# Sudarea MAG cu sârmă tubulară a oțelului de înaltă rezistență

### MAG welding of high strength special -Purpose structural steel with flux cored wires

**Dr.-Ing. E. Engindeniz**Drahtzug Stein, Altleiningen, Germania

#### Cuvinte cheie

Sudare MAG, sârmă tubulară, oțel de înaltă rezistență

#### 1. Introducere

Cererea de oțel, în ceea ce privește rezistența acestuia la construcția de automacarale, vase sub presiune, autoutilitare, turbine și vehicule subacvatice se afla într-o continuă creștere. Pentru a veni în întâmpinarea acestei cereri, în ultimii 30 de ani, producătorii de oțel au dus cercetarea la un asemenea nivel încât oțeluri de construcție de înaltă rezistență, de 1100 N/mm², sunt utilizate de acum 5 ani. La dezvoltarea de noi oțeluri se ține cont de cerințele utilizatorilor privind sudabilitatea, tenacitatea ridicată și siguranța în exploatare. Acestea sunt condiții obligatorii pentru succesul economic al acestui oțel de înaltă rezistență.

Lucrarea prezintă, la început, evaluarea economică și descrierea oțelurilor de rezistență mare disponibile în prezent. Se continuă cu aspectele tehnologiei de sudare. În ultima parte sunt puse în evidență cele mai noi dezvoltări din domeniul materialelor pentru sârme tubulare și metodele de procesare a lor.

# 2. Evaluare economica a utilizării oțelului de înaltă rezistență

Alegând oțel de înaltă rezistență în proiectarea constructivă a componentelor, grosimea plăcii este redusă substanțial, în timp ce funcționalitatea construcției rămâne neschimbată. Cel mai bun exemplu pentru aceasta îl reprezintă aplicația la construcția de automacarale și autoutilitare, unde greutatea netă mai mică reduce costurile pentru energie, respectiv distanțele de transport. Pe lângă toate acestea, eficiența vehiculelor poate fi îmbunătățită, întrucât se permite o încărcare mai mare poate fi atinsă dacă greutatea netă rămâne aceeași.

Situația este similară în domeniul construcției de submarine, unde pot fi atinse adâncimi mult mai mari, la greutatea plăcilor proiectată.

Mulţumită grosimii reduse a plăcilor, costurile sunt mai mici atât pentru achiziția materialelor de bază, cât și pentru cea a consumabilelor. Întrucât grosimea redusă a plăcilor scade timpul de sudare, costurile pentru manoperă și pentru funcționarea instalațiilor pot fi reduse la rândul lor.

O comparație între costurile pentru oțelul S 1100 QL (1.8942) și oțelul S 235 JR (1.0037, fost St 37-2) este redată în figura 1 pentru cazul unei suduri cap la cap în V și pentru cazul suduri cap la cap în X. Rezultatele demonstrează clar că reducerile costurilor sunt aproximativ proporționale cu limitele de curgere și se ridică la 80%.

#### **Keywords**

MAG welding, flux cored wire, high strength steel

#### 1. Introduction

In order to meet the increasingly demanding requirements on steel regarding its strength, especially for the construction of mobile cranes, pressure vessels, utility vehicles, turbines, underwater vehicles etc., over the past 30 years, steel producers have been pushing re-search to such an extent that construction steels of 1100 N/mm<sup>2</sup> are now available and have been in use for 5 years. When developing the new steels the customers' wishes regarding good weldability, high toughness and operational safety were of course taken into account. These are prerequisites for the economically successful use of high strength steel. This report first discusses cost savings and describes the high-strength steels that are currently available and then treats the associated welding engineering aspects. In the last part the latest developments in the field of filler materials for flux-cored electrodes and their processing methods are pointed out.

# 2. Economic evaluation of high strength steel use

By choosing high strength steel in the constructive design of components, the sheet thick-ness is tremendously reduced while the functionality of the construction remains un-changed. The best example for this are applications in the mobile crane and utility vehicle construction where a lower net weight saves energy costs and reduces transport distances. Besides, the efficiency of the vehicles can be improved as a higher load capacity can be achieved if the net weight remains the same. This is similar in the field of submarine construction where significantly higher diving depths can be realized at a comparable design weight. Thanks to the reduced thickness of the sheets, material purchasing costs both for base material and for consumables are lower. Since the lower sheet thickness also reduces welding times, costs for labor and machinery can be saved. A comparison of the costs for S 1100 QL (1.8942) and S 235 JR (1.0037, formerly St 37-2) can be seen in figure 1 in the case of a single V butt weld and a double V butt weld. The results clearly show that the costs saved are approximately proportional to the yield points and amount to about 80%.

Sudare MAG

2/2008

#### 3. Sudabilitatea oțelurilor de înaltă rezistență

Tabelul 1 prezintă mărci de oțeluri cu limita de curgere  $R_{p0,2}$  cuprinsă între 690 și 1100 N/mm² provenite de la trei producători. Toate mărcile includ oțeluri călite-revenite cu granulație fină, care sunt în principal utilizate pentru construcția de automacarale, autoutilitare și nave, cât și pentru construcția de mașini. De asemenea, oțelurile călite-revenite cu granulație fina prezentate în tabelul 2 sunt în principal utilizate pentru construcția de submarine.

După cum se poate observa din analiza chimică a claselor echivalente, aproape că nu există diferențe în formarea aliajului principal. În tabele, se prezintă conținutul maxim pentru toate elementele, conform producătorilor. Prin urmare, analizele actuale pot produce rezultate diferite. În general, conținutul elementelor rămase și al impurităților cum sunt P, S, H, N, O trebuie să fie minimizat la toate tipurile de oțel. În acest scop producătorii de oțel folosesc tehnologii de elaborare secundară și degazare în vid. Se poate admite că valorile actuale pentru impuritățile P și S rezultate din analiza pe produs reprezintă doar jumătate din valorile date pentru analiză. Astăzi, tehnologiile moderne sunt capabile să realizeze oțeluri cu conținuturi de azot (N) semnificativ sub 100ppm. Oțelurile turnate sunt calmate cu aluminiu (Al). Conținutul minim de Al ar trebui să fie de 180ppm. Aluminiul este necesar pentru a întări azotul dizolvat și pentru a preveni creșterea granulației datorită nitrurilor de Al. Conținutul în alte elemente care finisează granulația, cum ar fi Nb-Ti, V, Zr, ajunge la un minim de 150ppm.

