

ОЦЕНЯВАНЕ НА СЪПРОТИВЛЕНИЕТО НА ВИСОКОЯКА, НИСКОЛЕГИРАНА СТОМАНА S 960 QL КЪМ ОБРАЗУВАНЕТО НА СТУДЕНИ ЗАВАРЪЧНИ ПУКНАТИНИ

Елисавета Ташева, Пламен Ташев, Добринка Атнаджова

elitasheva@abv.bg, weld@abv.bg, atmadzhova@abv.bg

*ВТУ "Т. Каблешков", ИМСТЦХ - БАН „Акад. А. Балевски”
ул. "Гео Милев" 158, София 1574, ул. "Шипченски проход" 67, София 1574
БЪЛГАРИЯ*

Резюме: С помощта на специализирана проба са проведени експерименти за оценяване на склонността към образуване на студени пукнатини на високояка стомана S960QL използвана при производството на отговорни, динамично натоварени конструкции.

Ключови думи: заваряване, студени заваръчни пукнатини, стомани, технологични и машинни проби, заварени съединения, високояки стомани

1. Въведение

S 960 QL е нисколегирана високо яка стомана, предназначена за изграждане на мостове, транспортни средства, кранове (фиг.1), кораби и др, която благодарение на своята структура има повишена якост и много добра изнosoустойчивост. Нарастващото използване на висококачествени стомани с повишена якост позволява получаването на заварени конструкции с ниско тегло, които имат по-голяма товароносимост. Това дава значителни екологични предимства, като малка консумация на гориво и намаляване на вредните емисии. Използването на високояки стомани за заварени конструкции е затруднено поради тяхната неустойчивост по отношение образуването на студени пукнатини.



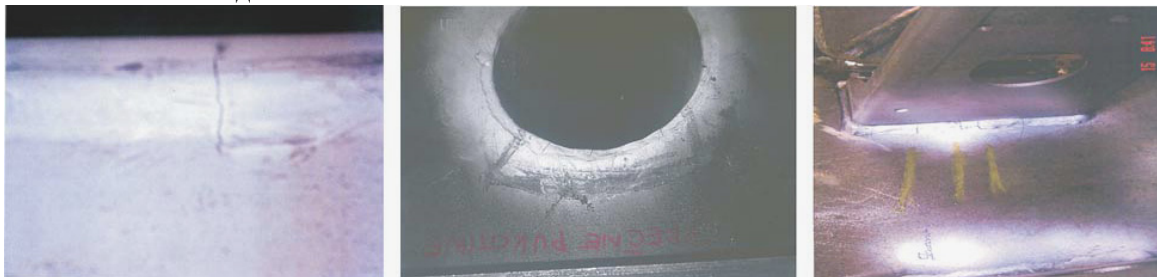
Фиг.1 Заварени конструкции от стомана S 960 QL

2. Теоретични основи

Появата на студени пукнатини в отговорни, динамично натоварени заварени конструкции, изработени от стомана S 960 QL е причина за извършване на изследване на заваряемостта ѝ. Извършеният анализ в производството на кранове сочи, че студените пукнатини се появяват

повече през пролетта и зимата, т.е. когато влажността на въздуха е максимална и температурата е най-ниска, което може да доведе до заключението, че високата скорост на охлаждане и увеличеното количество на свободен водород представляват рисков фактор за образуването на студени пукнатини. На фиг. 2 се вижда разположението (надлъжни и напречни) на пукнатините, които са се появили в така наречената зона на термично влияние (околошевната област). [11]

За да се постигне необходимото високо качество на заварени съединения от тази стомана е необходимо да се дефинират технологични параметри, които ще сведат до минимум условия за поява на студени пукнатини за да се даде оценка на заваряемостта на стомана S 960 QL и по възможност напълно да се избегнат.



Фиг.2 Видове пукнатини в заварени съединения изработени от стомана S 960 QL

За да има добра заваряемост, стомана S 960 QL трябва да съдържа въглерод по-малко от 0,1% [1]. Химическите елементи, с които е легирана заедно с въглерода и азот образуват карбиди, нитриди и карбонитриди. Добавянето на ниобий и ванадий е с цел да се увеличи нейната якост без да се увеличава съдържанието на въглерод или манган. Високото съдържанието на въглерод или манган оказва вредно въздействие върху заваряемостта и износоустойчивостта [1, 5]

Склонността към образуване на студени пукнатини може да се определи и чрез изчисляване на въглеродния еквивалент за стоманата. Той зависи от химическия състав на стоманите и се определя с израза:

$$P_{cm} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{V}{15} + \frac{Cu}{20} + \frac{Si}{30} + 5B;$$

Където P_{cm} е въглеродния еквивалент определен според Bessyo [2]

