

## Entwicklung eines hochlegierten Metallpulverfülldrahtes für die Verbindung hochfester Stähle

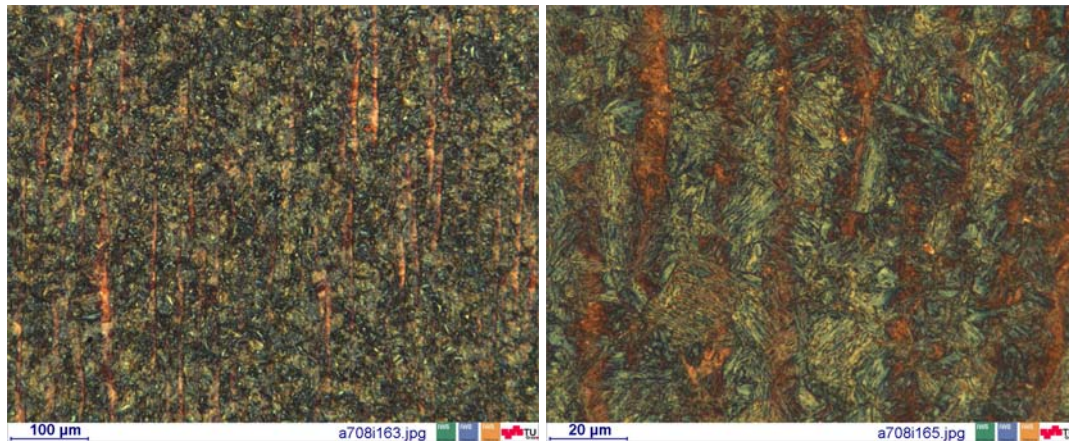
R. Vallant, K. Kerschbaumer (TU Graz, IWS); J. Ziegerhofer (BSGA, Kapfenberg) ; H. Basalka, M. Staufer (SZA, Wien), M. Lebel (SSF, Wien)

### Einleitung

In diesem Projekt wurden MAG-Kehlnahtschweißungen an hochfesten, ca. 13mm dicken Stahlblechen ARMOX 500T, hinsichtlich ihrer Mikrostruktur, der statischen und dynamischen Festigkeit untersucht. Ziel des Projektes ist es ein festeres Schweißgut zu erreichen. Das Projekt befasste sich mit der Umsetzung des Mangan-Austenit Schweißzusatzes vom Typ 18/8Mn (Standard), hin zum Superduplex-Schweißzusatz HSDX-MC.

### Zu verschweißender Grundwerkstoff

Es wurden größtenteils 13mm dicke Stahlbleche ARMOX 500T verschweißt. Dieser Stahl ist ein thermomechanisch hergestellter, martensitischer Stahl (direct quenched, self tempered DQST [1]) von hoher Festigkeit. In **Abb. 1** ist die Mikrostruktur im Lichtmikroskop (LIMI) dargestellt, **Tab. 1** gibt die mechanisch-technologischen Kennwerte an.



**Abb. 1:** Martensitische Mikrostruktur ARMOX 500T / Beraha II Ätzung, unterschiedliche Vergrößerung.

Vickers Härte [HV10]	Kerbschlag zähigkeit (-40°C) [J]	Fließgrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]	Bruchdehnung $A_5$ [%]
490	>20	>1250	1450-1750	>8

**Tab. 1.** Mechanisch-technologische Kennwerte ARMOX 500T / aus Datenblatt Fa. SSAB [2].

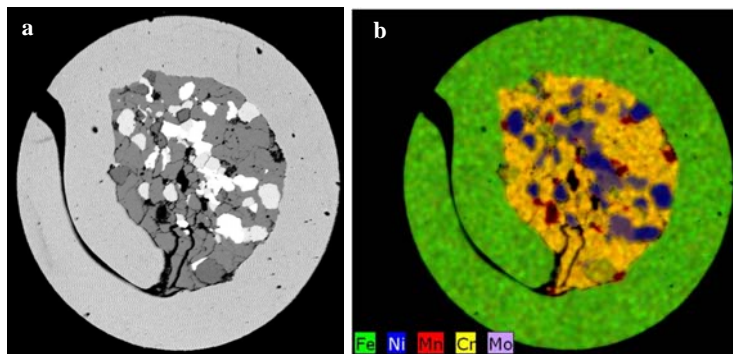
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Datenblatt SSAB	<0,32	0,1-0,4	<1,2	<0,015	<0,01	<1	<0,7	<1,8
Chem. Analyse	0,27	0,26	0,83	0,008	<0,0005	0,46	0,33	0,91
	Nb	V	Cu	Co	Ti	Al	B	CET
Datenblatt SSAB	-	-	-	-	-	-	<0,005	0,44
Chem. Analyse	<0,001	0,028	0,21	0,019	0,003	0,046	0,002	

