



**ВВМУ „НИКОЛА ЙОНКОВ ВАЩАРОВ”  
ФАКУЛТЕТ „ИНЖЕНЕРЕН”**

**Катедра „Кораборемонт”**

**Инж. ГЕОРГИ КЪНЧЕВ ЛЮЦКАНОВ**

**ИЗСЛЕДВАНЕ ЗАВАРЯЕМОСТТА НА  
НИСКОВЪГЛЕРОДНИ НИСКОЛЕГИРАНИ СТОМАНИ  
С ПОВИШЕНА ЯКОСТ**

Професионално направление: „Транспорт, корабоплаване и  
авиация”

**АВТОРЕФЕРАТ**

**НА**

**ДИСЕРТАЦИОНЕН ТРУД**

за придобиване на образователната и научна степен

**„ДОКТОР”**

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Пламен Дичев Дичев

Варна, 2014г.

Дисертантът работи във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров” и е в свободна форма на обучение в катедра ”Кораборемонт” при факултет „Инженерен”.

Изследванията от дисертационният труд са извършени във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров” и Технически университет – Варна.

Дисертационният труд е насочен за защита от факултет „Инженерен” при ВВМУ „Н. Й. Вапцаров” в съответствие на чл. 5, ал. 1 от ЗРАС.

Автор: инж. Георги Кънчев Люцканов

Заглавие: Изследване заваряемостта на нисковъглеродни нисколегирани стомани с повишена якост

Тираж: 15 броя

## **ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **Актуалност на проблема.**

Заваряването се явява водещ технологичен процес при изготвянето на метални конструкции в различни области на промишлеността. Основна задача на заваръчното производство е да се повиши качеството на заваръчните конструкции, т.е. те да са сигурни, надеждни и да бъдат в експлоатация дълго време. Ето защо съществува необходимост от разработване на нови технологии, нови машини и съоръжения и нови материали.

За развитието на съвременното корабостроене и изграждането на морски съоръжения, все повече се използват стомани с повишена якост. Осигуряването на качествени заваръчни конструкции от тях налагат изследвания в областта на тяхната заваряемост и разработване на ефективни технологии.

Основен проблем свързан със технологията за изготвяне на заваръчни конструкции от стомани с повишена и висока якост е тяхната заваряемост и преди всичко образуването на студени пукнатини. Студените пукнатини представляват значителен проблем за качеството на заварени съединения от високояки стомани. Вероятността от тяхното образуване се повишава с увеличаване на дебелината на завареното изделие. Статистиката показва, че на студените пукнатини се дължат 60% от случаите на възникналите разрушавания в заваръчни шевове в продължение на 5 години. Най-големи поражения нанасят студените пукнатини, разположени надлъжно на заваръчния шев в зоната на термично влияние (ЗТВ). Техният процентен дял възлиза на 70% от всички видове студени пукнатини. За сравнение, делът на пукнатините, разположени напречно на шева и в ЗТВ е само 5% .

Заваряемостта се оценява чрез количествено или качествено определяне на показателите за заваряемост. По принцип най-често се сравняват измененията на характерни свойства или механични показатели на завареното съединение с тези на основния метал.

Подборът на показателите зависи от вида на заварявания материал, от технологията на заваряване и от предназначението на конструкцията.

За някои конструкции има нормативни документи за

цялостен контрол като корабните регистри, правилника за котлонадзора при изработване на съдове, работещи под налягане, правилниците за различни видове транспортни съоръжения, кранове и т.н. При тях изпитването на заваряемост е регламентирано в съответни нормативни документи. Тези правилници обаче не отразяват развитието на съвременните технологии на заваряване и внедряването на нови, високоефективни материали при изработване на заварени конструкции.

### **Цел на изследването.**

Целта на настоящият дисертационен труд е да се определи заваряемостта на нисковъглеродни нисколегирани стомани с повишена якост и да се предложат технологични решения за повишаване качеството на заваръчното съединение при тяхното заваряване.

За да се постигне целта е необходимо да се решат следните задачи:

1. Да се анализират методите за оценяване на заваряемостта на материалите;
2. Да се анализират механичните и технологичните свойства на разглежданите стомани и областта на тяхното приложение;
3. Да се направи сравнителен анализ на електродите използвани при заваряване на тези стомани;
4. Да се разработи методика за определяне на заваряемостта на нисковъглеродни нисколегирани стомани и приспособление с което да се извършат изпитанията;
5. Да се предложат технологични решения за повишаване качеството на заваръчното съединение при тяхното заваряване.

### **Средства и място на изследването.**

За разработването и оформлението на дисертационният труд и реализирането на поставените основни задачи са използвани теоретични, изследователски и експериментални постановки, текстообработващи програми (Microsoft office) и съвременни програми за графичен дизайн – CorelDRAW Graphics Suite, Adobe Photoshop.

За място на провеждане на експериментите се използваха базите на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров” и Технически Университет – Варна.

### **Практическа ценност на изследването.**

Дисертационната работа е разработена по време на свободна докторантура във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров”.

Основните практически приноси се отнасят до разработването на технологични решения за повишаване качеството на заваръчното съединение. Разработката намира приложение при изработването и ремонта на заваръчни конструкции и морски съоръжения.

### **Структура и обем на дисертацията**

Дисертационният труд съдържа: увод, пет глави, списък на използваната литература и приложения. Дисертацията е изложена в обем на 163 страници основен текст, 40 страници приложения, 54 фигури и 18 таблици. Библиографията включва 138 литературни източници.

Дисертационният труд е докладван и обсъждан на заседание на катедра „Кораборемонт” на ВВМУ „Н.Й. Вапцаров” – Варна.

### **Публикации по дисертационния труд.**

По темата на дисертационния са публикувани 6 научни статии, рецензирани и отпечатани в национални научни списания. Списъкът на публикациите по дисертационния труд е даден в края на автореферата.

## **КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **Глава I. Заваряемост на металите – характеристика, анализ и методи за оценяване на заваряемостта.**

Заваряемостта е комплексна характеристика, отразяваща пригодността на металите при определени технологични условия и конструктивна надеждност на съединенията да образуват заварени изделия със съответно предназначение. Очевидно е, че тя не е свойство на материалите и по тази причина не може да се оценява еднозначно.

От друга страна, заваряемостта не е постоянна величина и зависи от нивото и развитието на методите на заваряване и от предназначението и експлоатационните условия на заварените конструкции.

Заваряемостта се определя от възможността за изработването от съответен материал и с определена технология на конструкция с необходимите свойства за надеждна експлоатация. Тя може да се разглежда в следните три направления: материал, технологичен процес за заваряване и конструктивно оформяне на заваръчното съединение (фиг. 1.1).



Фиг. 1.1. Принципна схема на показателите, влияещи върху заваряемостта

Заваряемостта се явява една от най-важните характеристики на стоманите, използвани в заваръчните конструкции.

Съществуващите технологии за изработване на метални конструкции, генерират екстремни и неравновестни състояния в макро- и микрообемите на металите. Всяка от редуващите се обработки предизвиква остатъчни въздействия, които в една или друга степен се сумират в обработваната заготовка. В този смисъл свойствата на една заваръчна конструкция са наследствена категория.

