

## **Abschlußbericht zum Projekt S 516:**

### ***Entwicklung neuer und Optimierung vorhandener MSG-Fülldrähte für das Schweißen hochfester Feinkornstähle***

**Laufzeit:** vom 01.11.2001 bis 31.12.2002

**Gefördert durch:** Stiftung zur Förderung Industrieforschung  
Marktstraße 8  
50968 Köln

**Antragsteller:**



**Ingenieurgesellschaft  
Meyer & Horn-Samodelkin GbR  
Friedrich-Barnewitz-Str. 3  
18119 Rostock**

**Tel.: 0381-5196400**

**FAX: 0381-5196149**

**e-mail: [office@igmhs.de](mailto:office@igmhs.de)**

**internet: [www.igmhs.de](http://www.igmhs.de)**

## Bildverzeichnis

		<u>Seite</u>
Bild 4.1	Probenformen zur Simulation von thermischen Schweißzyklen und zur Erstellung der Diagramme mechanisch-technologischer Eigenschaften	6
Bild 4.2	S-ZTU-Diagramm und Diagramm der m./t. Eigenschaften des Stahls S890 QL	A15
Bild 4.3	S-ZTU-Diagramm und Diagramm der m./t. Eigenschaften des Stahls S960 QL/2	A16
Bild 4.4	S-ZTU-Diagramm und Diagramm der m./t. Eigenschaften des Stahls S1100 QL/3	A17
Bild 4.5	S-ZTU-Diagramm und Diagramm der m./t. Eigenschaften des Stahls S1100 QL/4	A18
Bild 5.1	Schematische Darstellung der Herstellung nahtloser Fülldrähte	14
Bild 6.1	Herstellung und Prüfung des Schweißgutes gemäß DIN EN 1597-1 /6.2; 6.3; 6.4/	21
Bild 6.2	Beispiel für die Protokollierung einer Schweißung zur Herstellung von reinem Schweißgut aus den Versuchsdrähten zu weiteren Untersuchung (hier Bsp. reines Schweißgut B1)	22
Bild 6.3	Lagenaufbau einer Probe zur Untersuchung reinen Schweißgutes im Querschliff (hier Bsp. reines SG M8)	23
Bild 6.4	Querrisse in den Schweißgutproben der Versuchschargen a) B2 und b) M4	23
Bild 6.5	Bei Vorversuchen aufgetretene Heißrisse	24
Bild 6.6	Beispiel einer Härtemessung am Makroschliff des reinen Schweißgutes M7	A19
Bild 6.7	Gefüge des reinen Schweißgutes, dargestellt am Beispiel der Versuchscharge a) B1 und b) 1M	A20
Bild 6.8	Querzugversuch an Verbindungsschweißungen nach DIN EN 895 /6.10/	29
Bild 7.1	Prüfstücke für eine Stumpfnah am Blech (a) und für eine Kehlnah am Blech (b) nach /7.1/	35
Bild 7.2	Probenlage für einen Stumpfstoß am Blech nach /7.1/	36
Bild 7.3	Probenlage für eine Kehlnah am Blech nach /7.1/	37
Bild 7.4	Kehlnahprüfstück (Kreuzprobe), Abmessung und Probenentnahme nach /7.2/	37