Стойността на този параметър не трябва да надвишава 0,25% [2]. Има и различни формули и за оценка на максимална твърдост на завареното съединение. Тя трябва да е до 350 HV10 защото при такава твърдост има малка вероятност от образуване на твърди фази, които да доведат до появата на студени пукнатини [4,7]. Според Boothby и Cottrell при определяне на максималната твърдост трябва да се взема под внимание и температурата на охлаждане в интервала 800-500°C – $T_{8/5}$ [2,8].

$$HV10_{max} = 2019 \cdot (1 - 0,15 \cdot \lg T_{8/5}) + 0,3 \cdot (C_E \cdot B - C) + 66 \cdot (1 - 0,8 T_{8/5})$$

където:

$$C_E \cdot B = C + \frac{Mn}{8} + \frac{Mo}{6} + \frac{Ni}{17} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{15} + \frac{Cu}{9} + \frac{Si}{11} + \frac{V}{3}$$

Нисколегираните високояки стомани са много чувствителни по отношение на топлинна мощност и линейната енергия при заваряване, тъй като стойностите на скоростта на охлаждане могат да доведат до получаване на структури, които да предизвикат появата на студени пукнатини. Следователно, при заваряване на този тип стомани е важно правилното определяне на температурата за предварително подгриване на стоманата.

Загуба на технологична якост може да се предизвика посредством вариране на основните фактори, като изменение на линейната енергия на заваряване, предварителното нагриване, началното съдържание на водород в метала на шева или неподатливостта на съединението, както и външните натоварвания. По този начин може да се оцени влиянието на факторите и да се дефинират критичните диапазони и/или комбинации на техните състояния, при които се получава загуба на технологична якост.

Ефективната топлинна мощност на дъгата е количеството топлина, което се въвежда за единица време в изделието и е изразходвана за неговото нагряване[10]. На тази основа при определена топлинна мощност и скорост на заваряване се изчислява линейната енергия:

$$Q = \frac{k \cdot U \cdot I \cdot 60}{V \cdot 1000} \text{ [kJ/mm]}$$

където: k - термичен коефициент (за ръчно електродъгово заваряване $k = 0,8$), U - напрежение [V], I – заваръчен ток [A], V - скорост на заваряване [mm/min]

3. Същност на изследването. Резултати

За оценяване склонността на стомана S 960 QL към образуване на студени пукнатини проведохме серия експерименти за заваряване на образци изработени от листов материал с дебелина 12 mm от стомана с повишена якост марка S 960 QL EN10025-6. Химическият състав и механичните свойства на стоманата според приложеният сертификат са дадени в таблици 1, 2.

Таблица 1. Химически състав в %

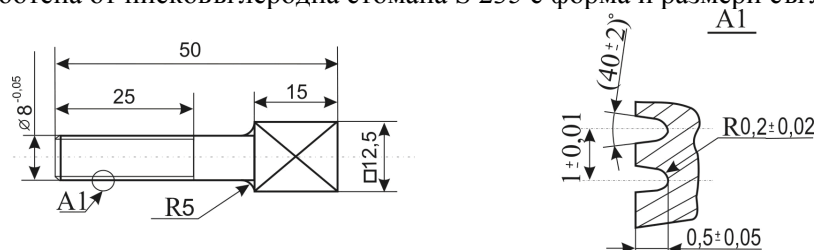
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Nb
0,18	0,39	1,43	0,59	0,45	0,04	0,04	0,02	0,025

Ti	Al	B	P	S
0,05	0,034	0,0003	0,008	0,004

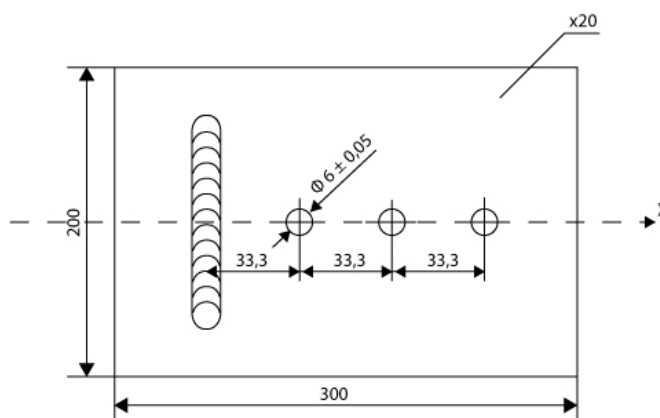
Таблица 2. Механични свойства

R_{e02} [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A_5 [%]	ISO-V/ - 40°C [J]
985	1028	13	61

Пробните образци се изработват съгласно приложената фигура 3 [9]. Надрезът се изработва със закръгление $R=0,2$ mm при върха на резбата. Плочата, в отворите на която се поставят образците е изработена от нисковъглеродна стомана S 235 с форма и размери съгласно фиг.4.



