0.35	0.25	0.27	0.33	0.25	0.22	0.29	0.27	0.45	
Mn	3.2	3.1	3	3.1	3.2	3.1	3	3	3.1	3.5	3	4.4	3.2	3	3.1	3	3.1	
Fe	9.5	10.9	10.1	9.7	9.7	9.3	9.3	11.3	10.5	9.9	10.3	10.7	10.1	10.3	9.7	10.3	11	
Cr	11.6	12.7	12.4	13	13.5	12.7	12.5	12.3	12.6	11.7	12	11.2	12.9	11.9	12.2	12	12.7	
Mo	6.5	5.9	7.4	6.7	6.9	6.2	7.3	5.9	5.9	7.3	7.1	6.1	6.5	9.4	7.1	7.1	5.9	
W	1.1	1.4	1.8	1.6	0.02	1.4	1.37	1.4	1.5	1.3	1.3	1.5	0.06	1.3	0.05	1.3	1.5	
Nb	1.1	1.3	1.3	0	0	1.1	1.1	1.4	1.5	1.3	1.9	1.4	1.3	1.3	1.6	1.9	1.4	
O (ppm)	277	230	Nm	Nm	Nm	252	262	190	200	Nm	Nm	190	Nm	Nm	Nm	Nm	220	
N (ppm)	194	124	Nm	Nm	Nm	184	179	151	124	Nm	Nm	127	Nm	Nm	Nm	Nm	134	
UTS (MPa)	691	694	695	637	645	661	670	714	711	717	717	753	664	706	669	717	703	
YS 0.2 % (MPa)	433	445	456	405	425	444	451	455	457	472	450	519	423	445	439	450	464	
Kv -196 °C	84	62	67	42	111	67	66	74	63	43	63	21	88	60	83	63	55	

Tabelle 2: Chemische Analyse und mechanische Gütewerte der Schweißgüter, aus denen der Einfluß der Legierungselemente auf Substitution und Ausscheidungen hervorgeht

Effect of substitutional atoms on UTS

According to the chemical analysis of the ErNiCrMo6 composition, molybdenum and tungsten are the two alloying elements which exhibit the largest difference in atomic size when compared with nickel. A variation in niobium has been excluded in this part of the test programme because it very easily forms precipitates with carbon and metallic elements. Thus, it could be difficult to interpret the complex role of this element on hardening with a mixture of both substitutional and precipitation mechanisms.

The A02 chemistry is the existing chemistry that this paper targets to optimise.

The A31 all weld metal characterisation corresponds to a higher level of both molybdenum and tungsten when compared with A26: increasing simultaneously the molybdenum content from 5.9% to 7.4% and the tungsten content from 1.4% to 1.8% had no effect on ultimate tensile strength. This shows that substitutional additions have a minor effect on mechanical properties. The A35 and A37 deposits include a low level of carbon (0.03%) and do not contain niobium. Together, these two elements are well known to be strong precipitate formers. Therefore, the effect of substitutional atoms is the only influence expected from these two trials. For a given level of molybdenum, whether tungsten was added or not, noticeable changes in ultimate tensile strength (645 and 637 MPa) were not observed. However, these two low carbon compositions gave lower UTS than A31 and A26.

Effect of precipitation forming elements on UTS

Niobium content has been varied because it is a strong precipitation former. The expected precipitate being NbC, the optimal balance for precipitation support between niobium and carbon has been determined.

Wirkung von Substitutions-Atomen auf die Zugfestigkeit (ultimate tensile strength = UTS)

Innerhalb der chemischen Zusammensetzung von ErNiCrMo6 sind Molybdän und Wolfram die beiden Legierungselemente, die im Vergleich zu Nickel den bedeutendsten Größenunterschied beim Atomradius aufweisen. Eine Variante mit Niob wurde in diesem Teststadium verworfen, da Niob sehr leicht Ausscheidungen mit Kohlenstoff und Metallelementen bildet. Es könnte daher problematisch sein, die komplexe Rolle dieses Elementes im Härtungsprozess zu interpretieren, wenn sich Substitutions- und Ausscheidungseffekte mischen.