Bild 7.5	Schweißungen mit ungenügender Durchschweißung bei Kehlnahtproben	A21
Bild 7.6	Schweißungen mit (a) Einbrandkerben und (b) Rissen an Kreuzproben	A21
Bild 7.7	Schweißungen mit (a) Poren und (b) einem Bindefehler in einer Stumpfnah	A22
Bild 7.8	Beispielhafter Härteverlauf gemessen an einem Stumpfstoß, Beispiel Stumpfnah geschweißt im Pilotunternehmen 1 (WERFT_SN_M5_S890_PA)	A23
Bild 7.9a	Beispielhafter Härteverlauf gemessen an einer Kehlnah, Beispiel Kehlnah geschweißt im Pilotunternehmen 1 (WERFT_KN_B1_2_S890_PB))	A24
Bild 7.9b	Beispielhafter Härteverlauf gemessen an einer Kehlnah, Beispiel Kehlnah geschweißt im Pilotunternehmen 1 (WERFT_KN_B1_2_S890_PB)	A25
Bild 7.10a	Beispielhafter Härteverlauf gemessen an einer Kreuzprobe, Beispiel Kreuzprobe geschweißt im Pilotunternehmen 3, Linien 1, 2 und 3 (KIROW_KrP_1100_M8_PB)	A26
Bild 7.10b	Beispielhafter Härteverlauf gemessen an einer Kreuzprobe, Beispiel Kreuzprobe geschweißt im Pilotunternehmen 3, Linie 4 (KIROW_KrP_1100_M8_PB)	A27
Bild 7.10c	Beispielhafter Härteverlauf gemessen an einer Kreuzprobe, Beispiel Kreuzprobe geschweißt im Pilotunternehmen 3, Linien 5, 6 und 7 (KIROW_KrP_1100_M8_PB)	A28
Bild 7.10d	Beispielhafter Härteverlauf gemessen an einer Kreuzprobe, Beispiel Kreuzprobe geschweißt im Pilotunternehmen 3, Linie 8 (KIROW_KrP_1100_M8_PB)	A29
Poster	eingereicht bei der Ingenieurkammer M/V zum Ingenieurpreis M/V 2003	A49

## Tabellenverzeichnis

		<u>Seite</u>
Tab. 3.1	Wirtschaftlichkeitsberechnung beim Einsatz hochfester Feinkornbaustähle nach /3.2/	2
Tab. 4.1	Chemische Zusammensetzung der in die Untersuchungen einbezogenen Stahlchargen	4
Tab. 4.2	Mechanisch-technologische Eigenschaften der in die Untersuchungen einbezogenen Stahlchargen	5
Tab. 4.3	Angewendete Glühtechnologien	5
Tab. 4.4	Zulässige höchste Härtewerte, HV10, für vergütete Feinkornbaustähle mit einer gewährleisteten Mindeststreckgrenze von $R_e > 500\text{MPa}^{1)}$ /4.4/	8
Tab. 4.5	Auswahl der $t_{A8,5/5}$ unter Berücksichtigung der o.g. Kriterien	9
Tab. 4.6	Berechnete Mindestvorwärmtemperaturen $T_P$ in °C	9
Tab. 5.1	Empfohlene MAG-Drahtelektroden für das Schweißen von Feinkornbaustählen (Normbezeichnung nach AWS 5.28) /5.1/	11
Tab. 5.2	Empfohlene Stabelektroden für das Schweißen hochfester Feinkornbaustähle nach EN 757 /5.2/	11
Tab. 5.3	Empfohlene Fülldrahtelektroden für das Schweißen von Feinkornbaustählen nach DIN EN 12535 /5.3/	11
Tab. 5.4	Ausgewählte Legierungssysteme für die Untersuchungen	15
Tab. 5.5	Chemische Analyse in Gewichtsprozent der Legierungsvariante I aus Tab. 5.4 (FD-Zusatzwerkstoffanalyse - theoretisch; B-basisch; M-Metallpulver)	15
Tab. 5.6	Chemische Analyse und Kerbschlagwerte der Legierungsvariante I aus Tab. 5.4, ermittelt an einer Stumpfnahthverbindung mit S960	15
Tab. 5.7	Chemische Analyse in Gewichtsprozent der Legierungsvariante II aus Tab. 5.4	16
Tab. 5.8	Chemische Analyse und Kerbschlagwerte der Legierungsvariante II, ermittelt am reinen Schweißgut	16
Tab. 5.9	Chemische Analyse in Gewichtsprozent der Legierungsvariante III aus Tab. 5.4	16
Tab. 5.10	Chemische Analyse und Kerbschlagwerte der Legierungsvariante III, ermittelt am reinen Schweißgut	16
Tab. 5.11	Chemische Analyse und Kerbschlagwerte der Legierungsvariante III aus Tab. 5.4, ermittelt an einer Stumpfnahthverbindung mit Weldox 1100	16