Analiza chimică a oțelurilor asemănătoare, călite-revenite cu granulație fină și de înaltă rezistență tip HY este descrisă mai detaliat în tabelul 2. Principalele elemente de aliere, nu au numai limite superioare, ci și inferioare, în timp ce baza este fixată la Cr, Mo și Ni. Este de remarcat că gama de oțeluri HY are conținuturi de Mn foarte scăzute, între 0,1% și 0,4%. Aceasta arată că tipurile de HY sunt aliate cu Ni, în timp ce oțelurile menționate în tabelul 1 pot fi fără Ni, sau pot avea un conținut scăzut de Ni. Conținutul ridicat de Ni cauzează doar o structura tenace, iar conținutul de Mn în metalul de bază este mult sub 1,0%. Această limită poate fi crescută până la 1,2% fără probleme în structurile metalice sudate cu un continut de 3%Ni.

#### 4. Informații despre procesele de sudare

Toate oțelurile prezentate în tabelele 1 și 2 sunt clasificate ca fiind susceptibile la fisurare la rece și la formarea de fisuri datorate hidrogenului. Întrucât comportarea oțelurilor la fisurare la rece influențează procesul de sudare și, o data cu el, costurile de producție, producătorii de oțel și institutele de cercetare au întreprins, recent, studii extinse de fisurare la rece. Pentru definirea sensibilității individuale a oțelurilor și a metalelor depuse prin sudare la fisurare la rece au fost dezvoltate mai multe formule de determinare a carbonului echivalent. Există, în lume, 4 modalității de calcul a carbonului echivalent:

a. 
$$CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$$

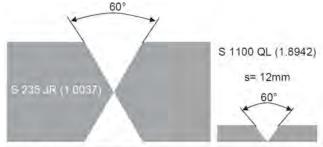
Această ecuație a fost obținută pe baza regresiilor multiple ale rezultatelor testelor de fisurare la rece realizate în ultimii ani la Thyssen Stahl AG.

b. 
$$CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

Ecuația de mai sus a fost obținută prin măsurători ale durității. Ea este cunoscută ca fiind carbonul echivalent IIW.

#### Weldable high strength special-purpose structural steels

Table 1 lists the steel grades of class 690 N/mm<sup>2</sup> < Rp0,2 < 1100 N/mm<sup>2</sup> from three producers. All grades are water-quenched fine-grained steels, which are mainly used for mobile crane,



S 235 JR	descriere/ description	S 1100 QL
183	limita de curgere/ yield point [N/mm²]	1100
72	grosimea plăcii/ sheet thickness [mm]	12
6	raportul grosimilor/ ratio of thickness	1
11.527	greutatea imbinarii/ seam weight [kg/m]	0,726
40	costul manoperei/ labor costs [Euro/h]	40
320	intensitatea curentului/ electricity [A]	220
6.5	rata depunerii/ weight of electrode melted in unit time [kg/h]	4
80	durata activă/ operating time [%]	80
SG 2	tipul sârmei/ type of wire Ø 1,2mm	MEGAFIL 1100 M
0.8	pretul sârmei/ price of wire [Euro/kg]	6,5
95	randament/ output [%]	90
0.01	pretul gazului/ gas price [Euro/l]	0,01
15	debitul gazului/ gas flow rate [l/min]	15
118.87	costurile de productie/ production costs [Euro/m]	23,26
5.11	raportul costurilor/ cost ratio	1

Figure 1. Comparison of welding costs for \$1100

Figure 1. Comparison of welding costs for S 1100 QL and S 235 JR

utility vehicle and vessel construction and mechanical engineering. The likewise water-quenched fine-grained steels shown in table 2 are mainly used for the construction of underwater vehicles.

As can be seen from the chemical ladle analysis of equivalent classes there are almost no differences in the main alloy formation. In the tables the maximum content according to the manufacturer was given for all elements. Therefore, actual analyses might produce different results. Generally, the content of trace elements and impurities such as P, S, H, N, O must be minimized in all steel grades. For this purpose steel producers use the technologies of secondary metallurgy and vacuum degassing. It can be

c. PCM = C + Si/30 + (Mn+Cu+Cr)/20 + Mo/15 + Ni/60 + V/10 + 5\*B

Aceasta ecuație a fost obținută din regresii multiple ale rezultatelor testelor pe probe Tekken.

d. 
$$CEN = C + [0,75+0,25*tanh(20*(C-0.12))] * {A}$$
  
 ${A} = Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/20 + (Cr+Mo+V+Nb)/5 + 5*B$ 

Întrucât descrierea comportării la fisurare la rece utilizând diferite formule de carbon echivalent rămâne nesatisfăcătoare, cercetătorii japonezi au încercat să obțină informații mai bune despre această comportare printr-o combinație matematică a carbonului echivalent IIW CE cu formula PCM. Efectul funcției este că, formal, valorile calculate sunt apropiate de valorile calculate folosind formula CE în cazul conținuturilor de carbon mai mari de 0,12%. În cazul conținuturilor de carbon sub 0,12%

assumed that the actual values for impurities of P and S resulting from product analyses only amount to half of the values given for the ladle analyses. Today, modern steel works are able to realize N contents significantly below 100ppm. The cast steels are Al-killed. The minimum Al content should be 180ppm. Al is necessary to bind the dissolved nitrogen and also prevents grain growth due the resulting Al nitrides. The content of other grain refining elements such as Nb-Ti, V, Zr amounts to a minimum of 150 ppm.

The chemical analyses of the likewise water-quenched high strength special-purpose structural steels of the HY-grades in table 2 are described in more detail. The main alloy elements do not only have upper limits but also lower limits while the basis is fixed as Cr, Mo and Ni. It is remarkable that the HY range has exceptionally low Mn contents between 0.1% and 0.4%. This indicates that HY grades are alloyed with high Ni contents while the special-purpose steels shown in table 1 can be Ni-free or

Tabelul 1. Comparația chimică a oțelurilor călite-revenite de înaltă rezistență/
Table 1. Ladle analyses of the water-quenched, high strength fine-grained steels