При тези условия, якостните показатели на обработвания метал вече не могат да се определят по класическите методи. Възниква необходимостта от въвеждане на ново понятие за якост, т.нар. „технологична якост” – способността на металите да понесат без разрушаване термомеханичното въздействие на технологичния процес на обработване. Технологичната якост се характеризира с възможността на метала на шева или на околошевната област да понесат без разрушаване еластично-пластичните деформации, съпътстващи заваръчния процес. Тя е показател, който отразява най-пълно поведението на заварявания материал и на завареното

съединение като цяло. Недостатъчната технологична якост води до частично или цялостно разрушаване на заварените съединения. Основното изискване е да се предотврати образуването на горещи и студени пукнатини в заваръчните съединения.

Показателите на заваряемостта самостоятелно или като комбинация от няколко, служат за избор на метода на заваряване, заваръчните материали и технологичните параметри на заваръчните процеси.

Заваряемостта се оценява чрез количествено или качествено определяне на показателите за заваряемост. По принцип най-често се сравняват измененията на характерни свойства или механични показатели на завареното съединение с тези на основния метал.

За оценяване заваряемостта на металите се използват три основни групи методи за изпитване – аналитични, лабораторни (експериментални) и технологични.

Аналитичните методи служат за прогнозиране на очаквани стойности за даден показател с помощта на параметрични уравнения, получени с методите на статистиката.

При лабораторните методи се използват уреди или изпитателни машини, с които на стандартизирани образци от заварени съединения с имитиран термодеоформационен заваръчен цикъл се определят количествени стойности за отделни показатели на заваряемостта. Те са пример за стандартизирано изпитване на механичните показатели на заварени съединения.

В основата на машинните проби за изпитване е залегнала постановката, че студените пукнатини имат характер на забавено разрушаване. Като количествен критерий те най-често използват минималното напрежение на разрушаване при постоянно натоварване, означено като критично напрежение  $R_{KP}$  или граница на статична умора.

Използват се различни методи за експериментални изследвания: Метод ЛТП 2, Метод TRC, Метод RRC, Метод „Имплант” и др.

Технологичните методи са пряко свързани с производството и за тях не е необходимо лабораторно обзавеждане. Това са най-често проби, представляващи основни типови заварени съединения, при които се създават възможности за засилено проявяване на отделни

фактори (повишена коравина, пластична деформация по време на заваряване, изпълняване на заваръчния процес при специфични условия и среди). Типичен пример за това са технологичните проби за оценяване на технологичната якост.

Методите се състоят в продължително въздействие на опънови напрежения върху основния метал в ЗТВ. Основен критерий за качеството на метала се приема наличието или отсъствието на студени пукнатини в ЗТВ.

За технологични изпитвания се използват следните проби: кръстова проба, проба „Теккен“, проба „СИБ-19-ХТ“.

Въз основа на направения обзор и теоретичен анализ на показателите и факторите определящи заваряемостта на материалите могат да бъдат изведени следните изводи:

1. Заваряемостта не е свойство на материалите, а е комплексна характеристика, отразяваща пригодността на металите при определени технологични условия и конструктивна надеждност на съединенията да образуват заварени изделия със съответно предназначение. Тя не е постоянна величина и зависи от нивото и развитието на методите на заваряване и от предназначението и експлоатационните условия на заварените конструкции.

2. Фактори, които влияят върху заваряемостта са: химичният състав на материала; топлофизичните свойства; механичните свойства; параметрите на заваряване: заваръчен ток, напрежение на дъгата, скорост на заваряване, линейна енергия, температура на подгряване и др.; вид и характеристики на източника на нагриване; подготовка на детайлите за заваряване: - скосяване на краищата, почистване на повърхностите и др.

Тези фактори потвърждават и доказват сложността на задачата за еднозначно определяне и оценяване на заваряемостта. Изборът на даден показател и критерий или стойностите за него, се регламентира в зависимост от конкретния случай т.е. какъв е метала, технологичните условия на заваряване конструкцията на съединението.

3. Технологичната якост на металите е показател, който отразява най-пълно поведението на заварявания материал и на завареното съединение. Тя се характеризира с възможността на метала на шева или на околошевната област да понесат без разрушаване еластично-пластичните деформации, съпътстващи заваръчния процес.



4. При образуването на студени пукнатини определящи се явяват три фактора: наличието на закалочни структури; повишено ниво на опъновите заваръчни напрежения от първи род и повишената концентрация на дифузионния водород в зоната на огнището на зараждане на студените пукнатини.

5. Недостатъчно и незадълбочено са изучени факторите определящи заваряемостта на нисковъглеродни нисколегиранни стомани с повишена якост.

6. Оценяването на заваряемостта се извършва по три групи метода: аналитични, експериментални и технологични.

От аналитичните най-често се използва определянето на „въглеродния еквивалент“ ( $C_{екв}$ ), от експерименталните – метода „Имплант“, от технологичните най-често се използват пробата „Теккен“, Кръстова проба и проба „СИБ–19–ХТ“.

7. Съществува необходимост от разработване на методики за уточняване на режимите на заваряване на тези стомани.

8. Съществува необходимост от актуализиране на нормативните документи, наредби и правилници при извършване на заваръчни работи.

## **Глава II. Материали използвани за изграждане на заваръчни конструкции и морски съоръжения.**

Като материали за изграждане на различни видове конструкции и морски съоръжения се използват основно конструкционни стомани. Към тях се поставят различни изисквания – да са корозоустойчиви, да издържат на високи и ниски температури, да издържат на статични, динамични и циклични натоварвания, да имат добра заваряемост и др.

Оценката на механичните характеристики на стоманите и заваръчните съединения има за цел да се определи фактическото им състояние и неговото съответствие с техническите изисквания.

Изпитване на основния материал и заваръчното съединение в лабораторни условия се извършва съгласно стандарт БДС EN ISO 15614-1.

За отворни заваръчни шевове в някои случаи се препоръчва да се направи макроструктурен анализ с използване на пробата на Бауман. Чрез нея се показва наличието на сярa и раположението на сулфидите в заваръчния шев.

Направените проучвания показват, че освен традиционните стомани използвани за изграждане на морски съоръжения се използват и стомани с повишена якост. Те са от групата на заваряемите висококачествени стомани с пореден номер 1.89XX (съгласно EN 100270).

Като представители на тази група се явяват стоманите S890QL и S960QL. Това са строителни стомани с минимална граница на провлачане 890/960 МПа, подобрени чрез охлаждане в течна среда. Стоманите са нисковъглеродни нисколегирани и са предназначени – за производство на заваръчни и строителни конструкции и конструкции използвани в областта на морските съоръжения и плавателните средства, за транспортни средства, съдове под налягане и напорни тръбопроводи. В таблици 2.2 и 2.3 са показани химическия състав, областта на приложение, механичните и технологични им свойства.

Съгласно препоръките на Международния институт по заваряване заваряемостта на нисковъглеродни нисколегирани стомани се определя по еквивалентното съдържание на въглерод ( $C_{екв}$ ).

$$C_{екв} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \% \quad (1.5)$$

На тази база стоманите условно се разделят на четири групи:

- стомани заварявани без ограничения ( $C_{екв} \leq 0,25\%$ );
- стомани с удовлетворителна заваряемост ( $0,25 < C_{екв} < 0,35\%$ );
- стомани с ограничена заваряемост ( $0,35 < C_{екв} < 0,45\%$ );
- стомани които трудно се заваряват и тяхното използване за заваръчни конструкции не е желателно ( $C_{екв} > 0,45\%$ ).

Основната трудност при заваряване на нисковъглеродни нисколегираните стомани е склонността им към получаване на закалъчни структури с голяма твърдост и свързаните с тях пукнатини в заваръчния шев или в зоната на термично влияние.