Tab. 5.12	Chemische Analyse in Gewichtsprozent der Legierungsvariante III aus Tab. 5.4 mit erhöhtem Nickelgehalt	17
Tab. 5.13	Chemische Analyse und Kerbschlagwerte der Legierungsvariante III mit erhöhtem Nickelgehalt, ermittelt am reinen Schweißgut	17
Tab. 5.14	Chemische Analyse und Kerbschlagwerte der Legierungsvariante III aus Tab. 5.4 mit erhöhtem Nickelgehalt, ermittelt an einer Stumpfnahthverbindung mit Weldox 1100	17
Tab. 5.15	Zuordnung der entwickelten Versuchsdrähte, die zur Untersuchung an den Forschungspartner P2 weitergegeben wurden	18
Tab. 6.1	Angaben zu gelieferten Zusatzwerkstoffen	19
Tab. 6.2	Herstellerangaben zu nahtlosen Fülldrähten	A30
Tab. 6.3	Übersicht zu Hersteller- und Ausführungsdaten	A31
Tab. 6.4	Heißrisstests mit M4 und B2	A32
Tab. 6.5	Chemische Analysen	A34
Tab. 6.6	Übersicht zu Hersteller- und Ausführungsergebnissen (reines Schweißgut)	A36
Tab. 6.7	Ergebnisse der Bestimmung der Gefügeanteile nach dem Linienschnittverfahren	26
Tab. 6.8	Diffusible Wasserstoffgehalte der untersuchten Versuchschargen	27
Tab. 6.9	Auswahlkriterien für Versuchschargen, die für weitere Untersuchungen geeignet sind	28
Tab. 6.10	Chemische Zusammensetzung von Mischschweißgut	A37
Tab. 6.11	Mechanische Eigenschaften der Verbindungsschweißung S 960 mit B1 und M3	30
Tab. 6.12	Vorversuche zur Auswahl geeigneter Drahtelektroden für Verbindungsschweißungen in der Praxis	31
Tab. 6.13	Festigkeitswerte der untersuchten Verbindungsschweißungen	32
Tab. 7.1	Untersuchungsvarianten für die Pilotunternehmen	35
Tab. 7.2	Parameter ausgewählter Versuchsschweißungen und die daraus resultierenden Abkühlzeiten $t_{A8/5}$	A39
Tab. 7.3	Untersuchung und Prüfung der Prüfstücke (Tab. 1 aus /7.1/)	38

Tab. 7.4	Bewertungsergebnisse der Sichtprüfung und der Makroschliffe für die untersuchten Verbindungen in der Bewertungsgruppe B nach DIN EN 25817 /7.3/	39
Tab. 7.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der Härtemessung an den Schweißverbindungen der Pilotunternehmen	40
Tab.7.6	Zulässige höchste Härtewerte (HV10), für vergütete Feinkornbaustähle mit einer gewährleisteten Mindeststreckgrenze von $R_e > 500\text{MPa}$ <sup>1)</sup> /7.1/	41
Tab. 7.7	Auswertung der Zug- und Kerbschlagbiegeversuche an den Schweißungen der Pilotunternehmen	A40
Tab. 7.8	Untersuchungsergebnisse bei P1 an Verbindungsschweißungen <sup>1)</sup> S1100/M1100 <sup>2)</sup>	42

## Verzeichnis der vorläufigen Schweißanweisungen

	<u>Seite</u>
pWPS B 01 S 890 QL; M5; Stumpfnah; PA	A41
pWPS B 02 S 890 QL; B1; Stumpfnah; PA	A42
pWPS B 03 S 890 QL; M5; Kehlnah; PB	A43
pWPS B 04 S 890 QL; M5; Kehlnah; PF	A44
pWPS B 05 S 890 QL; B1; Kehlnah; PB; beidseitig	A45
pWPS 006 S 890 QL; B1; Kehlnah; PB; einseitig	A46
pWPS 007 S 960 QL; M5; Stumpfnah; PA	A47
pWPS 008 S 960 QL; B1; Stumpfnah; PA	A48