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb+V	Cu	Ti	Rm	Rp0,2	A5
	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	0/0
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		0.310.51.5	
N-A-XTRA 70	0.2	0.8	1.6	0.02	0.01	1.5	0.6			n.d		770	690	14
												940		
XABO 890												940	890	11
	0.18	0.5	1.6	0.02	0.01	0.8	0.6	2.0	0.1	n.d		1100		
XABO 960												980 1150	960	10
XABO 1100	0.2	0.5	1.7	0.02	0.005	1.5	0.7	2.5	0.12	n.d		1200 1500	1100	8
WELDOX 700	0.2	0.6	1.6	0.02	0.01	0.7	0.7	2.0	0.13	0.3	0.04	780 930	700	14
WELDOX 900	0.2	0.5	1,6	0.02	0.01	0.7	0.7	2.0	0.1	0,3	0.04	940 1100	900	12
WELDOX 960												980 1150	960	12
WELDOX	0.21	0.5	1.4	0.02	0.01	0.8	0.7	3.0	0.12	0,3	0.02	1250 1550	1100	10
DILLIMAX 690	0.18	0.5	1.6	0.02	0.01	1.5	0.6	1.5	0.1		+	770 940	690	14
DILLIMAX 890	0.2	0.5	1.6	0.02	0.01	0.8	0.7	1.2	0.1		+	940 1100	890	12
DILLIMAX 965	0.2	0.5	1.2	0.02	0.01	0.8	0.7	2.0	0.1		+	980 1150	960	12
DILLIMAX 1100	0.18	0,5	1.3	0.015	0.01	1.5	0.8	2.5	0.1		0.1	1200 1500	1100	10

Tabelul 2. Analiza oțelurilor călite-revenite cu granulație fină de înaltă rezistență/ Table 2. Ladle analyses of the water-quenched, high strength fine-grained steels

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Ti
HY 80 15 NiCrMo 10	0.12	0.15	0.10	0.01	0.01	1.0 1.8	0.2	2.0	0.03	0.25	0.02
6 Thyssen / DH	0.16	0.35	0.40	0.01	0.01	1.0 1.8	0.6	3.25	0.03	0.23	0.02
HY 80		0.15	0.1			1.0	0.2	2.0			
	0.18			0.025	0.025				n.d.	n.d.	n.d.
USA		0.35	0.4			1.8	0.6	3.25			
HY 100 16 NiCrMo	0.12	0.15	0.1 0.4	P+S ?	0.04 1.0 1.8		0.2	2.0	0.03	0.25	0.02
12 6 Thyssen / DH	0.20	0.35	0.1 0.4	r⊤ <b>S</b> :	0.04	1.0 1.8	0.6	3.5	0.03	0.23	0.02
HY 100		0.15	0.1			1.0	0.2	2.25			
	0.2			0.025	0.025				n.d.	n.d.	n.d.
USA		0.35	0.4			1.8	0.6	3.50			

Sudare MAG

2/2008

Sudare MAG

valorile calculate sunt apropiate de valorile calculate conform formulei PCM.

În tabelul 3 este prezentat carbonul echivalent calculat cu diferite metode, iar valorile pot fi considerate caracteristici pentru oțelurile amintite. Deși valorile pentru oțelurile HY ar putea fi în afara ariei de valabilitate pentru Mn și Ni, este dată o

Tabelul 3. Comparație între carbonul echivalent/ Table 3. Comparison of the carbon equivalents

gradul oțelului/ steel grade	CET	CE	PCM	CEN
690 N/mm <sup>2</sup>	0,33	0.,58	0,27	0,42
890-1100 N/mm <sup>2</sup>	0,37	0,62	0,31	0,55
HY 80 / HY 100	0,32	0,60	0,28	0,47

aproximare a sensibilității de fisurare la rece care poate fi fără îndoială comparată cu cea a oțelurilor menționate anterior. Comportarea îmbinărilor sudate la fisurare la rece depinde de compoziția chimică a metalului de bază, de metalul de adaos, cât și de următorii factori:

- grosimea tablei
- conținutul de hidrogen al metalului depus prin sudare
- temperatura de preîncălzire și între treceri
- energia liniară
- comportarea tensiunilor reziduale în construcția sudată

În acest context, trebuie luată în considerare interacțiunea dintre sensibilitatea la fisurare la rece și caracteristicile mecanice ale îmbinării sudate. La factorii de influență menționați anterior precum grosimea tablei, energia liniară, temperatura de preîncălzire, se adaugă geometria sudurii și procedura de sudare. Aceste variabile specifice procedurii sunt unificate pentru a forma un parametru caracteristic pentru curba timp-temperatură în timpul sudării, numit timpul de răcire  $t_{8/5}$  [1/2]. Acesta este intervalul în care temperatura cusăturii și a zonei influențate termic scade de la  $800^{\circ}$ C la  $500^{\circ}$ C.  $t_{8/5}$  poate fi calculat pentru propagare bi și tridimensională a căldurii, în funcție de  $\eta$ , E, To și  $F_{2/3}$ . În cazul propagării tridimensionale, grosimea vergelei nu contează. Grosimea de tranziție depinde de temperatura de preîncălzire și de energia liniară. Efectul asupra procedurii de sudare este inclus conform relațiilor:

$$\begin{split} T_{8/5} &= (0,67 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot T_o) \cdot \eta \cdot E\{(1/500 - T_o) - 1/800 - T_o)\} \cdot F_3, \quad pentru \ propagare \ tridimensional \\ T_{8/5} &= (0,043 - 4,3 \cdot 10^{-5} \cdot T_o) \cdot \eta^2 \cdot E^2/d^2 \cdot [(1/500 - T_o)^2 - (1/800 - T_o)^2] \cdot F_2, \quad pentru \ propagare \ bidimensional \\ cu: \quad \eta &= 0,80 \ \text{pt. MAG/M21} \\ \quad \eta &= 0,85 \ \text{pt. MAG/CO}_2 \\ \quad \eta &= 0,75 \ \text{pt. MIG/Ar, He} \end{split}$$

Pentru factorii de formă  $F_2$  şi  $F_3$  se poate aplica tabelul 4. Daca materialul se răcește prea repede, se obțin valori ridicate ale durității în zona influențată termic. Daca materialul se răcește prea încet, s-ar putea ca valorile impuse pentru rezistența la rupere și ale tenacității în ZIT să nu fie realizate. Experiența arată că valorile obținute pentru  $t_{8/5}$  se situează între 6s și 20 s, în funcție de tipul tablei și de cerințe.

#### 5. Sârme tubulare adecvate

Pentru toate încercările din cadrul experimentărilor realizate s-au utilizat numai sârme tubulare cu profil nesudat.

have a low Ni-content. The high Ni-content only causes a tough, easily formable structure if the Mn-content in the base metal is significantly below 1.0%. This limit can be raised to 1.2% without problems in weld metal structures with a Ni content of 3%.