За избягването им оказват влияние три фактора: водородното съдържание, изходната структура на стоманата и скоростта на охлаждане на шева и околошевната зона.

**Химически състав и предназначение на конструкционни стомани** Таблица 2.2

Марка стомана	Химичен състав, %								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	други
S890QL	0,16	0,39	1,42	0,011	0,010	0,57	0,76	0,39	V-0,05 Cu-0,06
S960QL	0,17	0,40	1,43	0,011	0,010	0,57	0,78	0,32	V-0,04 Cu-0,04

**Механични свойства и заваряемост на конструкционни стомани** Таблица 2.3

Марка стомана	Дебелина, mm	Якост на опън Rm, MPa	Граница на провлачане, Re, MPa	Относително удължение A, %	Работа за разрушаване при удра, J			
					Посока на образца	Температура °C		
						0	-20	-40
S890QL	≤ 50	940 – 1100	890	11	надлъжен	50	40	30
	50 – 60	880 – 1100	830					
	60 – 80				напречен	35	30	27
	80 – 100							
S960QL	≤ 50	980 – 1150	960	10	надлъжен	50	40	30
	50 – 60	970 – 1100	920					
	60 – 80	920 – 1070	870		напречен	35	30	27
	80 – 100	900 – 1050	850					

Термичо рязане: Преди рязане, за да се избяне получаване на студени пукнатини, за плочи с дебелина > 20 mm се препоръчва да се подгрее до 150°C зона с ширина 100 mm, около среза.  
Заваряване: РЕДЗ и АЕДЗ, като се предпочита РЕДЗ и АЕДЗЗГС. При дебелини по-големи от 20 mm е възможно подгриване до 150 – 200 °C. Ако се налага се провежда отвършване 530 – 560 °C.

Скоростта на охлаждане при заваряване може да се забави по три начина: чрез изменяне на линейната енергия, чрез нагряване на изделиято и чрез многослойно заваряване.

- Линейната топлинна енергия, т. е. количеството топлина, което се влага във всеки cm от дължината на шева, може да се измени, като се измени токът, напрежението и скоростта на заваряване. Линейната енергия се изменя най-силно чрез изменяне на заваръчния ток и по-слабо чрез изменяне на напрежението. Тя се влияе и от скоростта на заваряване.

- Подгриването на заваряваните части е най-подходящият начин да се забави скоростта на охлаждане и с това да се предотврати

получаването на закалъчни структури. Самото подгръване се извършва по един от четирите начина.

- *предварително подгръване.* Прилага се при масивни детайли и неголям обем на заваръчните работи, поради което не се получава силно охлаждане на детайла при заваряване.

- *съпътстващо подгръване.* Детайлът се подгръва както предварително, така и през време на заваряването. Прилага се за детайли със сложна форма и тънки стени, с голям обем заваръчни работи. При липсва на съпътстващо подгръване, заваряваните детайли ще се охладят под необходимата.

- *последващо подгръване.* Прилага се при детайли с малък обем на заваръчните работи и при стомани, по-малко склонни към образуване на заваръчни пукнатини.

- *предварително и последващо подгръване.* Прилага се при детайли със сложна форма и голям обем на заваръчните работи. Състои се в предварително подгръване, предпазване от бързо охлаждане при заваряване и следващо подгръване за забавяне на охлаждането.

Самото подгръване се извършва в подходящи пещи или чрез специални нагревателни устройства, ползващи най-често токове с промишлена честота.

Много ефектен начин за забавяне на охлаждането е многослойното заваряване с къси участъци от 40 до 80 mm, например стъпалният метод на заваряване.

За заваряване на нисколегирани стомани се препоръчват базичните електроди, които осигуряват най-висока пластичност на метала на шева.

Технологичните характеристики отчитат свойствата на електрода, които се проявяват през време на работа.

Основни количествени показатели за ефективността на електродите са:

*Коефициент на стопяване ( $\alpha_{ст}$ )*

$$\alpha_{ст} = \frac{M_{ел} - M_{ост}}{I.t} .3600, g/A.h. \quad (2.2)$$

*Коефициент на наваряване ( $\alpha_{н}$ ) (коефициентът на влагане)*

$$\alpha_{н} = \frac{M_{н}}{I.t} .3600, g/A.h. \quad (2.3)$$

*Коефициент на загубите ( $\varphi$ )*

$$\varphi = \frac{M_{CT} - M_H}{M_{CT}} \cdot 100, \% \quad (2.4)$$

$$\varphi = \frac{\alpha_{CT} - \alpha_H}{\alpha_{CT}} \cdot 100 = \left( 1 - \frac{\alpha_H}{\alpha_{CT}} \right) \cdot 100, \% \quad (2.5)$$

*Рандеман ( $R$ )*

$$R = \frac{M_H}{M_{CT}} \cdot 100, \% \quad (2.6)$$

Технико-икономическите характеристики са пряко свързани с технологичните. Те отразяват производителността на работа. Основно се използват за нормиране на заваръчните работи при заваряване с обмазани електроди. Такива показатели са:

*Коефициент на масата на обмазката ( $K$ )*

$$K = \frac{M_{ел} - m.l_e}{m.l_0} \quad (2.7)$$

*Дъговото (основното) време ( $t_0$ )* е времето на горене на дъгата и се определя по формулата

$$t_0 = \frac{M_H}{\alpha_H \cdot I}, h \quad (2.8)$$

$$M_H = S_H \cdot L \cdot \rho, kg \quad (2.9)$$

*Общото време за заваряване ( $T_0$ )* се определя от времето на горене на дъгата, разделено с коефициента на използване на заваръчния пост ( $K_0$ ). Обикновено  $K_0 = 0,4 \div 0,85$  за тел, който да осигурява получаването на необходимите свойства.

$$T_0 = \frac{t_0}{K_0}, h \quad (2.10)$$

Въз основа на изложеното по-горе могат да се изведат следните изводи:

1. Направен е анализ на изискванията към стоманите за изграждане на различни видове конструкции и морски съоръжения.
2. Направена е класификация на стоманите по различни признаци, съобразена с изискванията на Регистъра.

3. Подробно е разгледан ефекта от предварително и последващо подгриване за намаляване на скоростта на охлаждане и предотвратяването на получаване на закалъчни структури. Разгледан е и метода на стъпално подгриване.

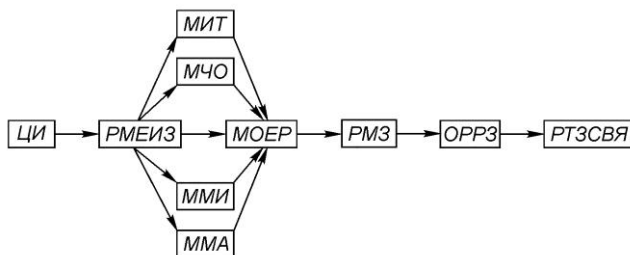
4. Анализирано е влиянието на въглеродния еквивалент върху заваряемостта на стоманите.

5. Направен е анализ на използваните електроди за заваряване на ниско- и средновъглеродни стомани и подробно са разгледани видовете обмазки. Показано е и тяхното означение съгласно европейските норми.

6. Направена е технико-икономическа характеристика на електродите.

### Глава III Методика за определяне заваряемостта на стомани с повишена якост.

В достъпната литература са описани различни методи за оценяване на заваряемостта на стоманите, но не за всички са разработени подходящи методики. На фиг. 3.1 е показан мултиграф на методиката на изследване на заваряемостта на стомани с повишена якост.