## Gliederung

	<u>Seite</u>	
1.	<b>Einleitung/Danksagung</b>	1
2.	<b>Projektziel</b>	1
3.	<b>Literaturauswertung/Stand der Kenntnisse</b>	2
4.	<b>Umwandlungsverhalten und Diagramme mechanisch-technologischer Eigenschaften der Stähle S890, S960 und S1100</b>	4
4.1	Untersuchte Stahlchargen	4
4.2	Probleme bei der Vorbereitung der Untersuchungen	5
4.3	Aufstellen von Schweiß-ZTU-Schaubildern	6
4.4	Umwandlungs- und Eigenschaftsverhalten der untersuchten Stahlchargen	6
4.4.1	Auswertung der Dilatometerversuche- Grundsätzliche Bemerkung zur Gefügeauswertung	6
4.4.2	S890 – Umwandlungsverhalten und mechanisch-technologische Eigenschaften	7
4.4.3	S960 - Umwandlungsverhalten und mechanisch-technologische Eigenschaften	7
4.4.4	S1100 (Charge 3) – Umwandlungsverhalten und mechanisch-technologische Eigenschaften	7
4.4.5	S1100 (Charge 4) – Umwandlungsverhalten und mechanisch-technologische Eigenschaften	8
4.5	Bewertung der Schweiß-ZTU-Schaubilder und Diagramme mechanisch-technologischer Eigenschaften	8
4.6	Empfehlungen zum Vorwärmen der untersuchten Stähle	9
4.7	Zusammenfassende Bewertung	10
4.8	Literatur	10
5.	<b>ZW-Entwicklung</b>	11
5.1	Schweißzusatzwerkstoffe für hochfeste Stähle	11
5.2.	Entwicklung von Zusatzwerkstoffen für Stähle mit einer Mindestdehngrenze von 890 MPa	13
5.2.1.	Entwicklungsschwerpunkte	13
5.2.2.	Typen – und Legierungsauswahl	14
5.3	Auswahl der Versuchsdrähte für weiterführende Untersuchungen	17
5.4	Literatur	18
6.	<b>Versuchsschweißungen und Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften von reinem Schweißgut und von Verbindungsschweißungen an den Stählen S 890, S 960 und S 1100 mit basischen und Metallpulverfülldrahtelektroden</b>	19
6.1	Untersuchte Zusatzwerkstoffe – Herstellerangaben	19
6.2	Herstellung des reinen Schweißgutes	20
6.2.1	Probenahme	20
6.2.2	Schweißbedingungen - Datenübersicht zur Herstellung von reinem Schweißgut	21
6.3	Eigenschaften des reinen Schweißgutes der Fülldrahtelektroden	23
6.3.1	Unregelmäßigkeiten	23
6.3.2	Chemische Zusammensetzung	25
6.3.3	Härtemessungen	25
6.3.4	Bestimmung des Nadelferritgehaltes	25
6.3.5	Mechanisch-technologische Eigenschaften	26
6.3.6	Diffusibler Wasserstoffgehalt des reinen Schweißgutes	27
6.4	Auswahlkriterien geeigneter Fülldrahtelektroden	27
6.5	Vorversuche an Verbindungsschweißungen	29



6.6	Mechanische Eigenschaften von Verbindungsschweißungen zur Bewertung der Versuchschargen	30
6.7	Zusatzwerkstoffauswahl für Schweißungen in der Praxis	32
6.8	Literatur	33
<b>7.</b>	<b>Schweißungen in den Pilotunternehmen</b>	<b>34</b>
7.1	Beteiligte Pilotunternehmen	34
7.2	Vorbereitung der Schweißungen	34
7.3	Durchführung der Schweißungen	36
7.4	Ergebnisse der Untersuchung der Schweißungen	36
7.4.1	Auswahl der durchzuführenden Prüfungen	36
7.4.2	Sichtprüfung	38
7.4.3	Makroschliffe	38
7.4.4	Härtemessung	39
7.4.5	Mechanisch-technologische Eigenschaften	41
7.5	Schlussfolgerungen	42
7.6	Literatur	42
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung/Fazit</b>	<b>43</b>
	<b>Anlagen</b>	