#### 4. Welding processing information

All steels listed in tables 1 and 2 are classified as susceptible to cold cracks and hydrogen-induced crack formation. Since the cold crack behavior of steels greatly influences welding processing and therefore component production costs, steel producers and research institutes have recently conducted extensive cold crack studies. Several formulas for determining the carbon equivalent have been developed in order to define the cold crack sensitivity of individual steels and weld metals. Worldwide, there are 4 ways to calculate the carbon equivalent:

a. 
$$CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$$

This equation was derived by multiple regression of results of cold crack tests which have been performed at Thyssen Stahl AG over the past years.

b. 
$$CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

The equation above was derived from hardness measurements. It is called IIW carbon equivalent.

c. 
$$PCM = C + Si/30 + (Mn+Cu+Cr)/20 + Mo/15 + Ni/60 + V/10 + 5*B$$

This equation was derived by multiple regression of Tekken test results.

d. 
$$CEN = C + [0.75+0.25*tanh(20*(C-0.12))] * {A}$$
  
 ${A} = Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/20 + (Cr+Mo+V+Nb)/5 + 5*B$ 

Since the description of cold crack behavior by using different carbon equivalents remains unsatisfactory, Japanese researchers tried to obtain better information about cold crack behavior by means of a purely formal mathematical combination of the IIW carbon equivalent CE and the PCM formula. The effect of the tanh function is that, purely formally, the calculated values are similar to the values calculated according to the CE formula in case of car-bon contents above 0.12 % and that in the case of carbon contents below 0.12 % the calculated values are similar to the values calculated according to the PCM formula.

In table 3 the carbon equivalents which were calculated using

Tabelul 4. Influența tipului sudurii asupra  $t_{8/5}$ /
Table 4. Influence of the weld type on  $t_{8/5}$ 

tip sudură/ type of weld	symbol/ symbol	$\mathbf{F_2}$	F <sub>3</sub>
rând depus pe tablă / deposited run		1	1
rânduri intermediare în cazul sudării cap pa cap, în rost / filler beads, butt joint	<b>-</b>	0,9	0,9
sudră în colţ, într-un singur rând / fillet weld, corner joint	<b>L</b>	0,9–0,67	0,67
sudură în T, într-un singur rând / fillet weld, T joint		0,45–0,67	0,67

# Sudare MAG

# 5.1. Producerea i avantajele sârmelor tubulare cu profil nesudat

Exista pe piață o mulțime de materiale de adaos, dar o privire mai atentă scoate în evidență diferente semnificative. În figura 2 sunt prezentate câteva micrografii ale sârmelor tubulare existente pe piață.

- sârmă tubulară cu profil nesudat (system MEGAFIL®)
- sârmă tubulară cu profil de închidere.

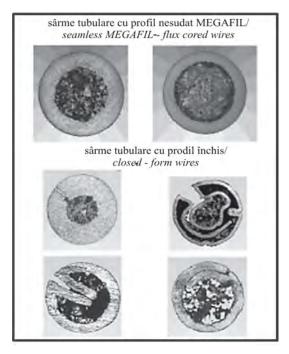


Figura 2. Micrografii ale sârmelor tubulare/ Figure 2. Micrographs of flux-cored wires

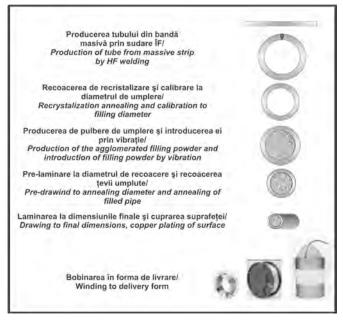


Figure 3. Production of MEGAFIL flux-cored wires

Procesul de producție este prezentat în figura 3. O platbandă continuă cu o lățime de 50 mm și o grosime de 2 mm este utilizata ca material inițial. Aceasta este sudată cu curenți de înaltă frecvență. După recoacerea de recristalizare, pulberea de umplere este introdusă în tub și compactată prin mișcările de oscilație

different methods and which can be regarded as characteristic for the steel grades in question are shown in comparison. Although the analyses of the HY steels might be outside of the area of validity for Mn and Ni, a rough approximation of the cold crack sensitivity is given which can nevertheless be compared to that of the steels mentioned before. The cold crack behavior of the welded joints depends on the chemical composition of the base metal and the weld metal as well as the following factors:

- sheet metal thickness
- hydrogen content of the weld metal
- preheat and interpass temperature
- heat input
- residual stress behavior of the construction

However, in this context the interaction between cold crack sensitivity and mechanical quality characteristics of the welded joint have to be taken into account. In addition to the influencing factors stated above such as sheet metal thickness, energy input per unit length, preheat and interpass temperature these also include the geometry of the weld and the welding procedure. These procedure-specific actuating variables are united to form a parameter which is characteristic for the time-temperature curve during welding, namely the cooling-off time t8/5 [1/2]. This is the time during which the temperature of the weld seam and the heat-affected zone drops from 800°C to 500°C. T 8/5 can be calculated for two-and three-dimensional heat dissipation as a function of  $\eta$ , E, To and F2/3. In the case of three-dimensional heat dissipation wand thickness does not matter. Transition thickness depends on heat temperature and heat input. The effect of the welding procedure is included according to:

$$\begin{split} T_{8/5} &= (0.67 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot T_o) \cdot \eta \cdot E\{(1/500 - T_o) - \\ & 1/800 - T_o)\} \cdot F_3, & tridim \\ T_{8/5} &= (0.043 - 4.3 \cdot 10^{-5} \cdot T_o) \cdot \eta^2 \cdot E^2/d^2 \cdot [(1/500 - T_o)^2 - \\ & (1/800 - T_0)^2] \cdot F_2, & bidim \\ \text{with: } \eta &= 0.80 \text{ for MAG/M21} \\ \eta &= 0.85 \text{ for MAG/CO}_2 \\ \eta &= 0.75 \text{ for MIG/Ar, He} \end{split}$$

For the weld factors F2 and F3 table 4 is applicable.

If the material cools down too quickly, high hardness values are obtained in the heat-affected zone. If the material cools down too slowly, the required strength and toughness values of the HAZ might not be met. Experience has shown that field-tested t8/5 values are between 6 s and 20 s depending on the type of sheet metal and the requirements.

#### 5. Suitable flux-cored electrodes

For all tests and indications for suitability performed in the scope of the present work only seamless flux-cored electrodes were used.