Die chemische Zusammensetzung A02 ist die bestehende Formel, die in dieser Arbeit optimiert werden soll.

Die Schweißgutanalyse A31 hat im Vergleich zu A26 einen höheren Anteil an Molybdän und Wolfram: Die gleichzeitige Erhöhung des Molybdängehalts von 5,9% auf 7,4% und des Wolfram-Gehalts von 1,4% auf 1,8% wirkte sich nicht auf die Zugfestigkeit aus. Das zeigt, dass Substitutions-Zulegerungen eine schwächere Wirkung auf die mechanischen Gütewerte haben. Die A35 und A37 Schweißgüter haben einen niedrigen Kohlenstoffgehalt (0,03%) und enthalten kein Niob. Beide Elemente sind als starke Ausscheidungsbildner bekannt. Die Wirkung der Mischkristallhärtung durch Wolfram ist daher der einzige erwartete Einfluss bei diesen Versuchen. Bei einem bestimmten Gehalt an Molybdän wurden durch die Zugabe von Wolfram keine nennenswerten Änderungen bei der Zugfestigkeit festgestellt (645 and 637MPa). Allerdings ergaben die beiden niedrigen Kohlenstoffgehalte eine geringere Festigkeit als bei A31 und A26.

Wirkung von Ausscheidungsbildnern auf die Zugfestigkeit

Der Niob-Gehalt wurde variiert, weil dieses Element ein starker Ausscheidungsbildner ist. Da es sich bei der erwarteten Ausscheidung um NbC handelt, musste die optimale Balance zwischen Niob und Kohlenstoff ermittelt werden.

Ultimate tensile strength increases as niobium and carbon contents increase: precipitation of NbC appears to be the major parameter for strengthening the weld metal. Carbon is combined with niobium to form precipitates and does not act as an interstitial element. For carbon contents <0.07% and Niobium <1.1%, ultimate tensile strength is lower than 700MPa (A7, A10-2, A12-2). When carbon is above 0.06% and simultaneously the niobium content exceeds 1.3% (A21, A27, A29, A30, A32), hardening starts to become effective.

However, as the carbon content exceeds 0.08%, there is a lowering of weld metal toughness (A30 and A21) while the other welds of the series retain a sufficient level of weld metal toughness at -196°C (>60 joules). When the niobium content reaches the upper level (1.9%), and for a mean carbon content (0.06%), the mechanical properties remain satisfactory. This indicates that niobium in the range 1.3 to 2% does not have a detrimental effect on toughness. Conversely, increasing the carbon content alone, while keeping niobium at a mean level, does not result in a significant increase in ultimate tensile strength but appears to be detrimental to toughness (A30). A34 allows the determination of the optimum carbon content in the range of 0.05 / 0.07%, in the presence of niobium at a minimum level of 1.3%.

The Effect of Tungsten and Molybdenum atoms on precipitation kinetics and the related effect on UTS

Molybdenum and tungsten are well known for their accelerating effect on the kinetics of precipitation. It has been already shown that these elements do not increase mechanical properties as substitutional atoms. At a constant level of carbon and niobium (0.06% and 1.3%), tungsten and molybdenum additions are responsible for a gain of about 40 MPa of tensile strength, as illustrated by welds A36 and A34. Even when the niobium content reaches 1.6% and thus precipitate forming elements increase, ultimate tensile strength remains low without a tungsten addition (weld A33). It is interesting to notice that a silicon addition (A24) of up to 0.45% appears to have an effect on the kinetics and thus, the size and the distribution of precipitates. In fact, a decrease of weld toughness is observed while ultimate tensile strength does not vary significantly.

From this work, it can be concluded that a strengthening effect is obtained through precipitate forming elements. By adjusting C and Nb contents it is possible to achieve 700 MPa UTS (C 0.05-0.7% and Nb 1.3-2%). However, Mo and W are to be retained in the chemical composition as they have a strong effect on precipitation kinetics.