**Tab. 2.** ARMOX 500T / Chemische Zusammensetzung und Kohlenstoffäquivalent CET.

In **Tab. 2** ist die chemische Zusammensetzung von ARMOX 500T dargestellt (Datenblatt im Vergleich zur durchgeführten Analyse), sowie das Kohlenstoffäquivalent CET nach SEW 088 [3]. Demnach müsste beim Schweißen vorgewärmt werden (Grenzblechdicke ohne Vorwärmung <8mm). Da im vorliegenden Projekt artfremd, d.h. mit austenitischem bzw. austenitisch/ferritischem geschweißt wird (Wasserstoffaufnahme im Schweißgut) ist dieses Vorwärmkonzept zur Vermeidung von Kaltrissen hier nicht relevant.

### Verwendete Schweißzusätze

Der verwendete Schweißzusatz am Beginn des Projektes war Massivdraht, ein Mangan-Austenit vom Typ 18/8Mn (Böhler A7-IG, Ø1.2mm). Im Verlauf des Projektes wurde auf Metallpulver-fülldraht desselben Legierungstyps umgestellt (Böhler A7-MC und ESAB OK Tubrod 15.34, Ø1.2mm), **Abb. 2**. Damit konnten höhere Schwingfestigkeiten erreicht werden, was hauptsächlich auf das bessere Fließverhalten der Fülldrähte im Vergleich zu Massivdraht zurück zu führen ist. Weiters konnten die Projektziele *Anhebung der Schweißgeschwindigkeit und Senkung der Wärmeeinbringung* erfüllt werden.



**Abb. 2:** Querschliff Metallpulverfülldraht HSDX-MC (Ma 40), überlappend, Durchmesser 1.2mm / (a) Lichtmikroskop, (b) REM EDX-Mapping.

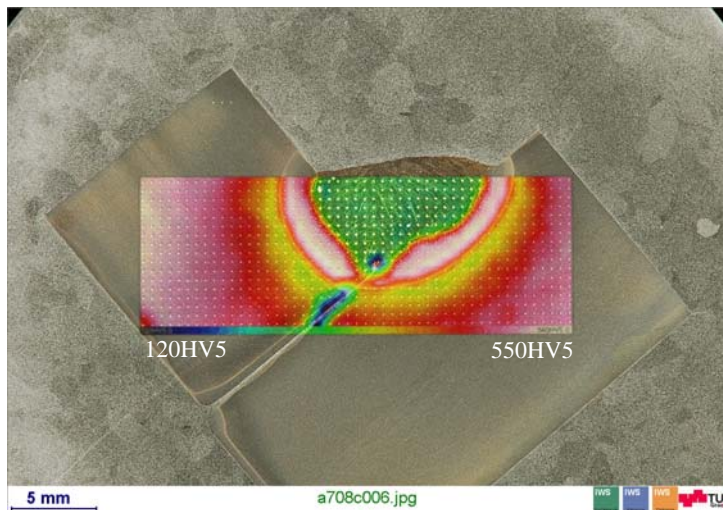
Untersuchte Schweißgüter	A7-MC	Ma. 9 Standard SDX-MC	Ma. 13 Überleg. SDX-MC	Ma. 35 Überleg. SDX-MC	Ma. 40 HSDX Überleg. SDX-MC	
C	0,103	0,024	0,024	0,028	0,025	
Si	0,55	0,73	0,62	0,70	0,58	
Mn	6,31	1,16	0,98	1,37	1,37	
P	0,014	0,022	0,019	0,019	0,016	
S	0,011	0,016	0,010	0,014	0,013	
Cr	<b>18,75</b>	<b>25,52</b>	<b>31,2</b>	<b>31,33</b>	<b>31,90</b>	
Mo	-	3,44	4,55	5,18	4,86	
Ni	9,19	9,56	12,04	12,04	12,6	
N	<b>0,024</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,21</b>	<b>0,17</b>	<i>Rest: Fe</i>

**Tab. 3.** Chem. Zusammensetzung [Massen%], reine Schweißgüter von Metallpulver-Fülldrähten, Mn-Austenit (A7-MC) und vier Superduplex-Massen (Ma9, Ma13, Ma35 u. Ma40).