Фиг. 3.1. Мултиграф на методиката на изследване

ЦИ – цел на изследването; РМЕИЗ – разработване на методика за експериментално изследване на заваряемостта; МИТ – методика за изпитване на твърдост; МЧО – методика за изпитване с четириточково огъване; МОЕР – методика за обработка на експерименталните резултати; ММИ – методика за механични изпитвания; ММА – методика за металографски анализ; РМЗ – регресионни модели на заваряемостта; ОРРЗ – определяне на рационални режими на заваряване; РТЗСВЯ – разработване на технология за заваряване на стомани с повишена якост

### **3.1. Методика за изпитване на устойчивост срещу образуване на студени пукнатини**

Методиката установява дейности при изпитване устойчивостта срещу образуване на студени пукнатини в зоната на термично влияние и метала на шева при еднопроходно заваряване.

Разработени са два метода:

Машинният метод се основава на привеждане на метала в зоната на термично влияние или метала на шева до образуване на студени пукнатини под действието на опънови напрежения от външно постоянно натоварване.

Технологичният метод се заключава в това, че образуването на студени пукнатини в зоната на термично влияние или метала на шева на заварените образци под действието на остатъчни заваръчни напрежения.

Машинният метод се използва при различия в оценките за качеството на заваряваните съединения.

Методите на изпитване се използват при провеждане на изследователски изпитвания за оценяване заваряемостта на металите.

#### **3.1.1. Избор на образци (проби)**

##### **За машинни изпитвания**

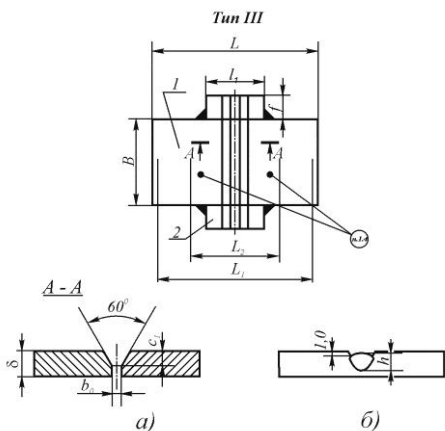
В тази методика е избран образец III – плосък правоъгълен за стомани с дебелина  $\delta = 12 \text{ mm}$  (фиг. 3.2) – предназначен за количествено определяне на устойчивостта на заваръчното съединение срещу образуването на надлъжни пукнатини в зоната на термично влияние (ЗТВ) напречно на цялата равнина на проката и шева.

В таблица 3.1 са показани размерите на образците.

##### **За технологични изпитвания**

За изпитване с помощта на технологичния метод е избран образец VIII – три правоъгълни плоски образца с дебелина  $\delta=12 \text{ mm}$ , различаващи се по своята дължина (фиг.3.3). Образца е подходящ за количествена оценка на устойчивостта на заваръчното съединение срещу образуването на надлъжни пукнатини в зоната на термично влияние (ЗТВ) и шева.

Това изследване е познато и като проба „СИВ – 19 – ХТ”



Фиг. 3.2. Образец тип III  
 а – образец за челно заваряване; б – общ вид на заваръчното съединение;  
 1 – образец от изпитвана стомана; 2 – входна и изходна планки от нисковъглеродна стомана; В – ширина на образца; L – дължина на образца; L<sub>1</sub> – работна дължина на образца при огъване; L<sub>2</sub> – работна дължина на образца при опънови напрежения; L<sub>3</sub> – разстояние между опорите на пуансона при огъване; b<sub>0</sub> – междина; e<sub>1</sub> – ширина на входната и изходна планки; f – дължина на входната и изходна планки; h – височина на заваръчния шев;.

Размери на образците

Таблица 3.1

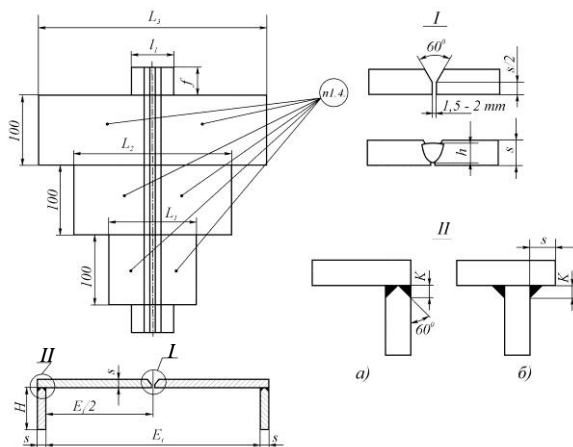
Дебелина, δ [mm]	Ширина, В [mm]	Изпитване на огуване			Изпитване на опън		Междина, b <sub>0</sub> [mm]	Скосена част, c <sub>1</sub> [mm]	Входна и изходна планки		Височина на заваръчния шев, h [mm]
		Дължина, [mm]			Дължина, [mm]				Ширина, l <sub>1</sub> [mm]	Височина, f [mm]	
		L	L <sub>1</sub>	L <sub>3</sub>	L	L <sub>2</sub>					
8	100	200	160	40	250	50	1	5	20 - 10	15 - 40	5
10	100	250	200	40	250	50	2	6	40 - 60	30 - 60	6
12	100	250	200	40	250	50	2	6	40 - 60	30 - 60	6
16	100	350	280	60	250	50	3	8	50 - 80	40 - 80	8
20	100	350	280	60	250	50	3	8	50 - 80	40 - 80	8

Размери на образците

Таблица 3.2

Дебелина, δ [mm]	Височина на Г-образните планки, Н [mm]	Входна и изходна планки		Катет на шева, К [mm]	Разстояние между крайните планки, E <sub>i</sub> [mm]			Дължина на образците, L <sub>i</sub> [mm]		
		Ширина, l <sub>1</sub> [mm]	Височина, f [mm]		E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
12	60	40 - 60	50 - 60	6	100	150	300	124	174	324
16								132	182	332
20								140	190	340
30	100	50 - 80	60 - 80	8	100	150	300	160	210	360
40								180	230	380





Фиг. 3.3. Проба „СИБ – 19 – ХТ“

### Изрязване, подготовка и маркиране на образците

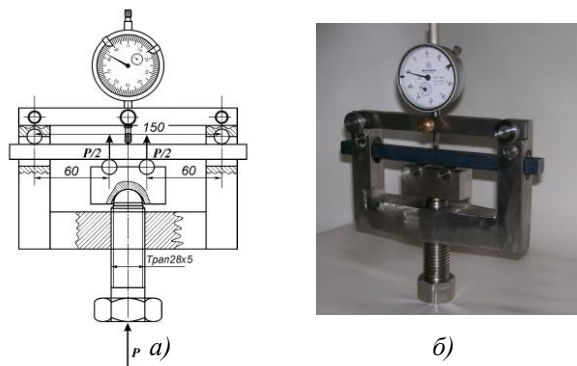
- Пробите от изследваните стомани се отрязват механично или термично.
- Пробите се маркират на лицевата страна на посочените места обозначени на фигури 3.2 и 3.3.
- Заготовка, дебелината на която се отличава от стандартната, се обработва механично до най-близкия стандартен размер.
- Пробите използвани за заваряване са листи и заготовки доставени от завода производител.
- За отстраняване на ръжда, окалина пръски от заваряване ръбовете, подлежащи на заваряване, се почистват с абразивни дискове с № 16 ÷ 24 или пясъкоструйни машини.