Фиг. 3. Образец за изпитване склонността към образуване на пукнатини



Фиг.4. Размери на пробните образци

При заваряване на конструкционни стомани с повишена якост е важно да се сведе до минимум риска от пукнатини. Той може значително да се намали чрез: щателно почистване и

изсушаване; прецизно позициониране и подходящо избран метод на заваряване; избор на допълнителен материал с ниско съдържание на водород.

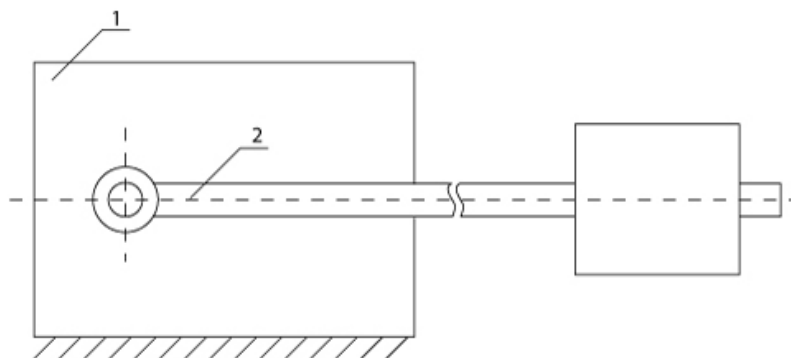
Образците се заваряват ръчно електродъгово, като избора на електрода е направен на базата на изискването: Съдържанието му на водород да е по-малко от 5ml/100g. Използван е електрод Fox EV63 с диаметър Ø4,0[mm].

Механичните свойства на електрода са показани в табл. 3

Таблица 3. Механични свойства

Re ₀₂ [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	A ₅ [%]	ISO-V/-40°C [J]
580	630	26	90

Използвана е комбинирана проба. Планката, в която се поставят и заваряват образците е заимствана от Имплант тест [9] и е показана на фиг.4.



Фиг.5 Схема на натоварване на усукване:

1- плънка; 2- лостова система за натоварване на образците

След изпълнение на шева (фиг.5) плънката се завърта на 90° около ос X и се фиксира неподвижно в приспособление. При достигане на температурата в интервала 150-100°C към свободната квадратна част на образца се захваща лостова система и се осъществява натоварване на усукване (фиг.5)

Експерименти са проведени при едни и същи параметри на режима на заваряване:- заваръчен ток I_з=180 A, напрежение на заваряване U_з=24 V, скорост на заваряване V_з=10 m/h, линейна енергия Q=1,24 [kJ/mm].

Всички експерименти са проведени при температура на околната среда 22°C. Електродите са предварително подсушени в продължение на два часа при температура 400°C. Не е използвано предварително подгриване на образците. С помощта на термодвойки се определя кога температурата е достигнала интервала 150-100°C. Извършва се натоварване на усукване на образца с помощта на лостова система (фиг.5).

Натоварването на образца τ_{yc} се пресмята по формулата:

$$(1) \quad \tau_{yc} = \frac{M}{J_s} r, \text{ [Pa]} - \text{тангенциално напрежение от усукване, където } M, \text{ [N.m]} - \text{въртящ}$$

момент, с който се натоварва завареното съединение; $r = 3,5 \cdot 10^{-3}$, [m] - радиус на образца.

$$(2) \quad J_s = \frac{\pi d^4}{32}, \text{ [m}^4\text{]} - \text{полярен инерционен момент;}$$

където d , [m] - диаметър на образца.

Изчислено за съответния образец:

$$(3) \quad J_s = 2,36 \cdot 10^{-10}, \text{ [m}^4\text{]}$$

В таблица 4 на EXCEL автоматизирано се пресмятат тангенциалните напрежения на усукване τ_{yc} и логаритъм от времето $\ln(t_p)$ до разрушаване/оцеляване на образците за различните експерименти.

Образци 5, 6 и 7 оцеляват в продължение на повече от 24 часа, което показва че при съответстващите им натоварвания и условия на заваряване, стоманата не е склонна към образуване на студени заваръчни пукнатини.

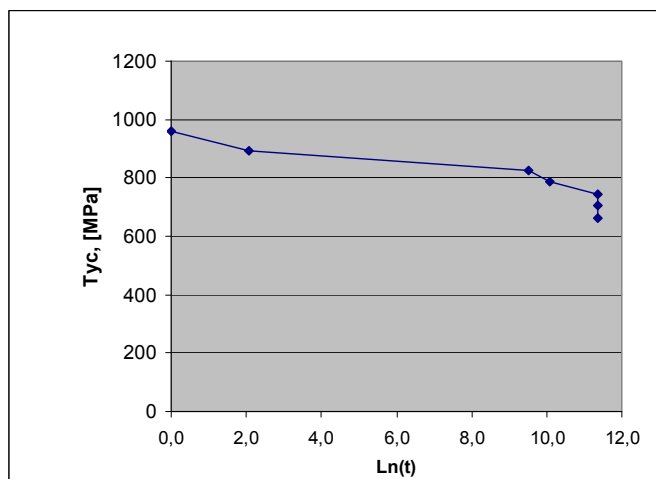
Образците 1, 2, 3 и 4, се разрушават забавено. С намаляване на натоварването, времето за разрушаване нараства, което се дължи на по-ниската стойност на възникналите напрежения. При образци 2, 3 и 4 наблюдаваме характерното за студения заваръчни пукнатини забавено разрушаване. Образец 1 се разрушава почти в момента на натоварване, а образец 4 след 6 часа. [табл.4]