# 5.1. Production and advantages of seamless flux-cored wires

There are a lot of filled filler metals on the market but a closer look reveals important differences. In figure 2 some examples of micrographs of common flux-cored electrodes on the market are shown.

- seamless flux-cored electrodes (MEGAFIL® system)
- closed-form flux-cored electrodes

The production process is shown in figure 3. A continuous

2/2008

ale unui vibrator. Apoi, produsul semifinit este laminat la diametrul la care se efectuează un tratament de recoacere. În timp ce stratul solidificat este recopt prin tratamentul de încălzire, hidrogenul provenit din pulbere este redus cu mult sub 5 ml / 100 g. Suplimentar, sârma este laminată la dimensiunea finală în mai multe etape, în timp ce este în mod repetat curățată. În final sârma este cuprată și lustruită [3].

Ținând cont de învelișul miezul sârmelor tubulare cu profil fără sudură, tipurile fără sudură au următoarele avantaje, în comparație cu sârmele cu sudură:

- sunt insensibile la absorbtia de umiditate
- calcinarea nu este necesară, chiar și după o depozitare prelungită
- valorile hidrogenului difuzibil sunt de obicei sub 4 ml / 100 g
- suprafața este cuprată, prin urmare transmiterea curentului este mai bună iar uzura contactului electric este redusă
- nu apar răsuciri ale sârmei, iar avansul sârmei este constant În general, redresoarele cu tensiune constantă sunt privite ca surse standard pentru toate sârmele tubulare la sudare cu gaz protector. Utilizarea tehnicii în impulsuri oferă avantaje suplimentare în ceea ce privește obținerea de suduri fără defecte. Oricum, trebuie să se asigure frecvența impulsurilor între 50Hz şi 100Hz pentru a putea fi optimizate caracteristicile sudurii.

#### 5.2. Selectarea tipul de aliaj

Pe baza sensibilității fisurării la rece a oțelurilor de granulație fină de înaltă rezistență, datorată hidrogenului s-a crezut ca trebuie utilizate sârme tubulare cu miez bazic. Prin optimizarea condițiilor de producere a sârmelor tubulare s-a reușit asigurarea unui conținut de hidrogen difuzibil sub 4ml/100g chiar și pentru tipurile cu pulberi metalice.

Acest lucru a facilitat utilizarea sârmelor tubulare cu pulberi metalice, sârme care oferă mult mai multe avantaje la sudare.

În tabelul 5 sârmele tubulare au fost atribuite tipurilor de oțel de înaltă rezistență. Se observă că tipurile cu pulberi metalice

strip of about 50 mm width and 2 mm thickness is used as primary material which is welded into tubes by high frequency welding. After recrystallization annealing the agglomerated filling powder is introduced into the tube and pre-compacted by the oscillating movements of a vibrator. Afterwards the semi-finished product is pre-drawn to the annealing diameter. While the solidified jacked is soft-annealed during this heat treatment, the hydrogen which comes from the filling powder is reduced to well below 5 ml/100 g. Subsequently, the wire is drawn to the final dimension in several stages while being repeatedly wet-cleaned during this process and finally the wire is copper plated and polished [3].

On account of the closed wire jacket the seamless types have the following advantages compared to seamed wires:

- insensitive to moisture absorption
- baking not required even after prolonged storage
- HD values generally below 4 ml / 100 g
- copper plated surface, therefore better current transition, less wear of contact tube
  - no torsion, no spin, stable wire feeding

Generally rectifiers with constant voltage characteristics are still to be regarded as the standard power sources for all gas protected flux-cored electrodes. The use of pulsing technique offers additional advantages with regard to spatter-free welds. However, it has to be ensured that the pulse frequency is between 50 Hz and 100 Hz in order to optimize the welding characteristics.

#### 5.2. Type and alloy selection

In the face of the cold crack sensitivity of high strength fine-grained structural steels on ac-count of hydrogen it was always thought in the past that basic flux-cored wires should be used. Optimized production conditions in flux-cored wire production have contributed to en-sure an HD content below 4 ml / 100 g even for the metal powder types. This has cleared the way for metal powder flux-cored wires which offer more welding advantages. In table 5 the individual flux-cored wires have

Tabelul 5. Sârme tubulare utilizate la sudarea diferitelor tipuri de oțeluri/ Table 5. Flux-cored wires used to weld different steels

tinul otelului/ tinul sârmei simbolizare/ C Si Mn P

steel grade	tubulare/ flux-cored wire	classification	%	% %	%	% %	%	%	<b>%</b>	%	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%
HY 80 550 N/mm <sup>2</sup>	MF 741 B MF 741 M	E 90 T5-G E 91 T1-G	0,05	0,4	1,2	0,02	0,015	-	0,5	1,0	650 750	560	22
	MF 940 M	E 91 T1-G	0,05	0,6	1,4	0,02	0,015			2,0	600 750	560	26
HY 100 690 N/mm <sup>2</sup>	MF 742 B MF 742 M	E 110 T5-K4 E 110 T1-K4	0,05	0,4	1,6	0,02	0,015	0,5	0,5	2,2	780 960	690	17
	MF 250 M	E 110 T1-K4	0,05	0,6	1,2	0,02	0,015			3,0	760 960	690	26
890 N/mm <sup>2</sup>	MF 745 B	E 110 T5-G	0,05	0,4	1,6	0,02	0,015	1,0	0,5	1,8	950 1100	890	14
960 N/mm <sup>2</sup>	MF 807 B	E 110 T5-G									950		
	MF 807 M	E 110 T1-G	0,07	0,5	1,3	0,02	0,015	1,2	1,0	2,3	1100	890	14
890 N/mm <sup>2</sup> 1100 N/mm <sup>2</sup>	MF 1100 M	E 120 T1-G	0,07	0,5	1,5	0,02	0,015	0,8	0,8	2,7		960	12
pentru suduri de prindere/ for tack welds	MF 240 M	E 81 T1-G	0,05	0,4	1,4	0,02	0,015			1,4	560 720	500	24

Sudare MAG

42 bid

au devenit în mod evident dominante. Se constată, de asemenea, că pentru limite de curgere  $R_{\rm p0,2}$  cuprinse între 550 și 690N/mm², în special pentru construcția de submarine, sârmele tubulare cu pulberi metalice sunt aliate doar cu Ni. Întrucât Cr și Mo au fost dispensate pentru caracteristici superioare ale sudării (stropire redusă, caracteristici de modelare mai bune în cazul sudurii fără mutarea piesei de prelucrat) nivelul rezistentei trebuie compensat prin conținuturi mai mari de Ni.