EXAMPLE OF WELDING 9% NICKEL CRYOGENIC STEELS WITH OERLIKON FREEZAL ENI9 MMA ELECTRODES

Welding of LNG tanks in the vertically up position is usually done using the MMA process. The thickness of the plates to be welded ranges from 50 mm to about 12 mm, depending of the location in the height of the structure. The joint configuration to be completed is shown in Figure 1. A relatively low thickness has been

Fig. 1: Joint configuration for vertical up MMA welds

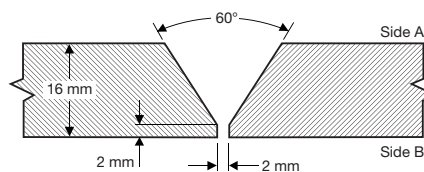


Bild 1: Nahtkonfiguration für steigende MMA-Nähte

Die Zugfestigkeit erhöht sich mit steigendem Niob- und Kohlenstoffgehalt: Das Ausscheiden von NbC scheint der wesentliche Parameter für die Festigkeit des Schweißgutes zu sein. Kohlenstoff wird mit Niob kombiniert, um Ausscheidungen zu bilden und wirkt nicht als interstitielles Element. Bei Kohlenstoffgehalten <0,07% und Niob <1,1%, liegt die Zugfestigkeit unter 700MPa (A7, A10-2, A12-2). Liegt der Kohlenstoffanteil über 0,06% und der Niob-Gehalt gleichzeitig über 1,3% (A21, A27, A29, A30, A32), dann beginnt der Härtungseffekt.

Allerdings führt ein Kohlenstoffgehalt von über 0,08% zu einer Verringerung der Schweißgut-Zähigkeit (A30 und A21), während die anderen Schweißgüter dieser Versuchsreihe eine ausreichende Zähigkeit bei -196 °C (>60J) aufweisen. Erreicht der Niob-Gehalt bei sehr niedrigem Kohlenstoffgehalt (0,06%) den oberen Wert (1,9%), bleiben die mechanischen Gütewerte zufrieden stellend. Dies zeigt, dass Niob bei einem Anteil von 1,3 bis 2% keine negativen Auswirkungen auf die Zähigkeit hat. Umgekehrt führt eine Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes allein (bei sehr niedrigem Niob-Gehalt) nicht zu wesentlichen Steigerungen der maximalen Zugfestigkeit, sondern scheint sich negativ auf die Zähigkeit auszuwirken (A30). In A34 wird der optimale Kohlenstoffgehalt im Bereich 0,05 / 0,07% dargestellt bei einem Mindestgehalt an Niob von 1,3%.

Die Wirkung von Wolfram- und Molybdän-Atomen auf die Ausscheidungskinetik und die sich daraus ergebende Auswirkung auf die Zugfestigkeit

Die beschleunigende Wirkung von Molybdän und Wolfram auf die Ausscheidungskinetik ist bekannt. Es wurde bereits gezeigt, dass diese Elemente als Substitutionsatome die mechanischen Gütewerte nicht erhöhen. Bei einem konstanten Niveau an Kohlenstoff und Niob (0,06% und 1,3%) führt die Zugabe von Wolfram und Molybdän zu einer Steigerung der Zugfestigkeit um 40MPa, wie bei den Versuchen A36 und A34 gezeigt. Auch wenn der Niob-Gehalt 1,6% erreicht und sich dadurch die Ausscheidungsbildner erhöhen, bleibt die Zugfestigkeit ohne Wolfram-Zulegierung niedrig (Versuch A33). Es ist interessant zu sehen, dass sich eine Zulegierung von Silizium (A24) von bis zu 0,45% auf die Kinetik auszuwirken scheint und damit auf die Größe und Verteilung der Ausscheidungen. Tatsächlich wird eine Verringerung der Zähigkeit beobachtet, während die Zugfestigkeit sich nicht wesentlich verändert.

Hieraus kann geschlossen werden, dass mit den Ausscheidungsbildnern eine Festigungs-Wirkung erzielt wird. Durch die Anpassung des C- und Nb-Gehalts ist es möglich, eine maximale Zugfestigkeit von 700MPa (C 0,05-0,7% und Nb 1.3-2%) zu erreichen. Allerdings müssen Mo und W in der chemischen Zusammensetzung erhalten bleiben, da sie starken Einfluss auf die Ausscheidungskinetik haben.