### 3.1.2. Необходима апаратура и приспособления

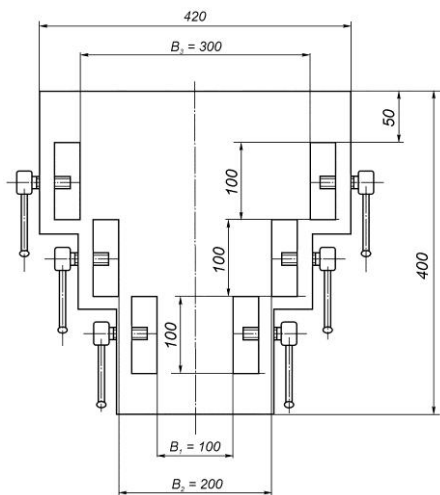
Машините за изпитване на опън, натиск и напречно огъване трябва да отговарят на следните изисквания:

- Плавност на натоварването;
- Средната скорост на натоварването при изпитване до зададен товар не трябва да бъде по-голяма от 10 МПа/s;
- Товарът трябва да се поддържа постоянен по време на целия период на изпитването (20 часа);

- Колебания в стойността на постоянното натоварване по време на периода на изпитване трябва да бъде не повече от  $\pm 5\%$  от номиналната му стойност.



фиг. 3.4. Приспособление за четириточково огъване  
а) – скица; б) - снимка



Фиг. 3.5. Приспособление за проба „СИБ – 19 – ХТ“

На фиг. 3.4 е показана схемата на приспособление за изпитване на четириточково огъване, а на фиг. 3.5 – схемата приспособление за изпитване на заваръчно съединение по технологичния метод.

Приспособлението за четириточково огъване е авторско и проектирано и изработено за целите на разработката. Пълната

техническа документация се намира в приложение 3. Приспособлението за проба „СИБ – 19 – ХТ“ е проектирано и изработено за друга разработка.

### 3.1.3. Подготовка за изследването

- Заваряването на образците се извършва в лабораторни условия при неподвижен въздух и температура на околната среда  $20 \pm 10$  °С. За да се подберат оптимални режими на заваряване на изследваната

стомана е възможно да се изменят специфичната топлинна мощност и температурата на предварителни подгръване. За изследваната стомана се използват типови заваръчни материали;

- заваряване образците се закрепват в захващащите приспособления. Заваряваните образци се освобождават от приспособленията след охлаждане до 150 °С. Комплект от три образца (проба СИВ – 19 – ХТ) се заваряват едновременно на един преход. След заваряване с помощта на ъглошлайф се премахват входната и изходна планки;

- След заваряване всеки един образец се охлажда до стайна температура. Почистването им от окалина, друг вид замърсяване причинени от заваряването се извършва със шкурка;

- Образците за изпитване трябва да отговарят на, заварените съединения, за които чрез визуална дефектоскопия не са открити дефекти (подрез, пукнатини и др.)

За отчитане и регистриране на параметрите на заваряване при провеждане на експериментите е разработена компютърна програма. Програмата е разработена на програмен продукт Lab view.

Изследваните нисковъглеродни нисколегирани стомани с повишена якост S890QL и S960QL попадат на границата между слабозакаляващите се и закаляващите се стомани.

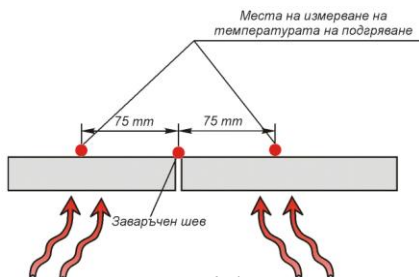


Фиг. 3.13. Приспособление за предварително подгряване

За избягването на закалъчни структури е необходимо да се намали скоростта на охлаждане на шева и околошевната зона. Освен това трябва да се намалят и вътрешните напрежения. Колкото по-голяма е твърдостта на заваряваната стомана, толкова по-високи напрежения се получават в зоната на заваряването и по-лесно може да се стигне до разрушаване на шева.

За целта е проектирано приспособление за предварително подгряване фиг. 3.13.

Измерването на температурата се извършва с дигитален термометър DE – 305 на посочените места (фиг. 3.14).



Фиг. 3.14.

### 3.1.4 Провеждане на изпитанието

#### Машинни изпитавания

- След заваряване на образците по време на охлаждане в температурния диапазон  $150 \div 100$  °С, същите се натовават с постоянно усилие. Ако целта на изпитването е да се установи минималното натоварване при което се разрушава образеца, натоварването може да започне при 50 °С. Измерването на температурата става с контактен термометър.

- Натоварването на образците е статично, като скоростта на натоварване е  $5 \div 10$  МРа/s. Под товар образците се задържат 20 часа;

- Изпитват се  $5 \div 15$  образеца от един тип, като натоварването е с различни стойности на товара. При това се определя минималното натоварване при което се получават студени пукнатини;

- Първите три образеца се изпитват при напрежение  $0,5 R_{0,2}$  на основния метал. По-нататък изпитанията се провеждат в групи по три образеца с увеличаване или намаляване на напрежението до появяване на студени пукнатини в последователност както следва:  $0,25; 0,15$  и  $0,10$  от  $R_{0,2}$ .

За определяне на разчетното натоварване се използват следните зависимости.

$$\sigma = \frac{M}{W}, MPa \quad (3.1)$$

$$f = \frac{M}{24.E.J} (3L_1^2 - 4L_3^2), m \quad (3.2.)$$

#### Технологични изпитвания

Технологичните изпитвания се изпълняват когато е невъзможно да се проведат машинни.

- След заваряване, образците се съхраняват при нормална температура в продължение на 20 часа. Образците от тип VIII (проба „СИБ – 19 – ХТ”) се задържат в затягащото присвпособление. Изпитват се  $3 \div 5$  образеца от един тип;

- По време на изпитването с помощта на лупа с увеличение 3, периодично се оглежда ЗТВ за поява на пукнатини. Ако се получи видима пукнатина или разрушаване на образеца изпитването се прекратява.

### 3.1.5. Обработка на резултатите

Напреженията в образците, подложени на машинни изпитвания се изчисляват по следната формула:

За образците от III тип (плоски правоъгълни), изпитвани на огъване [122]

$$\sigma = j \frac{12E\delta(f_m - f_0)}{2L_1^2 + 2L_1L_2 - L_2^2}, \text{MPa} \quad (3.3)$$

Като показател на съпротивление на шева или ЗТВ срещу образуване на студени пукнатини при заваряване се приема минималното опъново напрежение  $\sigma_{pmin}$  от външен товар  $P$ , при който в тях се образуват пукнатини.

$\sigma_{pmin}$  – средноаритметичното на три минимални разрушаващи напрежения с точност до  $\pm 25$  МПа

Оценката и обработката на резултатите за образците от тип VIII (проба „СИБ – 19 – ХТ“) се извършва съгласно БДС 12657-85.

### 3.2. Избор на план на експеримента и структура на модела

Набраната от експериментите информация, за целите на моделирането на процеса заваряване е удобно да се систематизира в таблица 3.3 на наблюденията. Тук  $x_i$ ,  $i=1 \div m$  са стойности на участващите в модел променливи (фактори), а  $y$  е целева функция.

