



## **Analysis of the Causes of Low Impact Toughness in the Heat Affected Zone of AH36 Shipbuilding Steel Welded Joint after Submerged Arc Welding**

Lyudmil CHOLAKOV, Plamen PETROV

Technical University of Varna; Varna, Bulgaria,  
e-mails: [lcholakov0782@gmail.com](mailto:lcholakov0782@gmail.com), [petpl@abv.bg](mailto:petpl@abv.bg)

### **Abstract**

In this paper are analysed the causes of low impact toughness in the heat affected zone of welding ship steel under a flux layer. After verification tests for tensile, impact toughness and static bending mechanical characteristics, was found not to meet impact toughness requirements and the cause was determined.

**Keywords:** submerged arc welding,

## **Анализ на причините на малка ударна жилавост на в зоната на термично влияние на заварено съединение от корабостроителна стомана АН36 след подфлюсово заваряване**

Людмил ЧОЛАКОВ, Пламен ПЕТРОВ

### **1. Увод**

Световната корабостроителна индустрия в момента е доминирана от производството в далечния изток, като растежът на китайското и южнокорейското корабостроене сега изпреварва Запада. Корабостроителната индустрия в България включва малък брой корабостроителници, които изграждат специализирани кораби, включително влекачи, фериботи и плавателни съдове за бреговата охрана, както и кораби за риболов и проучвания/изследвания. Въпреки че има множество материали, използвани в корабостроенето, стоманата остава най-широко използваната. И има основателна причина: стоманата е достатъчно здрава, за да издържи на умората по време на целия експлоатационен период на кораба в открито море. В корабостроителната индустрия стоманата се категоризира по четири степени на якост: класове А, В, D, Е.

### **2. Експериментална процедура**

В статията са анализирани резултати от контрола на образец заварен подфлюсово от корабостроителна стомана АН36 DNV GL RULES FOR CLASSIFICATION:SHIPS Pt.2 Ch.2, като поставената цел е да се установят причините за получените негативни резултати по някои от изискваните механични характеристики.

Използваната стомана попада в групата на конструкционни стомани с по-висока якост с минимална граница на провлачване от 360N/mm<sup>2</sup>.

На таблиците са представени химичният състав и механичните характеристики (таблица 1;2;3;4).

**Таблица 1 Изисквания химичен състав на стоманата спрямо DNV GL RULES**

Grade	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Nb	V	Ti	N
NV A27S, NV D27S, NV E27S	0.18	0.50	0.70 to 1.60	0.035	0.035	0.20	0.08	0.40	0.35	3)	0,05 3)	0,10 3)	0,02 3)4)	-
NV A32, NV D32, NV E32, NV A36, NV D36, NV E36 <sup>7)</sup> , NV A40, NV D40, NV E40 <sup>7)</sup>	0.18	0.50	0.90 to 1,60 2)	0.035	0.035	0.20	0.08	0.40	0.35	3)	0,05 3)	0,10 3)	0,02 3)4)	-
NV F27S, NV F32, NV F36, NV F40	0.16	0.50	0.90 to 1.60	0.025	0.025	0.20	0.08	0.80	0.35	3)	0,05 3)	0,10 3)	0,02 3)4)	0,009 5)

1) Given value is maximum content (by weight) unless shown as a range or as a minimum.  
 2) Minimum 0.70% for thicknesses up to and including 12.5 mm.  
 3) The steel shall contain grain refining elements Al, Nb, V or Ti, either singly or in any combination, see [2.6.6]. The total content of Nb+V+Ti shall not exceed 0.12%.  
 4) Maximum 0.05% Ti for TM steels subjected to agreement.  
 5) 0.012% if Al is present.  
 6) For NV E36 BCA and NV E40 BCA as per [7] the following limits are prevailing: %Mn = 0.90-2.00%, %P<sub>max</sub> = 0.020%, %S<sub>max</sub> = 0.020%, %Cu<sub>max</sub> = 0.50%, %Cr<sub>max</sub> = 0.25%, %Ni<sub>max</sub> = 2.0%