Таблица 4. Резултати от изпитването

№	M [N.m]	τ_{yc} [Pa]	t_p [s]	$\ln(t_p)$
1.	64,76	962	1,000000	0,0
2.	60,20	894	8,000000	2,1
3.	55,64	826	13349,000000	9,5
4.	52,91	786	23920,000000	10,1
5.	50,18	745	86400,000000	11,4
6.	47,44	704	86400,000000	11,4
7.	44,71	664	86400,000000	11,4

Построена е диаграмата определяща съпротивление срещу образуване на студени заваръчни пукнатини за конкретната изпитвана стомана S 960 QL, при избраните метод и режим на заваряване и вариране на усукващия момент (M).

Графичната зависимост на напрежението на усукване τ_{yc} в зависимост от времето до разрушаване/оцеляване в логаритмичен вид при заваряване на образците от стомана S 960 QL е представена на фиг.5.



Фиг. 5. Графична зависимост на напрежението на усукване τ_{yc} в зависимост от времето до разрушаване/оцеляване в логаритмичен вид при ръчно електродъгово заваряване на образците от стомана S 960 QL

След като сме приели за критерий за устойчивост срещу студени заваръчни пукнатини максималното $[\tau_{yc}]$, при което образците оцеляват повече от 24 часа, то $[\tau_{yc}]$ за стомана S 960 QL е 745 [MPa]

4. Изводи

Устойчивостта на стомана S960QL срещу образуване на студени заваръчни пукнатини е определена чрез $[\tau_{yc}]$ и равна на 745 [MPa].

Получените резултати са валидни за изследваната дебелина, плавка, метод на заваряване и електрод.

Резултатите от проведеното изпитване доказват, че с пробата за изпитване чрез усукване може успешно да се определя съпротивлението срещу образуване на студени заваръчни пукнатини на високоякки стомани.

Въвеждането на новата проба в практиката ще доведе до по-лесна и икономически изгодна оценка на заваряемостта на високояките стомани при спецификата на заварени конструкции от листов материал.

5. Литература

- [1] Novosel, M.; Krumes, D. Željezni materijali, drugi dio, "Kostrukcijski čelici", Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 1995
- [2] Dunder, M. Utjecaj brzine hlađenja na tvrdoću i žilavost mikrolegiranih čelika, Disertacija, Zagreb, 2005., 68-72.
- [3] Lukačević, Z. Zavarivanje, Slavonski Bro d, 1998
- [4] Hrivnjak, I. Zavarljivost čelika, Građevinska knjiga, Beograd, 1982.
- [5] Sikiričić, V.; Kralj, S. Zavarljivost visokočvrstih čelika, Zavarivanje, 3/4, (2002) , 91-96.
- [6] SEW 088 Schweissgeeignete "Feinkornstähle" Verlag S ahleisen mbH, Düsseldorf, 1983.
- [7] Hrivnjak, I. Theory of weldability of metals and alloys. Else ier, 1992
- [8] Suzuki, H. Carbon Equivalent and Maximum Hardness, Transaction of the Japan, Welding Society, 15, 1 1984
- [9] Макаров Э.Л., „Холодные трещины при сварке легированных сталей”, Машиностроение, 1981
- [10] Тонгов М., Заваряване, част I Процеси, Софттрейд, 2009 г.
- [11] Garašić I., Anto Ćorić, Zoran Kožuh, Ivan Samardžić, Occurrence of cold cracks in welding of high-strength s960 ql steel

EVALUATION OF RESISTANCE OF HIGH-COLLAR LOW ALLOY STEEL TO FORM CRACKS IN WELDING

Elisaveta Tasheva, Plamen Tashev, Dobrinka Atmadzhova

*Todor Kableschkov Higher School of Transport
Institute of Metal Science, Equipment and Technologies "Acad. A. Balevski" with Hydroaerodynamics
centre – BAS, Centre of welding "Shipchenski prohod" str. 67, Sofia 1574
BULGARIA*

Key words: *welding, cold welding cracks, steel transport*

Abstract: *Using a specialized machine sample were conducted to experiments assess the tendency to formation of cold cracks in high-strength steel S960QL*