Таблица 3.3

№	$X_1$	$X_2$	...	$X_m$	$y$
1	$X_{11}$	$X_{21}$	...	$X_{m1}$	$y_1$
2	$X_{12}$	$X_{22}$	...	$X_{m2}$	$y_2$
...	...	...	....	....	....
N	$X_{1N}$	$X_{2N}$	...	$X_{mN}$	$y_N$

$X_1$  – температура на предварително подгриване  $T$ , [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$X_2$  – големина на заваръчният ток  $I$ , [A];

$X_3$  – сила на натоварване, до достигане на пукнатина в заваръчният шев  $F$  [kN].

От анализа на възможностите за реализация на експерименталните изследвания за целите на математическото моделиране е приет пасивен експеримент. Получаването на адекватен модел е възможно след отчитане на всички променливи. Изпускането на дадена променлива, влияеща върху целевата функция води до автоматичното и отнасяне към шума и като резултат – некачествен модел.

За обработка на резултатите, получаване на модела и оценка на качествата му ще бъде използван регресионният анализ.

Полиномният математичен модел включва свободен член, линейни съставки от фактори, взаимодействия на фактори и членове от квадратични зависимости.

### **Изводи към трета глава**

1. Разработена е методика за изпитване на устойчивост срещу образуване на студени пукнатини.

2. Проектирано е и е изработено приспособление за провеждане на изпитването по създадената методика.

3. Разработена е компютърна програма за отчитане и регистриране на параметрите на заваряване.

4. Проектирано е и е изработено приспособление за предварително подгриване на заваряваните части.

5. От анализа на възможностите за реализация на експерименталните изследвания за целите на математическото моделиране е приет пасивен експеримент. Факторите, които влияят върху ъгъла на огъване в конкретния случай са: температура на предварително подгриване; големина на заваръчния ток и силата на огъване.

6. За обработка на данните и проверка качествата на модела е избран Регресионният анализ.

## **Глава IV Експериментално изследване и анализ на получените резултати**

### **4.1. Подготовка, заваряване на образците и провеждане на експеримента**

Подготовката на образците включва изрязване, подготовка на краищата. Изрязването е механично на универсални машини, като са спазени съответните размери (фиг.4.1).



Фиг.4.1. Изрязване на планките



Фиг. 4.4. Подготовка за заваряване на образците

Заваряването се извършва в лабораторни условия (фиг.4.4) ръчно електродъгово с указаната марка електроди ОК 75.78 (E 89 6 Mn3NiCrMo B 4 2 H5). Използува се източник за заваряване инвертор Caddy® Arc 251i с панел А32/А34. Напрежението на празен ход е 78V. Препоръчителни стойности за режимите на заваряване са посочени в табл. 2 от БДС 12657 – 85.

Заваряването с електрод се осъществява с ток АС или DC+ във всички пространствени положения. При заваряване на образци с дебелина 12 mm е избран електрод с диаметър 4 mm, сила на тока 150 – 200 А и работно напрежение 26 V.

За установяване наличието на студени пукнатини по повърхността на шева образците се оглеждат с лупа с 10кратно увеличение.

Съгласно изискванията на ASTM E 165 – 02 проявяване на пукнатините се извършва с пенетрант и абсорбент.

При този оглед наличие на пукнатини по повърхността на шева и околошевната зона не са открити.

От образците се изрязват парчета за шлифове. Заливат се с полиестерна смола и след втвърдяване на смолата се обработват на фрезова машина ФУ320, шлифват се на плоскошлифовална машина ШПХ 161 и финно обработване на шлайф машина Metasineks с водна шкурка с номера 240, 320, 400, 500 и 600.

Изпитването на механичните свойства на заварени съединения е извършено съгласно изискванията на БДС EN 910:2002.

## 4.2. Анализ на получените резултати

В този параграф са дадени резултати от приложение на дадената в Глава 3 методика за получаване на математичния модел с прилагане на Регресионния анализ.

След предварително проучване на влияещите величини върху заваръчния процес, като фактори са избрани:

$X_1$  – температура на предварително подгриване  $T$ , [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$X_2$  – големина на заваръчния ток  $I$ , [A];

$X_3$  – сила на натоварване, до достигане на пукнатина в заваръчния шев  $F$  [kN].

Като целева функция  $y$  е регламентирана променливата **ъгъл на огъване  $\alpha$**  [ $^{\circ}$ ].

При провеждане на експериментите е използван един тип заваръчни електроди с диаметър  $d_{\text{ел}} = 4 \text{ mm}$ .

Резултатите от съответните експерименти са дадени в таблица 4.6.

Таблица 4.6

№ на образеца	Температура на предварително подгриване, $T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Сила на тока, $I$ [A]	Натоварване, $F$ [kN]	Ъгъл на огъване до получаване на пукнатина, $\alpha$ [ $^{\circ}$ ]
1	19,8	150	15,4000	15,283
2	19,8	156	16,0000	16,550
3	19,8	160	19,5000	17,450
4	19,8	158	18,0000	16,780
5	19,8	170	22,5500	18,460
6	110	150	29,8500	49,583
7	110	155	31,3471	50,430
8	110	158	31,8924	51,800
9	110	162	32,8000	49,800
10	110	170	35,2000	49,500
11	200	150	34,6000	61,616
12	200	155	36,5000	63,000
13	200	157	38,5000	65,749
14	200	160	42,0000	68,250
15	200	170	43,8000	66,480

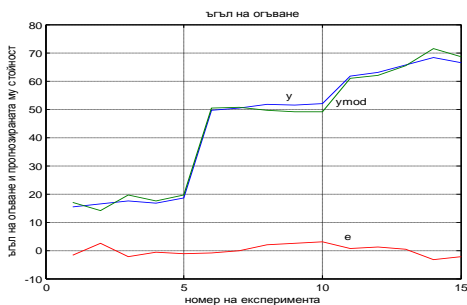
Следвайки последователността на разработената методика и математическия апарат се получават регресионните уравнения на модела.

Тъй като, получената стойност за коефициента на множествена корелация  $R$  се приема за значима и моделът с така определените коефициенти за адекватен и има вида:

$$\alpha = 87,3686 - 0,0102.T - 0,7136.I + 2,3894.F \quad (4.12)$$

На фигура 4.10 са показани ъгълът на огъване, предсказаната му по модела стойност и грешката





Фиг. 4.10. Криви на  $y$ ,  $y_{mod}$  и  $e$

Съгласно предложената методика в Глава 3 и параграф 3.1.4 след провеждане на заваряването от образците се изрязват образци със следните размери: 180 x 12 x 10 mm.

Проведени са три експеримента. Всеки един от образците участващи в

експериментите първоначално се натоварва с  $0,5Re$  на основния метал. По-нататък изпитанията се провеждат с увеличаване или намаляване на напрежението до появяване на студени пукнатини в последователност както следва: 0,25; 0,15 и 0,10 от  $Re$ .

Стойностите на натоварването, моментите и стрелката на огъване са показани в таблица 4.7.

Таблица 4.7.