ANWENDUNGSBEISPIEL: SCHWEIßEN VON KALTZÄHEM 9% NICKEL STAHL MIT OERLIKON FREEZAL ENI9 STABELEKTRODEN

Das Schweißen von Flüssiggas-Behältern in steigender Position wird normalerweise mit Stabelektroden durchgeführt. Die Stärke der Bleche liegt zwischen 50mm und ca. 12mm, wobei sie sich mit zunehmender Bauteilhöhe verringert. Bild 1 zeigt die Nahtvorbereitung. Für die Untersuchung wurde eine relativ geringe Blechdicke gewählt, da sie hinsichtlich des Aufmischungsgrades

selected as being more critical from a dilution point of view. Indeed in this example of the two 9% nickel plates being welded with a nickel based filler metal, dilution has a marked influence on the weld metal composition and joint characteristics in this configuration.

An example of a specification typical for this application is shown in Table 3. The target chemistry is according to ASME/AWS 5.11 classification ENiCrMo-6. An additional requirement is that the sum of niobium and tantalum does not exceed the range 1.0 to 1.8%, and for tungsten the range 1.0 to 1.6%.

The Freezal ENi9 MMA electrode has been chosen as the most appropriate for this specification. It is an MMA electrode conforming to ENiCrMo-6, featuring good operability in all welding positions. The electrode has been specially developed for alternating current. This feature is essential when welding 9%Ni to minimise electrical arc blow due to the magnetic field. The weld metal has a high resistance to hot cracking resistance and high toughness at cryogenic temperatures.

The joint has been welded with a 3.2 mm diameter MMA electrode, welding on alternating current. The root pass has been welded with current in the range 95 to 100 Amps, an arc voltage of 24 V and a welding speed of 7.6 cm/min, resulting in a heat input of 18.5 kJ/cm. The hot and filling passes have been welded at an average 95 to 100 Amps, 24 V and 12 cm/min. The resulting heat input for these passes is 12 kJ/cm. The preheat temperature was 50 °C, interpass temperature was 250 °C maximum. The pass sequence is shown in figure 2. A stringer bead technique was used to limit dilution from the base material. Radiographic examination of the joint was satisfactory.

The chemical composition obtained with the FREEZAL ENi9 is shown in Table 4. Dilution from the base material results in an increase in the iron content of the joint.

Mechanical properties obtained from the joint are given in table 5. Toughness testing used full size specimens, machined at mid-thickness. Tensile specimen are 6.4 mm diameter and have been machined along the weld axis under the cap.

Table 3: Typical specification for vertical up MMA welds

Rm (MPa)	690 - 825
Rp0.2 (MPa)	430
A (%)	35
Average toughness at -196 °C (J) Zähigkeit im Mittel bei -196 °C (J)	70
Minimum single value at -196 °C (J) Kleinsten Einzelwert bei -196 °C (J)	53
Lateral expansion (mm) Laterale Breite (mm)	0.38

Tabelle 3: Typische Spezifikation für steigend geschweißte Nähte (Stabelektroden)

Fig. 2: Pass sequence of the MMA vertical up joint

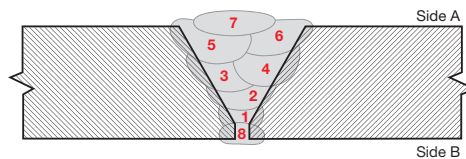


Bild 2: Lagen-Folge MMA-Steignaht

Table 4: Freezal ENi9 MMA electrode: Chemical composition of the weld metal

Elements (%) Elemente (%)	AWS 5.11ErNiCrMo6	FREEZAL ENi9 All weld metal FREEZAL ENi9 reines Schweißgut	FREEZAL ENi9 Joint figure 1 FREEZAL ENi9 Verbindung - Bild 1
C	0.1	0.06	0.05
Mn	2 - 4	3.5	3.3
Fe	10	9.6	15
Si	1	0.2	0.3
Cu	0.5	-	0.04
Ni	55 min	64	58.7
Cr	12 - 17	13.5	13.2
Nb	0.5 - 2	1.3	1.3
Mo	5 - 9	6	6.4
W	1 - 2	1.5	1.2