Zur Erreichung einer höheren Zugfestigkeit des Schweißgutes hat Böhler vorgeschlagen auf dem metallurgischen Konzept „Superduplex“ anzusetzen. So wurde ausgehend vom Typ BÖHLER CN 25/9 CuT ein überlegierter, hochfesten Superduplex-Metallpulverfülldraht zur Erreichung Zugfestigkeit 900MPa, bei guter Schweißbarkeit, entwickelt. Dabei wurden vier Probemassen (Ma9, Ma13, Ma35 und Ma40/in **Abb. 2**) hinsichtlich Mikrostruktur, Härte, mechanischer Belastbarkeit, Schweißnahtausfließen sowie Risstests näher untersucht. In **Tab. 3** ist die chemische Zusammensetzung der reinen Schweißgüter aufgelistet.

## Metallographische Charakterisierung der Schweißverbindung

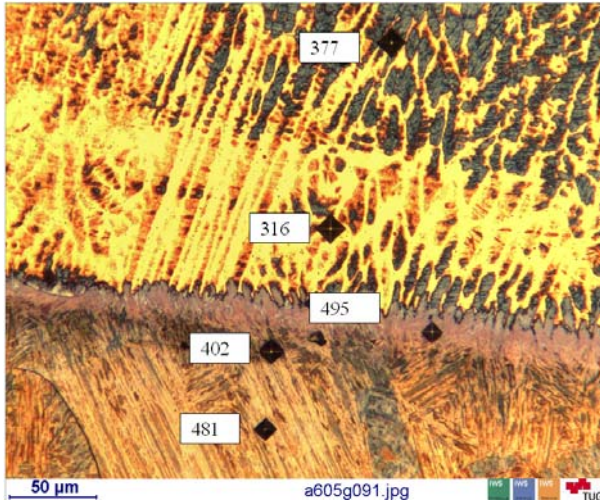
Es wurden ausschließlich Kehlnähte untersucht (ohne Durchschweißung), da in dem untersuchten Anwendungsgebiet keine Stumpfnähte benötigt werden. **Abb. 3** zeigt einen Kehlnaht-Querschliff geschweißt mit Metallpulverfülldraht HSDX-MC, Ma 40 (Schweißstrom ca. 220A, gepulst). Im Härte-Mapping treten relativ große Unterschiede auf. Dabei ist das weichste das aufgemischte Schweißgut mit ca. 250HV5 (verglichen dazu hat das Schweißgut A7-MC ca. 170HV5). Aufgrund des Legierungskonzeptes von Grundwerkstoff ARMOX 500T, ohne Mikrolegierungselemente (V, Nb, Ti) tritt außerhalb der Wärmeeinflusszone WEZ ein „Härtetasack“ (Weiche Zone) auf, mit einer Härte  $\geq 320$ HV5. In der WEZ (Grobkorn- und Feinkornzone, GKZ und FKZ) selbst entspricht die Härte etwa jener des unbeeinflussten Grundwerkstoffes (500-550HV5).



**Abb. 3:** Querschliff und Härtemapping Kehlnaht geschweißt mit Metallpulverfülldraht HSDX-MC (Ma 40) an 13mm ARMOX 500T Blechen.

Aufgrund der artfremden Schweißung bzw. des hohen C-Gradienten (GW: 0,27%, SG: 0,1% bzw. 0,025%) bildet sich an der Schmelzlinie eine dünne, harte martensitische Zwischenschicht aus. **Abb. 4** zeigt eine Detailaufnahme davon im Lichtmikroskop für das Schweißgut A7-MC in der Kehlnaht. Die o.g. Schicht hat hierbei eine Dicke von 20-30 $\mu$ m. Aufgrund höherer Spannungen nahe der Schmelzlinie bildet sich spannungsinduzierter Martensit im austenitischen Gefüge des Schweißgutes (mit ca. 5-10% Delta-Ferrit).