În domeniul cu valori ridicate pentru limita de curgere, de aproximativ 960 N/mm² și 1100 N/mm², sârmele tubulare MF 807 M/B și MF 1100 M pot fi schimbate între ele fără probleme. La acest nivel al rezistenței nu este încă dăunator ca rezistența la rupere a cusăturii sudate să fie puțin mai mica decât cea a metalului de bază. Într-unul din cazuri, MF 1100 M, a fost chiar calificat și pentru St E 890. Trebuie să se asigure în acest sens utilizarea unui consumabil mai slab pentru rădăcina sudurii. În special pentru sudura de prindere, ar trebui utilizat un aliaj antifisurare cu capacitate mare de deformare. În practică MF 240 M a dovedit că este, în particular, potrivit pentru aceasta sarcină.

# 6. Efectul dăunător al hidrogenului și al azotului

Hidrogenul are cei mai mici atomi dintre toate gazele și, dacă este prezent la temperaturi ridicate, este absorbit în structura metalului.

În funcție de tipul oțelului și de conținutul de hidrogen din metalul depus prin sudare, hidrogenul poate duce la fisurare în îmbinarea sudată. Fisurile induse de hidrogen nu apar neapărat imediat după sudare, Se poate întâmpla ca aceste fisuri să apară chiar la 72 de ore după sudare. Aceste fisuri se produc întotdeauna fără deformații, ele fiind transcristaline și

been attributed to the high strength steel grades. It becomes apparent that the metal powder types have already become clearly dominant. It can also be seen that in the area of the class of strength of  $Rp_{0,2}$  550/ $Rp_{0,2}$  690, especially for submarine construction, metal powder wires are only alloyed with Ni. As Cr and Mo have been dispensed with for better welding characteristics (less spatter, better modeling characteristics in cases of welding without moving the workpiece) the strength level must be compensated by higher Ni contents.

In the area of the highest yield points of about 960 N/mm<sup>2</sup> and 1100 N/mm<sup>2</sup> the wires MF 807 M/B and MF 1100 M can be interchanged without difficulties. The development in this field has not been completed yet. At this level of strength it is not harmful if the tensile strength of the welded seam is slightly below that of the base metal. In one case MF 1100 M was even qualified for St E 890 as well. It has to be absolutely ensured that a softer consumable is used for the root. Especially for the tack weld an absolutely crack-proof alloy with good deformation capabilities should be used as well. In practice MF 240 M has proven to be particularly suitable for this task.

#### 6. Harmful effect of hydrogen and nitrogen

Hydrogen has the smallest atoms of all gases and if it is present at high temperatures it is absorbed by the metal structure.

Depending on the steel grade and the hydrogen content in the weld metal, hydrogen may lead to cracks in the weld seam. The hydrogen-induced cracks do not necessarily occur immediately after welding. It may happen that cracks only occur up to 72 hours after welding. These cracks are always deformation-free and transcrystalline and transversal to the weld seam. Possible absorption sources and factors which favor crack formation are com-piled in figure 4.

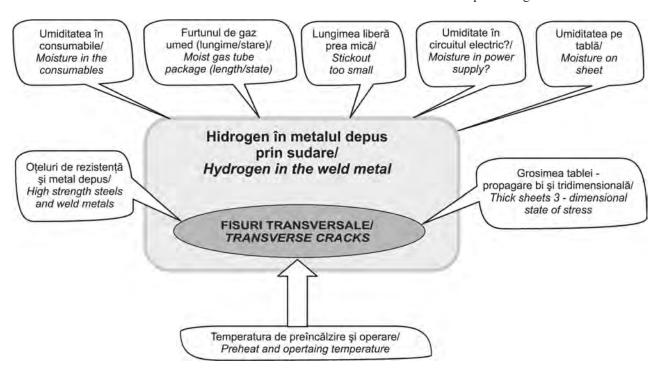


Figura 4. Absorb ia de hidrogen în metalul depus prin sudare i factorii favorizan i/

transversale pe îmbinarea sudată. Posibile surse de absorbție și factori care favorizează formarea fisurilor sunt prezentate în figura 4.

Amongst others the hydrogen content in the weld metal increases as stickout decreases. According to figure 5 the free wire end of wires of a 1.2mm  $\phi$  should be more than 20 mm in

2/2008 43

Printre altele, conținutul de hidrogen din metalul depus prin sudare crește o data cu scăderea lungimii libere

Conform figurii 5 lungimea liberă a sârmelor cu diametrul de 1.2mm ar trebui să fie mai mare de 20 mm pentru a se asigura

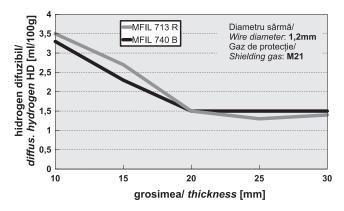


Figura 5. Influența lungimii libere asupra absorbției de hidrogen în metalul depus prin sudare/

Figure 5. Influence of stickout on hydrogen absorption into the weld metal

minimul de conținut de  $H_2$ . Oricum, studiile arată că, conținutul de azot din metalul depus prin sudare crește o dată cu creșterea lungimii libere. În general se aplică următoarele reguli:

- hidrogenul difuzibil HD din metalul de adaos, dacă este posibil, să fie sub 5 ml/100 g Dep. SG
- conținutul de azot din metalul depus prin sudare, dacă este posibil, să fie sub 80 ppm dar nu mai mult de 100 ppm

Dacă valoarea hidrogenului difuzibil HD este peste limita admisibilă, îmbinarea ar putea fi foarte sensibilă la formarea de fisuri. Figura 6 arată fisuri tipice induse de hidrogen într-o sudură de colt, între straturi, transversal pe îmbinare.

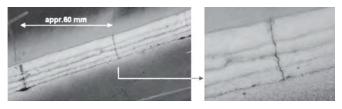


Figura 6. Fisuri într-o îmbinare de colt cauzate de hidrogen/ Figure 6. Cracks in a fillet weld cause by hydrogen

O metoda uzuală pentru evitarea acestor defecte este așanumita dehidrogenare. În acest proces componenta este încălzită la 250°C timp de 2 ore după sudare.

Figura 7 demonstrează că pentru sârme cu diametrul de 1,2 mm lungimea liberă nu trebuie sa depășească 20 mm. În caz contrar, se așteaptă o fragilizare a structurii metalului depus prin sudare datorată conținutulul de azot peste 100ppm, ceea ce ar putea duce la o tenacitate substanțial mai mică și astfel îmbinarea ar pierde capacitatea de deformare. Trebuie neapărat luat în considerarea faptul că, conținutul de azot poate fi diferit, în funcție de fiecare produs (sârmă).