**Таблица 2 Химичен състав на стоманата**

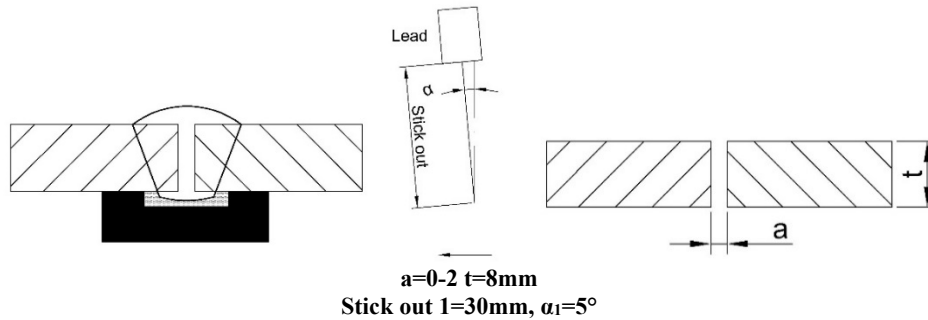
CHEMICAL COMPOSITION																					
C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr	Cu	Ni	Ti	V	Nb	Mo	B	Ca	Pb	As	Sn	Sb	Bi	CEV
10 <sup>-2</sup> %	10 <sup>-2</sup> %	10 <sup>-2</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-2</sup> %	10 <sup>-2</sup> %	10 <sup>-2</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-4</sup> %	10 <sup>-4</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-2</sup> %
C71 17	C72 23	C73 105	C74 13	C75 10	C76 40	C77 7	C78 12	C79 33	C80 10	C81 1	C82 1	C83 1	C84 17	C85	C86	C87	C88	C89	C90	C91	C93 40

**Таблица 3 Изисквани механични показатели на стоманата спрямо DNV GL RULES**

Grade	Yield strength R <sub>eH</sub> minimum [MPa]	Tensile strength R <sub>m</sub> [MPa]	Elongation A5 minimum [%]	Impact energy, minimum average [J] <sup>1)</sup>						
				Test temperature [°C]	t ≤ 50 [mm]		50 < t ≤ 70 [mm]		70 < t ≤ 150 [mm]	
					L	T	L	T	L	T
NV A27S NV D27S NV E27S NV F27S	265	400 to 530	22 <sup>2)</sup>	0 -20 -40 -60	27	20	34	24	41	27
NV A32 NV D32 NV E32 NV F32	315	440 to 570	22 <sup>2)</sup>	0 -20 -40 -60	31	22	38	26	46	31
NV A36 NV D36 NV E36 NV F36	355	490 to 630	21 <sup>2)</sup>	0 -20 -40 -60	34	24	41	27	50	34

Таблица 4 Механични показатели на стоманата

TENSILE TEST					IMPACT TEST							
Location <sup>2)</sup>	Direction <sup>1)</sup>	ReH <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup>	Rm <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup>	A %	Direction <sup>1)</sup>	Type <sup>4)</sup>	Individual values <sup>5)</sup>			Mean value <sup>6)</sup> J	At <sup>7)</sup> °C	Width of tests piece <sup>8)</sup>
							1 <sup>3)</sup>	2 <sup>3)</sup>	3 <sup>3)</sup>			
C01	C02	C11	C12	C13	C02	C40	C42	C43	C42	C43	C03	C41
1	T	404	522	28.9	L	ISO-V	101	98	105	101	0	10X7.5



Фиг.1. Подготовка на краищата за заваряване

Процесът на едностранно заваряване под слой от флюс върху флюсова медна подложка (флюсова възглавница), използвана за заваряване на големи стоманени панели в корабостроенето допринесе много за рационализирането на процеса на сглобяване на панели. Това е високоефективен метод за заваряване, който се прилага при много корабостроителници повече от 20 години.