Tabelle 4: Freezal ENi9 Elektrode:
Chemische Zusammensetzung des Schweißgutes

Table 5: Mechanical properties of the joint welded with FREEZAL ENi9 MMA electrodes

Kv -196 °C - Joint axis (J) Kv -196°C - Mitte Naht (J)	79 (mini 78)
Kv -196 °C - Fusion line + 2mm (J) Kv -196°C - Schmelzlinie + 2mm (J)	113 (mini 80)
Kv -196 °C - Fusion line (J) Kv -196°C - Schmelzlinie (J)	85 (mini 81)
Rm - Joint axis (MPa) Rm - Mitte Naht (MPa)	716 - 739
Rp 0.2 - Joint axis (MPa) Rp 0,2 - Mitte Naht (MPa)	460 - 442
A - Joint axis (%) A - Mitte Naht (%)	36.3 - 35.3
Rm - Base metal (MPa) Rm - Grundwerkstoff (MPa)	724
Rp 0.2 - Base metal (MPa) Rp 0,2 - Grundwerkstoff (MPa)	680
A - Base metal (MPa) A - Grundwerkstoff (MPa)	30.4
CTOD -165 °C (mm) CTOD -165°C (mm)	0.35 - 0.45

Tabelle 5: Mechanische Gütewerte der mit Freezal ENi9 Elektroden geschweißten Verbindung

kritischer ist. In diesem Beispiel, dem Verschweißen zweier 9%-Nickel-Bleche mit einem Nickel-Basis-Zusatz, hat die Aufmischung tatsächlich wesentlichen Einfluss auf die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes und die Nahtigenschaften in dieser Konfiguration.

Tabelle 3 zeigt ein Beispiel einer typischen Spezifikation für diese Anwendung. Die angestrebte chemische Zusammensetzung entspricht der ASME/AWS 5.11 Klassifizierung ENiCrMo-6. Eine zusätzliche Anforderung ist, dass die Summe aus Niob und Tantal nicht über den Bereich 1,0 bis 1,8% hinausgeht und der Wolframanteil nicht größer als 1,0 bis 1,6% wird.

Die Stabelektrode Freezal ENi9 wurde für die Spezifikation als am besten geeignet erachtet. Diese MMA-Elektrode entspricht der Norm ENiCrMo-6 und hat sehr gute Schweißigenschaften in allen Schweißpositionen. Sie wurde speziell für das Schweißen mit Wechselstrom entwickelt. Diese Eigenschaft ist für das Schweißen von 9%Ni entscheidend, um elektrische Lichtbogenablenkungen durch das Magnetfeld zu vermeiden. Das Schweißgut ist äußerst beständig gegen Heißrisse und zeichnet sich durch hohe Zähigkeit im Tieftemperaturbereich aus.

Die Naht wurde mit einer Elektrode, Durchmesser 3,2mm an Wechselstrom geschweißt. Die Wurzelschweißung wurde mit folgenden Parametern ausgeführt: Strom 95 bis 100 A, Lichtbogenspannung 24V, Schweißgeschwindigkeit 7,6cm/min, was einem Wärmeeintrag von 18,5kJ/cm entspricht. Die Füll-Lagen hatten folgende Parameter: durchschnittlich 95 bis 100A, 24V und 12cm/min, was einem Wärmeeintrag von 12kJ/cm für diese Lagen entspricht. Die Vorwärmtemperatur lag bei 50 °C und die Zwischenlagentemperatur bei max. 250 °C. Die Lagenfolge ist in Bild 2 dargestellt. Es wurde in Strichraupentechnik geschweißt, um die Aufmischung des Grundwerkstoffs zu minimieren. Das Röntgenergebnis der Naht war ohne Befund.