Urmând aceste explicații se poate afirma că o lungime liberă de aproximativ 18mm pentru sârme cu diametrul de 1,2 mm poate fi considerată ca un compromis acceptabil.

#### 7. Sudarea oțelului tip Weldox 1100

După primele teste practice, au fost încercate mai multe tipuri de metal de adaos și îmbinări pe oțel de înaltă rezistență. order to ensure minimum H<sub>2</sub> content. However, studies show that the nitrogen content in weld metals increases as stickout increases. In general the following rules apply:

- diffus. hydrogen HD in weld metal if possible below 5 ml / 100g Dep. SG
- nitrogen content in weld metal if possible below 80 ppm but not more than 100 ppm

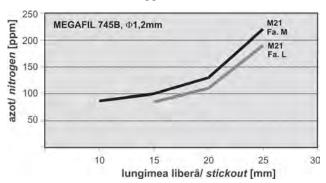


Figura 7. Influența lungimii libere asupra absorbției de azot în metalul depus prin sudare/

Figure 7. Influence of stickout on the nitrogen absorption into the weld metal

If the HD value is inadmissibly high, the seam might very well be sensitive to crack formation. Figure 6 shows some typical hydrogen-induced cracks in a fillet weld through all layers, transversal to the seam.

A common method to avoid such defects is the so-called low hydrogen annealing. In this process the component is heated to 250°C for 2 hour s after welding.

Figure 7 shows that for wires with a  $\phi$  of 1.2 mm the stickout must not exceed 20 mm either. Otherwise a significant embrittlement of the weld metal structure due to nitrogen contents above 100 ppm has to be expected which would lead to a substantially decreased notched impact strength and the seam would lose its deformation capabilities. It must absolutely be taken into account that the nitrogen content can be different depending on each product. Following these explanations it can be stated that a stickout of appr. 18 mm for wires of a 1.2 mm  $\phi$  can be considered as an acceptable compromise.

#### 7. Welding of steel quality Weldox 1100

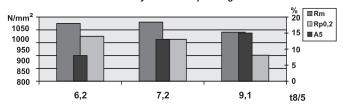
After first practical tests several weld metal test specimens as well as joints on high strength steel WELDOX 1100 were produced. The results of the mechanical quality characteristics of the pure weld metal in dependence on t<sub>8/5</sub> time are shown in figure 8. The process parameters remained absolutely constant during the execution of the welds. Only different cooling down rates of 6.2 s, 7.2 s and 9.1 s were realized by changing the operating temperature. The corresponding interpass temperatures of 120°C, 160°C and 220°C are entered into the diagram as well. As expected, the best notched impact strength values can be achieved with the smallest t<sub>8/5</sub> time, while an acceptable level can also be obtained in the upper cooling down range, although with small reserves. The yield point of the pure weld material also reacts according to the rules of metallurgy and drops as t8/5 time increases.

It can be assumed that the lower limit of 900 N/mm<sup>2</sup> is a deciding criterion for many applications without representing the risk of a crack in the weld. It is positive that the magical limit of 950 or 960

Sudare MAG

Rezultatele caracteristicilor mecanice de calitate obținute pe probe din metal depus în funcție de timpul t<sub>8/5</sub> sunt prezentate în figura 8. Parametrii procesului au rămas absolut constanți în timpul realizării sudurilor. Vitezele de răcire diferite, de 6,2 s, 7,2 s și 9,1 s, au fost realizate schimbându-se temperatura de operare. De asemenea, în diagrame sunt incluse și temperaturile între treceri corespunzătoare, de 120°C, 160°C și 220° C. După cum

#### Rezistența la rupere și limita de curgere în funcție de timpul t8/5 Fracture resistance and yield limit depending on time t8/5



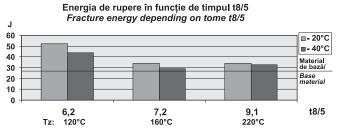


Figura 8. Caracteristicile metalului depus prin sudare, obținute cu sârma MEGAFIL® 1100 M ř 1,2 mm/
Figure 8. Characteristics of the weld metal, generated by using MEGAFIL® 1100 M ř 1.2 mm

era de așteptat, cele mai bune valori de tenacitate au fost atinse cu  $t_{8/5}$  cel mai mic. Un nivel acceptabil poate fi de asemenea atins în gama superioară de răcire, dar cu puține rezerve. Limita de curgere a materialului depus reacționează și ea, în funcție de regulile metalurgiei și se micșorează cu creșterea lui  $t_{8/5}$ .

Se poate considera că limita inferioară de 900 N/mm² reprezintă un criteriu decisiv pentru multe aplicații, fără risc de fisurare în sudură. Cu siguranță limita de 950 sau 960 este depășită în mai puțin de 7,2 secunde. Pentru îmbinări cu constrângeri inferioare, utilizarea unei calități de 960 nu pune probleme.

Acest fapt este evidențiat în figura 9 prin rezultatele sudurilor. Aici, influentele modului de execuție a rădăcinii și poziția de sudare asupra caracteristicilor mecanice, sunt examinate pe cinci îmbinări sudate. Temperatura între treceri pentru toate aceste suduri a fost de 180°C. Pentru table cu o grosime de s = 12 mm aceasta corespunde unui timp  $t_{8/5}$  de 6,9 sec. pentru poziția PA, 16,2 sec. pentru poziția verticală ascendentă PF. Rădăcina a fost executată în următoarea ordine: cu MEGAFIL® 710 M fără nichel, cu MEGAFIL® 240 M și 940 M conținând nichel. Pentru ultimele două probe, s-a utilizat pentru rădăcină MEGAFIL® 1100 M.

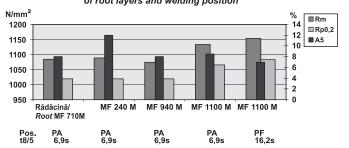
Se poate constata că limita de curgere a fost peste 1.000 N/mm<sup>2</sup> în toate cazurile.