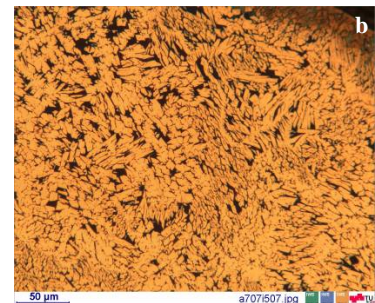
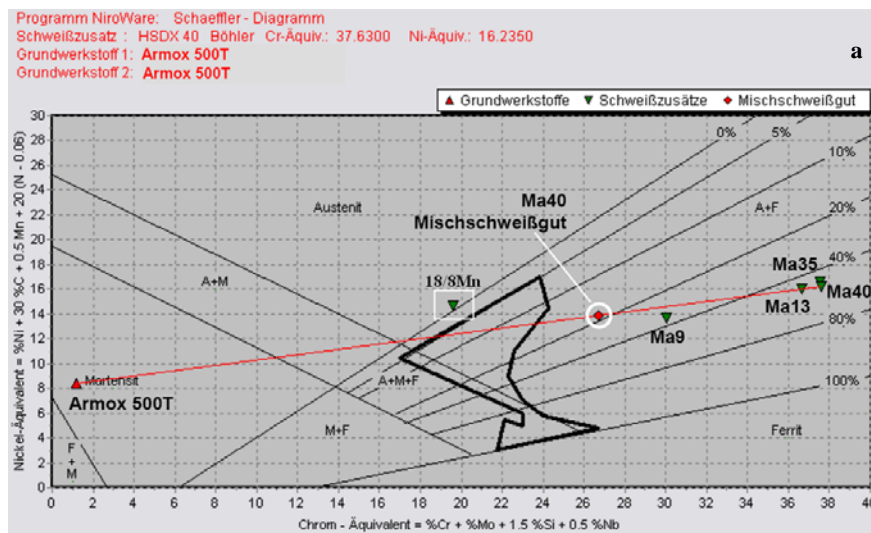
Zur Abschätzung des zu erwartenden Delta-Ferrit-Gehaltes und der Phasen im artfremden Schweißgut durch die Aufmischung wurde das modifizierte Schöffler-Diagramm herangezogen [4]. Dieses berücksichtigt v.a. die Wirkung des Stickstoffes (ca. 0,2%N in Superduplex-SG) auf das Ni-Äquivalent. In (a) sind die reinen Schweißgüter von A7-MC (18/8Mn), sowie jene der untersuchten Superduplex-Massen Ma9, Ma13, Ma35 und Ma40 eingetragen (Dreiecke). Es kann abgelesen werden, dass für HSDX-MC Ma40 bei einer Aufmischung von ca. 25% ein Delta-Ferrit-Gehalt von ca. 20% zu erwarten ist; dieses stimmt gut mit der Metallographie überein (b).



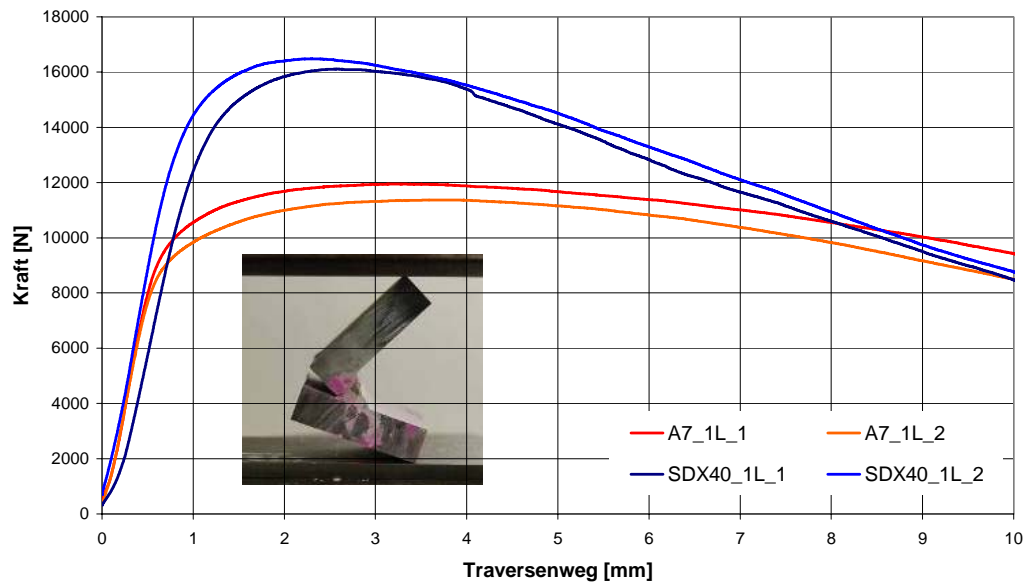
**Abb. 4:** Kehlnaht A7-MC / ARMOX 500T Mikrostrukturen im LIM: unten - GKZ ARMOX 500T, martensitische Zwischenschicht (grau), austenitische Phase (gelb) und martensitische Phase (blau) im Schweißgut A7-MC / angegebene Werte: HV0.02 Mikrohärtmessung