% $Re$ [MPa]	Натоварване $P$ [N]	Момент $M$ [Nm]	Стрека на огъване $f$ [mm]
445 (50%)	3560	106,800	0,78
667,5 (75%)	5340	160,200	1,17
801 (90%)	6408	192,240	1,41
890 (100%)	7120	213,600	1,56

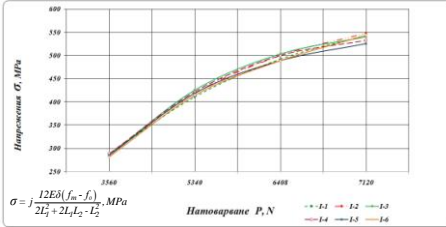
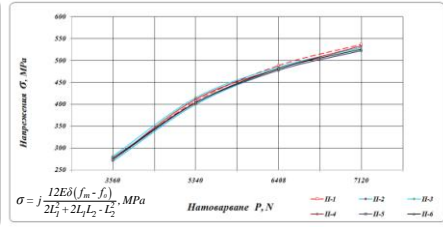
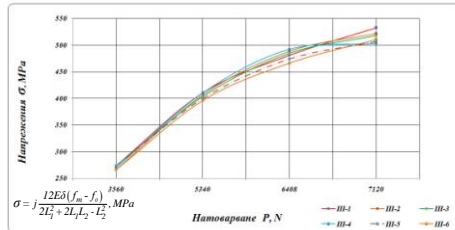
Напреженията в повърхността на образците и резултатите от проведените експерименти са показани в таблица 4.9.

От направените изследвания се установи, че най-високи вътрешни напрежения се наблюдават в образците от I<sup>VI</sup> експеримент. Образците не са подгряти т.е. скоростта на охлаждане е голяма, вследствие на което възникват вътрешни напрежения. Не се наблюдават пукнатини т.к. получените напрежения не превишават критичните (фиг. 4.13 а).

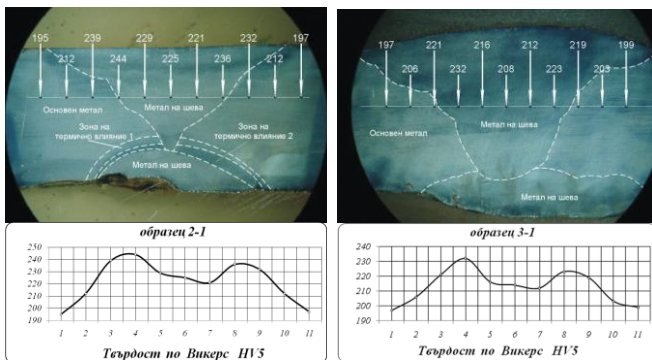
При заваряване на образците с предварително подгряване – до  $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$  и до  $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  (експерименти II<sup>PII</sup> и III<sup>PII</sup>) вътрешните напрежения намаляват, но не се различават много от тези получени без предварително подгряване. И тук не се наблюдават пукнатини т.к. получените напрежения не превишават критичните (фиг. 4. 13 б и в).

Таблица 4.9

№ на експеримента	№ на образца	Стрека на огъване				Напрежение при			
		при 0,5Re - f <sub>01</sub> [mm]	при 0,75Re - f <sub>02</sub> [mm]	при 0,9Re - f <sub>03</sub> [mm]	при 1,0Re - f <sub>04</sub> [mm]	0,5Re - σ <sub>1</sub> [MPa]	0,75Re - σ <sub>2</sub> [MPa]	0,9Re - σ <sub>3</sub> [MPa]	1,0Re - σ <sub>4</sub> [MPa]
I	I-1	0,00	0,06	0,08	0,09	288,73	410,89	492,33	544,15
	I-2	0,00	0,04	0,06	0,08	288,73	418,29	499,73	547,85
	I-3	0,01	0,02	0,05	0,10	285,03	425,69	503,43	540,45
	I-4	0,00	0,03	0,06	0,12	288,73	421,99	499,73	533,04
	I-5	0,01	0,04	0,09	0,14	285,03	418,29	488,62	525,64
	I-6	0,02	0,05	0,09	0,09	281,33	414,59	488,62	544,15
II	II-1	0,04	0,07	0,09	0,11	273,93	407,19	488,62	536,75
	II-2	0,05	0,09	0,12	0,15	270,22	399,78	477,52	521,94
	II-3	0,02	0,05	0,10	0,13	281,33	414,59	484,92	529,34
	II-4	0,04	0,06	0,11	0,12	273,93	410,89	481,22	533,04
	II-5	0,03	0,08	0,12	0,15	277,63	403,48	477,52	521,94
	II-6	0,04	0,08	0,11	0,14	273,93	403,48	481,22	525,64
III	III-1	0,04	0,06	0,11	0,12	273,93	410,89	481,22	533,04
	III-2	0,06	0,07	0,09	0,15	266,52	407,19	488,62	521,94
	III-3	0,04	0,08	0,10	0,16	273,93	403,48	484,92	518,24
	III-4	0,05	0,06	0,08	0,20	270,22	410,89	492,33	503,43
	III-5	0,04	0,09	0,13	0,19	273,93	399,78	473,82	507,13
	III-6	0,06	0,10	0,15	0,18	266,52	396,08	466,41	510,83

а) Диаграми на резултатите на образците от I<sup>ви</sup> експериментб) Диаграми на резултатите на образците от II<sup>ви</sup> експериментв) Диаграми на резултатите на образците от III<sup>ви</sup> експеримент

Фиг. 4.13. Диаграми на напреженията от проведените експерименти



**а)**

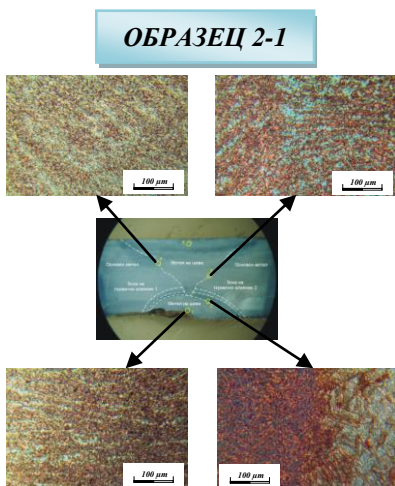
**б)**

**Фиг. 4.15. Разпределение на твърдостите**

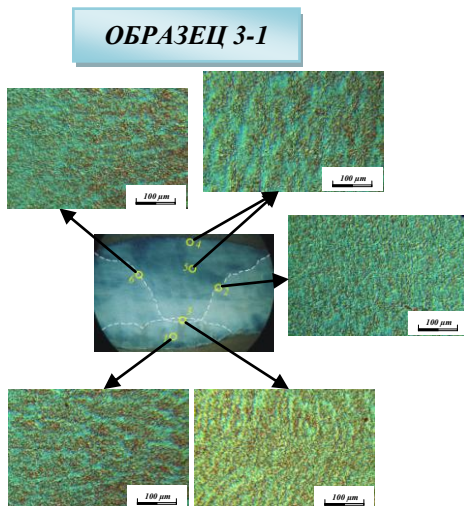
**а) – в образец 2-1; б) – в образец 3-1**

Структурата на метала на шева е с ясно изразен дендритен характер, като осите на дендритите са на значително разстояние. В отделни зони кристалите са с различна ориентация.

Ясно изразена границата на сплавяване. Няма микродефекти. В зоната на термично влияние се наблюдават едри трооститни и бейнитни зърна.



**Фиг. 4.18. Шлиф и структури от образец 2-1**



**Фиг. 4.20. Шлиф и структури на образец 3-1**

## Изводи към четвърта глава

1. Създаден е работоспособен математичен модел на процеса „заваряване на нисковъглеродни нисколегирани стомани с повишена якост“. За целта разглежданият технологичен процес се адаптира към разглежданият в Глава трета метод на регресионният анализ. След анализ на изчислителният процес се предлага двустъпкова процедура за оценяване на коефициентите на модела. Оценяване на качествата на модела е направено с използване на коефициента на множествена корелация.