Deși efectul sârmei mai moale la rădăcină se poate observa ușor, el nu are nicio influență asupra valorii tenacității. Este de menționat faptul ca nivelul alungirii la rupere este în general scăzut. Motivul acestui fapt este datorat tijei de frânare a instalației de încercare, care nu prezintă valorile reale când îmbinarea este testată, așa cum se știe în general. Trebuie evidențiat că toate probele au prezentat fisuri în sudură. Valorile rezilienței se află în intervalul uzual de aproximativ 40 J la – 20°C sau – 40°C iar comportarea lor corespunde exact tipului de aliaj, care nu prezintă o pantă frontală, în comparație cu oțelurile moi, slab aliate [4].

is exceeded in less than 7.2 seconds. For welds with under matching constraints the use of 960 quality would pose no problems.

This is underlined in figure 9 with the results of the welds. Here the influences of the root execution and the welding position on the mechanical quality characteristics were examined on five welds. The interpass temperature for all welds was  $180^{\circ}$ C. For sheets with a thickness of s = 12 mm this corresponds to a  $t_{8/5}$ 

#### Limita de curgere și rezistența la rupere în funcție demetalul straturilor de rădăcină și de poziția de sudare Yield limit and fracture resistance depending on the metal of root layers and welding position



Energia de rupere în funcție de metalul straturilor de rădăcină și de poziția de sudare/ Fracture energy depending on the metal

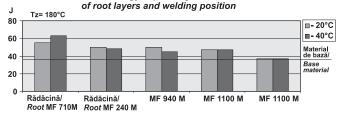


Figura 9. Caracteristici mecanice ale sudurilor, ob inute cu MEGAFIL® 1100 M ř 1,2 mm, GW: WELDOX 1100, s = 12mm/ Figure 9. Mechanical quality characteristics of the welds, generated usingMEGAFIL® 1100 M ř 1.2 mm, GW:WELDOX 1100, s=12mm

time of 6.9 sec. in the PA position, 16.2 sec. in the vertical-up PF position. The root was executed in this order with MEGAFIL® 710 M without nickel and with MEGAFIL® 240 M or 940 M containing nickel. For the last two samples MEGAFIL® 1100 M was used for the root. It can be stated that the yield point was above 1,000 N/mm<sup>2</sup> in all cases. Although the effect of the softer root wire can be easily seen, it has no influence on the notch bar impact value. What is exceptional however is the fact that the breaking elongation level is generally low. The reason for this is the tension bar itself, namely as flat test piece, which does not represent the real values when the joint is tested, as is generally known. It has to be stated that all test samples cracked in the weld seam. The notch bar impact values are in the usual range of about 40 J at  $-20^{\circ}\text{C}$  or  $-40^{\circ}\text{C}$  and their behavior corresponds exactly to the alloy type which does not show a steep front compared to low alloyed, normal mild structural steels [4].

Based on this state of information the TÜV performance test has already been performed.

#### 8. Summary

The processing of high strength fine-grained structural steels requires special precautionary measures in order to realize crack-free joints with sufficient strength and roughness characteristics. The result of decades of research and development in steel production on the one hand and processing on the other hand have led to a concept in which

2/2008 45

Bazat pe aceste informații, testul de performanță TÜV a fost deja realizat.

#### 8. Rezumat

Procesarea oțelurilor călite cu granulație fină și de înaltă rezistență necesită masuri speciale de precauție în vederea realizării de îmbinări fără fisuri, cu caracteristici de rezistență și duritate bune. Rezultatele deceniilor de cercetare și dezvoltare în domeniul producerii și prelucrării oțelului au condus la un concept în care au fost selectați și definiți factorii cei mai importanți, cât și interacțiunea dintre ei. Aceștia includ:

- carbonul echivalent
- timpul de răcire  $t_{8/5}$  la propagarea bi- și tri-dimensională
- energia liniară
- comportarea la fisurare la rece, nivelul hidrogenului
- compoziția chimică
- tipul oţelului, grosimea tablei
- temperatura de preîncălzire și între treceri
- comportarea tensiunilor reziduale din construcția sudată
- caracteristicile mecanice
- geometria îmbinării
- procedurile de sudare și materialele pentru sudare

Deși sunt necesare specificații privind unii dintre parametrii de mai sus, va fi problematică satisfacerea acestor cerințe în condiții practice. Printre altele, pe baza multor ani de experiență în producerea de automacaralelor, lucrarea arata că prin utilizarea unor metode pragmatice și simple teoria complexă poate fi redusă la un nivel de care o firmă producătoare de structuri sudate, calificată, nu are de ce să se teamă. Acest fapt este în particular întărit de utilizarea sârmelor tubulare în mediu de gaz protector, care sunt disponibile pentru S 1100 SL.

Lucrare prezentată la conferința internațională "Tehnologii inovative pentru îmbinarea materialelor avansate", Timișoara, 12-13.06.2008

Paper presented at the international conference "Innovative technologies for joining advanced materials, Timişoara, Romania, 12-13.06.2006

the most important contributing factors and parameters as well as their interactions have been collected and defined. They include:

- carbon equivalent
- cooling down time  $t_{8/5}$  two-and three-dimensional
- heat input, energy input per unit length
- cold crack behavior, hydrogen content
- chemical composition
- steel grade, sheet thickness
- preheat and interpass temperature
- residual stress behavior of the construction
- mechanical quality characteristics
- seam geometry
- welding procedures and filler metals

Although specifications regarding some of the parameters above are necessary, it will be problematic to meet these requirements under practice conditions. Amongst others based on many years of experience of a mobile crane producer the report shows that by using some pragmatic and fairly simple methods the complex theory can be reduced to an extent which a qualified welding company must not be afraid of. This is particularly supported by the use of shielding gas flux-cored wires which are even available for S 1100 SL with permits.

#### Bibliografie / Bibliography

- [1] Stahl-Eisen-Werkstoffblätter SEW 88 Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, 3<sup>rd</sup> edition April 1987
- [2] J. Degenkolbe; D. Uwer; H. Wegmann: Kennzeichnung von Schweißtemperatur-zyklen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften von Schweißverbindungen durch die Abkühlzeit t8/5 und deren Ermittlung, Thyssen Techn. Ber. (1985), H.1, S. 57-73, and IIW Doc.IX-1336-84.
- [3] E. Engindeniz: Metallschutzgasschweißen mit nahtlosen Fülldrahtelektroden part 1; Der Praktiker, 08. 2005, p. 204-207 part 2, Der Praktiker, 09. 2005, p. 238-242
- [4] E. Engindeniz; W. Würmell; F. Hanus, MAG-Schweißen hochfester Sonderbaustähle mit Fülldrähten, Conference report of the GST 2005 in Essen

Sudare MAG

46 bid