### Statische Festigkeitsprüfungen

Diese wurden an Hand von Bruchprüfungen gem. EN 1320 [5] und Minizugproben durchgeführt. Damit soll die Erreichung des wichtigsten Projektzieles *Anhebung der Zugfestigkeit von 640 MPa auf 900 MPa (+40%)*. Durch die Verwendung des Superduplex-Schweißgutes konnte eine Steigerung der Bruchkraft von ca. 12kN für A7-MC auf 16kN für eine 1-lagige Kehlnaht (50mm lang) erreicht werden (+33%), **Abb. 6**. Neuere Ergebnisse haben gezeigt, dass durch die Zugabe von Helium zum Schutzgas (3-Komponenten-Gas Ar+30%He+1%CO<sub>2</sub>, statt des Standardgases Ar+2,5%CO<sub>2</sub>) noch eine deutliche Steigerung der Bruchkraft auf ca. 22kN erreicht werden konnte; also nahezu eine Verdopplung gegenüber dem A7-MC Schweißgut.

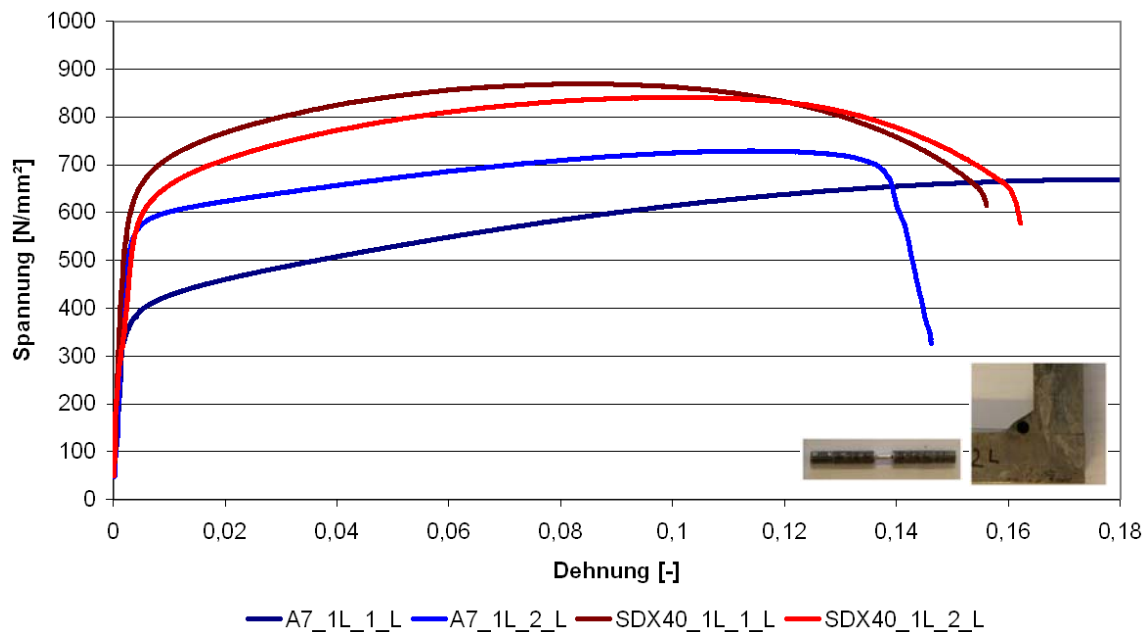


**Abb. 5:** (a) Modifiziertes Schäffler-Diagramm / Lage reine Schweißgüter (Dreiecke) und Mischschweißgut Ma40 bei ca. 25% Einbrand (Raute) - Software NIROWARE; (b) Mikrostruktur HSDX-MC Ma40.



**Abb. 6:** Ergebnisse der Bruchprüfung EN 1320, einlagige Kehlnaht / A7-MC (18/8Mn) rot-orange / HSDX-MC (Ma40) blau-hellblau.