Заваряването на образеца се извърши на станция за едностранно подфлюсово заваряване с флюсова медна подложка (флюсова възглавница). Подготовката се е направена съгласно фиг.1., а параметрите на заваряване са описани в таблица 5.

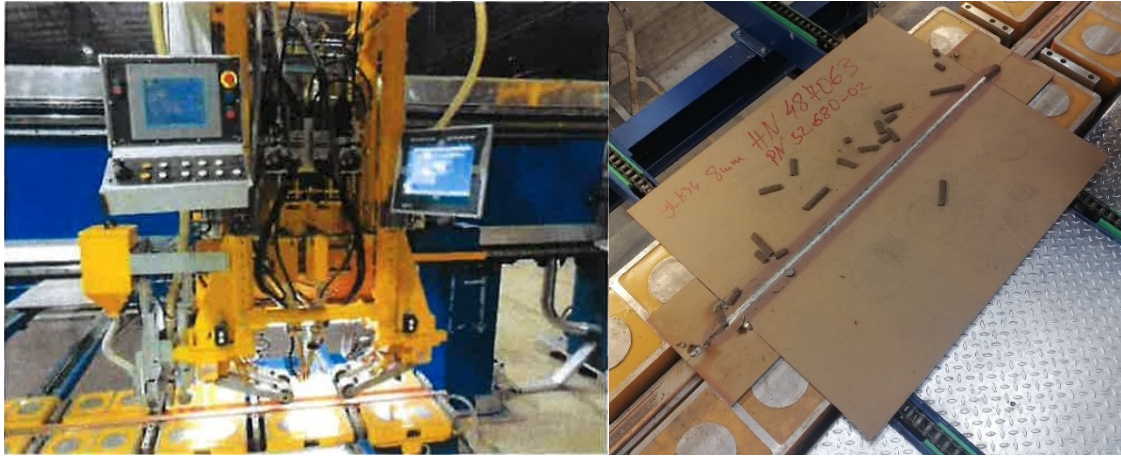
Таблица 5

Run	Process	Torch angle	Size of filler [mm]	Current [A]	Volt [V]	Type of Current/ Polarity	Wire feed Speed [m / min]	Freq. [Hz]	Balan. %DC+	Offset %	Phase angle	Travel Speed [cm /min]	Heat input [kJ / mm]
1	121	Pull 5	Ø 4	880±30	34±2	CC Square wave	2.0±0.5	40	75	0	-	55±50	3.2±0.3

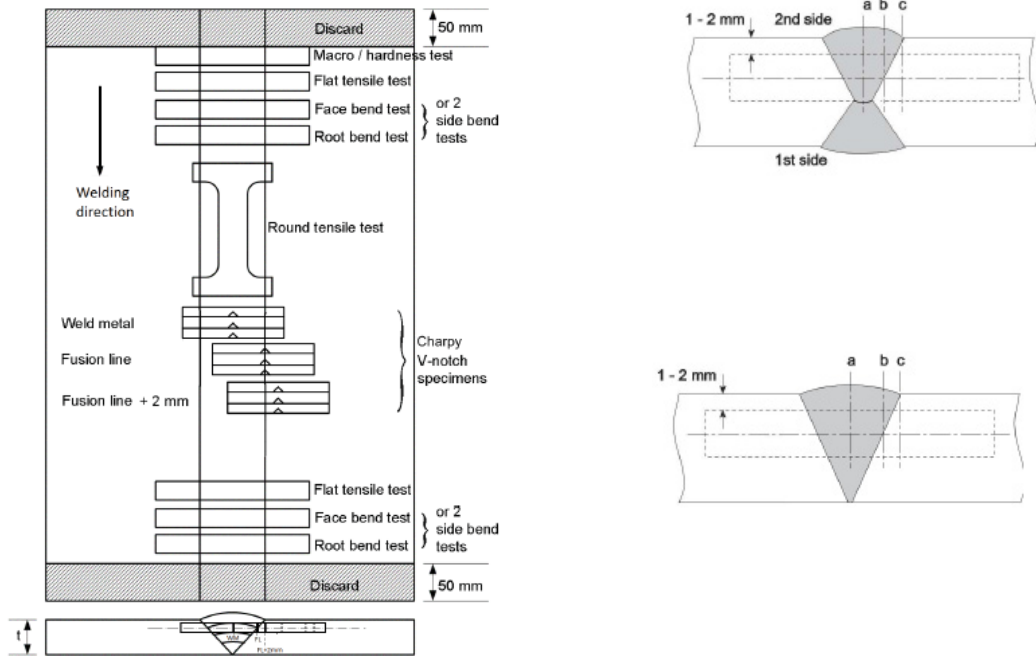
Съоръжението за заваряване и полученото заварено съединение са показани на фиг. 2.