Die mit FreezalENi9 erzielte chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 4 zusammengefasst. Die Aufmischung des Grundwerkstoffs führt zu einer Erhöhung des Fe-Gehalts in der Naht.

Die mechanischen Gütewerte der Verbindung sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Zähigkeit wurde an ISO-V Proben geprüft, die aus der Blechmitte ausgearbeitet wurden. Die Zugproben hatten einen Durchmesser von 6,4mm und wurden längs aus der Naht unter der Decklage ausgearbeitet.

Die Biegeprüfungen waren zufrieden stellend.

Bend tests results are satisfactory.

Hardness measurements Hv10 are shown in figures 3 and 4 and are summarised in table 6.

The specification presented in table 3 is fulfilled. The toughness level obtained from the joint is satisfactory. The scatter in results observed for toughness in the fusion line + 2 mm can be explained by the sampling, as it is difficult to align the toughness sample with the position of the V notch. The tensile properties are the critical point. A satisfactory value, similar to that of the base material has been obtained due to the optimisation of the chemistry, presented in the first part of the paper.

The continuous improvement of OERLIKON welding consumables being a primary objective, further modifications to this consumable have been made, leading to improved operating characteristics when welding in the overhead position and X-ray performance. Productivity is consequently improved and an increase in tensile strength of 30 MPa has been achieved due to a decrease of the iron content in the weld deposit.

CONCLUSION

The purpose of this study was to investigate the different chemical routes which could lead to higher ultimate tensile strength of the weld metal produced with ErNiCrMo6 consumables in order to reliably attain the strength level of 690 MPa which is typically required. It was demonstrated that substitutional atoms exhibit a negligible effect on mechanical properties.

Through an adjustment of the chemical analysis of an ErNiCrMo6 MMA electrode it is possible to induce a sufficient level of precipitation to strengthen the weld metal without detrimentally affecting weld metal toughness. It may be concluded that carbon content should in the range 0.05-0.07% and niobium in the range 1.3-2.0%. Molybdenum and tungsten are therefore designed to meet a mean level according to AWS specifications, corresponding to 7% +/-1% and a 1.5% +/-0.3% respectively. It has also be shown to be important for silicon to be controlled at a low level of <0.3%.

OERLIKON FREEZAL ENi9 MMA electrode has been successfully developed using the principles identified in this study and is commercially available to customers.

Fig. 3: Joint macrography



Bild 3: Makroschliff der Naht

Fig. 4: Hardness measurement survey

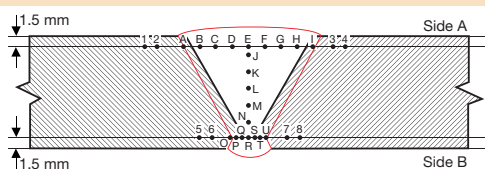


Bild 3: Übersicht Härte-Messpunkte

Table 6: Hardness measurement results

Location Seite	Position	N° Nr.	Results Ergebnis	Comments Kommentar
Side A Seite A	Base Material Grundwerkstoff	1 / 2 / 3 / 4	246 / 266 / 246 / 247	
Side A Seite A	Weld Metal Schweißgut	A / B / C / D / E / F / G / H / I	168 / 181 / 210 / 197 / 190 / 189 / 183 / 179 / 251	I (251): FL
Centre line Mitte Schweißgut	Weld Metal Schweißgut	J / K / L / M / N	206 / 210 / 221 / 203 / 189	
Side B Seite B	Base Material Grundwerkstoff	5 / 6 / 7 / 8	250 / 243 / 238 / 280	
Side B Seite B	Weld Metal Schweißgut	O / P / Q / R / S / T / U	241 / 200 / 188 / 183 / 191 / 178 / 224	U (224): FL

Tabelle 6: Ergebnisse der Härte-Messungen

Die Bilder 3 und 4 sowie Tabelle 6 zeigen die Härte-Messungen Hv10.