Die Ergebnisse der Minizugproben, die aus den 1-lagigen Kehlnähten heraus erodiert worden sind ( $\varnothing 1.2\text{mm}$ , Prüflänge 2.5mm), zeigen eine geringere Steigerung in der Zugfestigkeit (840-870MPa), als aus den positiven Ergebnissen der Bruchprüfung hätte erwartet werden können (**Abb. 7**). Auch zeigt sich durch den Einsatz des 3-Komponenten-Schutzgases nur eine leichte Steigerung in der Zugfestigkeit auf ca. 850-890MPa. Diese Unterschiede zwischen Bruchprüfung und Minizugversuch zu erklären ist noch Gegenstand der Untersuchung.



**Abb. 7:** Ergebnisse der Minizugversuche aus einlagigen Kehlnähten / A7-MC (18/8Mn) blau-hellblau, HSDX-MC Ma40 rot-orange.

### **Dynamische Festigkeitsprüfung**

Diese wurde mit Doppel-T-Proben (4 Kehlnähte) getestet. Der Großteil der Proben versagte durch Rissausbreitung im Grundwerkstoff, auf Grund der metallurgischen Kerbe an den Nahtflanken. Durch den Einsatz des o.g. 3-Komponenten-Gases konnte das Nahtausfließen verbessert werden, so dass der Schwingungsbruch im Schweißgut erfolgt. Eine Schwächung der Schwingfestigkeit stellen die Wurzelporen im Superduplex-Schweißgut dar. Dabei handelt es sich vermutlich um Stickstoff-Poren. Problematisch ist auch, dass die Doppel-T-Proben teilweise einen Kantenversatz aufweisen, wodurch diese Schwingprüfung früher versagen bzw. zur Erstellung des Wöhler-Diagrammes nicht verwendet werden können. Um dies zu vermeiden wurde eine synchrone Schweißung mit 2 Brennern durchgeführt. Die Auswertungen sind noch Gegenstand der Untersuchung.

### **Überprüfung der Vibrationsentspannung**

Da keine Wärmever-, als auch -nachbehandlung am Grundwerkstoff ARMOX 500T zulässig ist bzw. mit einer durch Wärme bewirkten Erweichung gerechnet werden muss, wird seit längerer Zeit die Vibrationsentspannung (VSR) zum Abbau von Eigenspannungen verwendet. Die Eigenspannungen wurden mit dem Prinzip des magnetischen Barkhausenrauschens am geschweißten Bauteil gemessen. Es kann gesagt werden, dass die Eigenspannungen anders verteilt werden. Kritisch ist jedoch zu sehen, dass durch die VSR eine beginnende Schädigung an den Korngrenzen zu bemerken ist [6].

### **Zusammenfassung**

Die angestrebten Projektziele (Anhebung Schweißgeschwindigkeit und Zugfestigkeit Schweißgut bei nahezu Beibehaltung der Bruchdehnung, Eignung für 1- und 2-lagige Kehlnähte) wurden mit dem metallurgischen Konzept des Superduplex-Metallpulverfülldrahtes größtenteils erreicht. Es wird empfohlen, die Kaltrissanfälligkeit an der martensitischen Zwischenschicht näher zu untersuchen (Implant-Test). Im Schweißbetrieb sollte künftig ein 3-Komponentengas (Ar/He/CO<sub>2</sub>) verwendet werden, da damit das Fließverhalten des Schweißgutes und die statische, wie auch dynamische Festigkeit verbessert werden kann.

---

### **Literatur**

[1] V. Fedchun, M. Dilmore: Steel with high strength and toughness; Advanced Materials & Processes, July 2006; pp.33-36.

[2] ARMOX 500 T, Data Sheet, SSAB Oxelösund 2000-06-06.

[3] SEW 088 (Stahl Eisen Werkstoffblatt): Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, Richtlinie für die Verarbeitung, besonders für das Schmelzschweißen; 4. Ausgabe, Oktober 1993.

[4] A. Scharff, C. Köthe: NIROWARE - Software zum Schweißen hochlegierter Stähle und s/w-Verbindungen, SLV Rostock 1996.

[5] ÖNORM EN 1320:1996 Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Bruchprüfung.

[6] R. Vallant, D. Djuric, K. Kerschbaumer, N. Enzinger: Vibration Stress Relieve Treatment of Welded High Strength Martensitic Steel, IIW IX-L xxxx-09 (noch nicht veröffentlicht).