От заварения образец бяха изработени образци съгласно схемата на фиг.3.

Изпитването на ударна жилавост, съгласно изискванията за стоманата е при  $T=0^\circ\text{C}$  (фиг. 4).



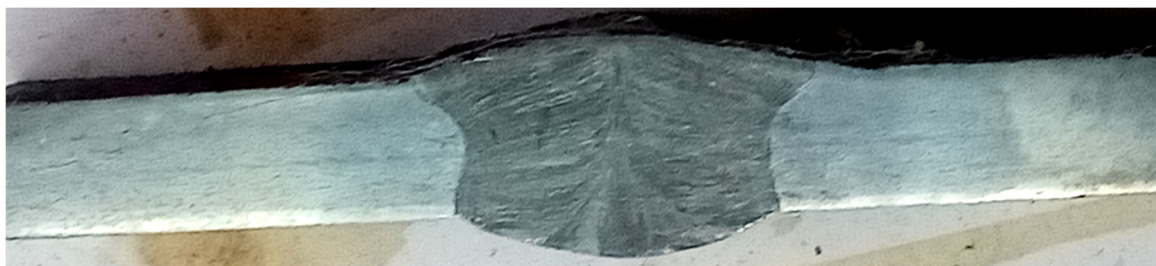
Фиг.2. Апаратура за заваряване и завареното съединение



Фиг.3 Позиции за изрязване на заготовките за пробни тела и линии за поставяне на надреси



Фиг.4 Пробни тела след изпитване на ударна жилавост


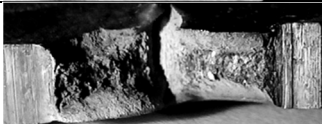
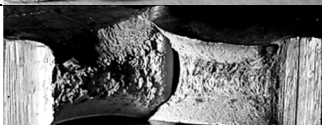
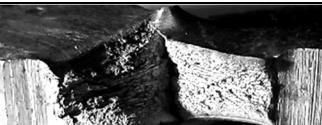
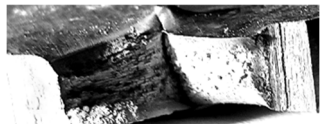
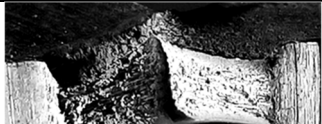


Фиг. 5. Макрошлиф на завареното съединение

### 3. Резултати

В таблица 6 по-долу са дадени резултатите от извършените проби на ударна жилавост, на фиг.6 е показана получената макроструктура, а на фиг.5 пробните тела след изпитване на ударна жилавост.

Табл.6 Резултати от изпитване на ударно огъване

№	подрез/notch	T	a	b	s	K	KCV	Лом/Fractures
-	-	°C	cm	cm	cm <sup>2</sup>	J	J/cm <sup>2</sup>	-
1	в заваръчния шев	0	0,75	0,81	0,61	46,1	75,6	
2	в заваръчния шев	0	0,75	0,79	0,59	21,6	36,6	
3	в заваръчния шев	0	0,76	0,81	0,62	34,3	55,3	
<b>Средно / Average value</b>						<b>34,0</b>	<b>55,8</b>	
4	по линията на сплавяване +2 мм	0	0,76	0,82	0,62	23,5	37,9	
5	по линията на сплавяване +2 мм	0	0,75	0,79	0,59	21,6	36,6	
6	по линията на сплавяване +2 мм	0	0,74	0,81	0,6	18,6	31,0	