Die in Tabelle 3 genannte Spezifikation wird erfüllt. Die Zähigkeit der Verbindung ist zufrieden stellend. Die Streuung der Zähigkeitswerte in der Schmelzlinie + 2mm erklärt sich aus der Probenherstellung, da es schwierig ist, den Kerb über die ganze Länge exakt parallel zur Schmelzlinie zu führen. Der kritische Punkt ist die Zugfestigkeit. Aufgrund der Optimierung der chemischen Zusammensetzung, über die im ersten Teil der Arbeit berichtet wurde, konnte auch hier ein zufrieden stellendes Ergebnis, das dem Wert des Grundwerkstoffes nahe kommt, erreicht werden.

Da die ständige Verbesserung der OERLIKON Schweißzusatzwerkstoffe ein zentrales Ziel ist, wurden weitere Änderungen an den Schweißzusätzen vorgenommen, die zu einer Verbesserung der Schweißigenschaften beim Schweißen in Überkopf-Position und damit zu einer besseren Röntgensicherheit führten. Dadurch wird auch die Produktivität konsequent verbessert, weil der Reparaturaufwand speziell für die Überkopf-Nähte geringer wird. Ein weiterer Vorteil ist die Optimierung der Zugfestigkeit durch das Absenken des Fe-Gehaltes im Schweißgut. Die Zugfestigkeit wird dadurch um ca. 30MPa gesteigert.

SCHLUSSFOLGERUNG

Ziel dieser Studie war es, zu untersuchen wie durch Analysemodifikationen eine Erhöhung der Zugfestigkeit im Schweißgut von ErNiCrMo6 Zusatzwerkstoffen erreicht werden kann, um sicher das Niveau von 690MPa, das üblicherweise gefordert wird zu gewährleisten. Es wurde gezeigt, dass die Wirkung von Substitutionsatomen auf die mechanischen Gütewerte vernachlässigt werden kann.

Durch die Anpassung der chemischen Zusammensetzung einer ErNiCrMo6-Elektrode ist es möglich, ein ausreichendes Ausscheidungs-niveau zu erreichen, und damit die Festigkeit des Schweißgutes zu steigern, ohne seine Zähigkeit zu beeinträchtigen. Es konnte festgestellt werden, dass der Kohlenstoffgehalt im Bereich 0,05-0,07% und der Niob-Gehalt im Bereich 1,3-2,0% liegen sollte. Molybdän und Wolfram wurden auf einen mittleren Wert gemäß AWS Spezifikation mit 7% +/-1% beziehungsweise 1,5% +/- 0,3% eingestellt. Es wurde außerdem nachgewiesen, dass es wichtig ist, den Silizium-Gehalt kontrolliert auf einem niedrigen Niveau von <0,3% zu halten.

Auf der Grundlage dieser Untersuchung wurde die OERLIKON Freezal ENi9 Stabelektrode erfolgreich entwickelt und ist für den Kunden im Handel erhältlich.

E. MOINE - C. CHOVET
AIR LIQUIDE / CTAS -13 rue d'Epluches, Saint Ouen l'Aumône, 95315 Cergy Pontoise, France.

BIBLIOGRAPHY: / LITERATURHINWEISE:

[1] Chemical analysis and welding parameters influences on tensile strength of nickel base welds for 9% nickel cryogenic steels, C. Bonnet and P. Rouault, Eurojoin 3, 30th march to 1st April 1998

[2] Specifications for nickel and nickel alloy welding electrodes for SMAW, SFA-5.11

[3] RW K Honeycombe and H K D H Badeshia in Steels, Edwards Editor, Metallurgy and Materials Science



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



Air Liquide is the world leader in gases for industry, health and the environment, and is present in over **75 countries** with **43.000 employees**. Oxygen, nitrogen, hydrogen and rare gases have been at the core of Air Liquide's activities since its creation in 1902. Using these molecules, Air Liquide continuously reinvents its business, anticipating the needs of current and future markets. The Group innovates to enable progress, to achieve dynamic growth and a consistent performance. Air Liquide combines many products and technologies to develop valuable applications and services not only for its customers but also for society.

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

© OERLIKON - W000268883 - 11/10 - ACPT - 2500
PLDB 6693 - Photos couverture : Fotolia