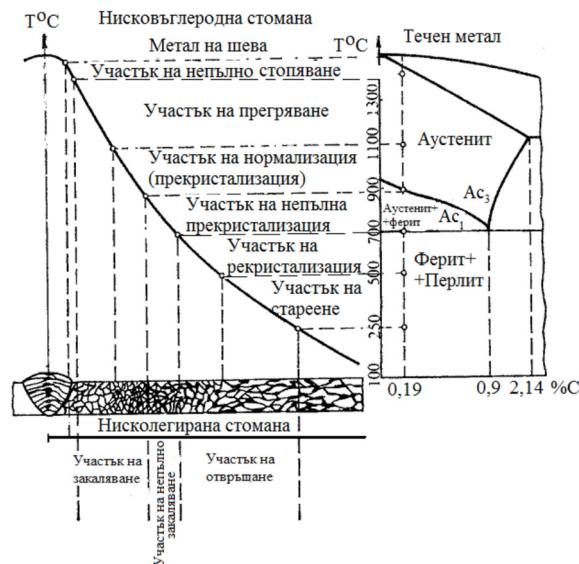
Средно / Average value				21,2	94,0	
за AH36 съгласно DNV rules for classification Ships – минимална енергия на удара, за стандартен образец (KV, J) при 0°C / for AH36 according to DNV rules for classification Ships – minimum impact energy for a standard sample (KV, J) at 0°C respectively				34*		

\*-за пробни тела с дебелина 7,5 mm  $KV = ((5 \cdot 34) / 6) = 30 J$

#### 4. Анализ на получените резултати

За работоспособността на заваръчното съединение до голяма степен се съди по структурните превръщания в зоната на термично влияние намираща се около метала на шева и отделена от него от преходната зона – зоната на частично стопяване. Последната се вижда много добре на макро шлиф, вследствие на различната устойчивост на металите на шева и на основния метал спрямо разяждането с реактив. На макрошлифовете в повечето случаи липсва ясно очертана граница между метала на шева и основния метал. Структурата на околошевната зона зависи от изходната структура на основния метал, от характера на физическото въздействие върху него и от степента на завършеност на фазовите и структурните превръщания в процеса на заваряването. Най-съществено е количеството на структурните изменения след заваряване при металите и сплавите, претърпяващи полиморфни превръщания.

В зависимост от температурата на нагриване при електродъгово заваряване на нисковъглеродна стомана, в строежа на заваръчното съединение се различават следните характерни зони:



Фиг. 6 Схема на строежа на ЗТВ, на заваръчно съединение изпълнено електродъгово

#### Област на непълно стопяване (преходна зона).

Тази област се намира между ликвидуст и солидуст линиите от Fe-C диаграма. Състои се от частично стопен основен и напълно стопен допълнителен метали. В тази зона се извършва свързването на основния с допълнителния метал. Тя има едрозърнеста структура и определя до голяма степен качеството на завареното съединение.

### **Област на прегряване.**

Тази област обхваща метала, лежащ в температурния интервал в близост до солидус линията (1100 до 1400°C). В нея се получава едрозърнеста, а в някои случаи и прегрята структура. В резултат на това се намалява пластичността на метала без да намалява съществено якостта му (якостта на удар пада с около 25÷30%). Степента на уедряване на зърната зависи основно от продължителността на загряването и от условията на заваряване.

### **Област на нормализация.**

Обхваща метала, загрят между температури 1000÷1100°C и точката A3 (около 900°C). Поради пълното прекристализиране при загряването и следващото охлаждане в тази област се получава дребнозърнеста структура. Тя има по-добри механични характеристики от изходната структура на основния метал.

### **Област на непълна прекристализация.**

Областта лежи между точките A3 и A1 (900÷725°C). При заваряването на метала в този температурен интервал една част от ферита остава непроменен (перлитът се превръща в аустенит). При следващото охлаждане от аустенита най-напред ще се отдели дребнозърнест ферит, а след това ще се получи перлит. Тази нова структура ще се образува около непроменените, сравнително по-едри феритни зърна. Поради разликата в едрината на зърната, може да се получи понижаване на механичните свойства в областта на непълна прекристализация в сравнение с основния (непроменен) метал.

### **Област на рекристализация.**

Намира се под точката A1 (725÷500°C). Структурата в този температурен интервал се изменя само тогава, когато металът, поради заваряването, е бил деформиран пластично в студено състояние. В резултат на рекристализацията  $[TR=(0,3\div 0,4)TT]$  се получава равноосна ферито-перлитна структура.

В областите, загрети до температура под 500°C (500÷200°C), металът намалява пластичността си (синя трошливост), без да се извършват забележими структурни изменения.

## **5. Изводи**

Типичната линейна енергия при подфлюсово заваряване е 20kJ/cm. При използваните параметри стойността е с 62% по-голяма, което е довело до прегряване на зоната на термично влияние и намаляване на пластичността на метала. Пробни тела 4, 5, 6 са под допустимите стойности на ударна жилавост.

Потвърждава се получаването на едрозърнеста, а в някои случаи и прегрята структура. В резултат на това се намалява пластичността на метала, без да намалява съществено якостта му (якостта на удар пада с около 75÷80%). Степента на уедряване на зърната, зависи основно от продължителността на загряването и от условията на заваряване.

Изискванията за елементите, обозначени като финозърнести елементи (Al, Nb, V и Ti), са дадени в таблица 1 и 7, като стойностите в таблица 1 са максимални, а тези в таблица 7 са минимални. От двете таблици излиза че Al+Ti+Nb не трябва да превишава 0,12% както и Al+Nb не по-малко от 0,015%+0,010%. Използваната стомана, която е произведена и сертифицирана, не отговаря на изискванията на DNV GL RULES.

Таблица 7

Approved single element or combination of elements	Fine grain elements, minimum content [%]			
	Al <sup>1)</sup>	Nb	V	Ti
Al	0.020 <sup>2)</sup> 0.02 <sup>3)</sup> 0.018 <sup>4)</sup>	-	-	-
Nb	-	0.02	-	-
V	-	-	0.05	-
Ti	-	-	-	0.007
Al+Nb	0.015	0.010	-	-

Approved single element or combination of elements	Fine grain elements, minimum content [%]			
	Al <sup>1)</sup>	Nb	V	Ti
Al+V	0.015	-	0.030	-
Al+Nb+V	0.015	0.010	0.030	-
Al+Nb+Ti	0.015	0.010	-	0.007
Other combinations <sup>5)</sup>	0.015	0.010	0.030	0.007

1) Total content. If acid soluble content is determined the given value is reduced by 0.005%.  
2) For normal and high strength steels.  
3) For extra high strength steels except delivery condition QT.  
4) For extra high strength steels with delivery condition QT.  
5) The specified minimum content applies for the elements given in the qualified combination only, as listed on the manufacturer approval certificate.

## Литература

1. Люцканов, Г.К., Изследване заваряемостта на нисковъглеродни, нисколегирани стомани с повишена якост, автореферат, <http://old-www.naval-acad.bg/Bg/konkursi-proceduri/arhiv-014-d/GLuckanov/avtoreferat.pdf>
2. DNV Rules for classification edition july 2022, <https://www.dnv.com/news/dnv-rules-for-ships-july-2022-edition-227477>
3. <https://beamcut.com/types-of-steel-used-in-shipbuilding/>
4. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-shipbuilding>
5. Metallurgy Variables in Fusion Welding, <https://dl.asminternational.org/technical-books/monograph/124/chapter-abstract/2321438/Metallurgy-Variables-in-Fusion-Welding?redirectedFrom=fulltext>