2. За преодоляване на трудността, свързана с познаването на силата на натоварване  $F$ , участваща в математичният модел се предлагат две възможности: интерполиране на експерименталните данни от таблицата на наблюдения, или използване на приблизителни стойности по втори математичен модел, свързващ натоварването с температурата на предварително подгряване  $T$  и силата на тока  $I$ .

3. На базата на математичният модел е направена оптимизация на процеса заваряване на нисковъглеродни нисколегирани стомани с повишена якост и са определени оптималните параметри, даващи максимална стойност на целевата функция – ъгъла на огъване на заваръчното съединение, до достигане на пукнатина.

4. Анализът на макро- и микроструктурата на заваръчното съединение се установи:

- Метала на шева е без наличието на подрези, пукнатини и пори. В основния метал липсват макродефекти;
- Структурата на метала на шева е с добре изразени дендриди разположени ветрилообразно от границата на сплавяване към горната част на шева. Границата на сплавяване е добре изразена, със сравнително тясна зона на прегряване (ЗТВ);
- Твърдостта е в рамките на допустимите стойности и разпределение характерно за заваръчни съединения;
- Не се забелязва наличието на студени пукнатини, което се дължи на това, че остатъчните напрежения не превишават критичните.

5. От направените експерименти се установи, че температурата на предварително подгряване не оказва съществено влияние при заваряване на детайли дебелина 10 – 12 mm. Нейното влияние е свързано с намаляване на скоростта на охлаждане и от там намаляване на вътрешните напрежения.

## Глава V Технология за заваряване на нисковъглеродни нисколегирани стомани с висока якост.

Препоръчва се електрод: *ESAB OK75.78 E 89 6 Mn3NiCrMo B 4 2 H5 – 4 mm*

Препоръчва се сила на тока  $I_z = 160A$

Температурата на предварително подгриване за нисковъглеродни нисколегирани стомани с повишена якост е показана в таблица 5.1.

Минимална температура на подгриване

Таблица 5.1

Стомана	Дебелина на листа $\delta$ , mm							
	10	20	30	40	50	60	70	80
S890QL	20° C	75° C			100° C			
S960QL	20° C		100° C					

### Изводи към глава пета

В резултат на проведените изследвания на заваряемостта на нисковъглеродни нисколегирани стомани с повишена якост и анализа на опита на водещи специалисти в тази област, могат да се направят следните изводи:

1. Предложени са технологични решения за получаване на качествено заваръчно съединение от нисковъглеродни нисколегирани стомани с повишена якост:

- Формирани са технологичните изисквания;
- Посочени са изискванията към заваряваните материали, изискванията към подготовката за заваряване, избор на режими за заваряване и изискванията към термичната обработка на заваръчното съединение;
- Методът използва стандартна заваръчна апаратура и инструменти.

2. Технологичните режими на заваряване получени в резултат на изследването са основните технологични параметри в технологията за заваряване на нисковъглеродни нисколегирани стомани с повишена якост:

- Посочени са електродите за осъществяване на качествено заваръчно съединение. *ESAB OK75.78 E 89 6 Mn3NiCrMo B 4 2 H5*;
- Оптималните стойности на параметрите за заваряване са сила на тока  $I = 160A$ ; напрежение  $U = 24V$ ; линейна енергия  $Q = 1,67 MJ/m$ .

## ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ДИСЕРТАЦИЯТА

В резултат на проведеното изследване целта на настоящият дисертационен труд е постигната. От обработката на данните и анализа на получените резултати могат да се формулират следните основни изводи в дисертационния труд:

1. Анализирани са факторите, които влияят на заваряемостта на металите. Тези фактори потвърждават и доказват сложността на задачата за еднозначно определяне и оценяване на заваряемостта. Изборът на даден показател и критерий или стойностите за него, се регламентира в зависимост от конкретния случай т.е. какъв е метала, технологичните условия на заваряване конструкцията на съединението.

2. Анализирани са методите за оценяване на заваряемостта.

От аналитичните най-често се използва определянето на „въглеродния еквивалент” ( $C_{екв}$ ), от експерименталните – метода  $TRC$  или неговата разновидност  $RRC$  и метода „Имплант”.

От технологичните най-често се използват пробата „Теккен”, Кръстова проба и проба „ $СИБ-19-ХТ$ ”.

3. Анализирано е влиянието на въглеродния еквивалент върху заваряемостта на стоманите.

Подробно е разгледан ефекта от предварително и последващо подгриване за намаляване на скоростта на охлаждане и предотвратяването на получаване на закалъчни структури. Разгледан е и метода на стъпално подгриване.

4. Направен е анализ на използваните електроди за заваряване на ниско- и средновъглеродни стомани и подробно са разгледани видовете обмазки. Показано е и тяхното означение съгласно европейските норми.

5. Направена е технико-икономическа характеристика на електродите.

6. Разработени са методика за изпитване на устойчивост срещу образуване на студени пукнатини и компютърна програма за отчитане и регистриране на параметрите на заваряване.

7. Проектирани и изработени са приспособление за изпитване на четириточково огъване и приспособление за предварително подгриване на заваряваните елементи.

## НАУЧНИ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

От поставената цел и извършената работа по дисертационния труд са формулирани следните приноси:

1. Разработена е методика за изпитване на устойчивост срещу образуване на студени пукнатини. Тя установява дейности при изпитване устойчивостта срещу образуване на студени пукнатини в зоната на термично влияние и метала на шева при заваряване. Разработени са два метода на изпитване: машинен и технологичен. Методите на изпитване се използват при провеждане на изследователски изпитвания за оценяване заваряемостта на металите.

2. Разработена е компютърна програма за отчитане и регистриране на параметрите на заваряване. Програмата е разработена на програмен продукт Lab view.

3. Проектирано е и е изработено приспособление за четриточково огъване. Пълната документация се намира в приложение 3. С помощта на приспособлението, съгласно създадената методика, се определят вътрешните напрежения в образците.

4. Разработен е математичен модел за определяне влиянието на факторите върху качеството на заваряваното съединение. За обработване на експерименталните резултати и проверка качествата на модела е проведен Регресионен анализ (виж гл.3 от дисертационния труд).

5. За провеждане на опитите съгласно плана на експеримента в разработената методика е проектирано и изработено приспособление за предварително подгряване на заваряваните образци (виж гл.3 от дисертационния труд).

6. Установени са параметрите на режимите за заваряване на нисковъглеродни нисколегирани стомани с повишена якост, отговарящи на изискванията за качество на заваръчните съединения. Най-подходящи са електродите на фирма **ESAB OK75.78 E 89 6 Mn3NiCrMo B 4 2 H5  $\Phi$  4 mm**, при следните оптимални стойности на режима на заваряване сила на тока  **$I = 160A$** ; напрежение  **$U = 24V$** ; линейна енергия  **$Q = 1,67 MJ/m$** .

## СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ТЕМАТА

1. Люцканов Г. К., Пл. Д. Дичев, Хр. В. Христов, Оценяване на заваряемостта на нисковъглеродни нисколегирани стомани , Морски научен форум, сборник Енергетика, механика, кораборемонт, Варна, 2011 – С. 219 ÷ 223
2. Дичев Пл. Д., Г. К. Люцканов, Я. Б. Аргиров, А. М. Стоянова, Електродьгово заваряване на нисковъглеродна нисколегирана стомана с повишена якост, Машиностроителна техника и технология, Бр. 1, 2011 – С. 38÷42
3. Люцканов Г. К., Изследване на структурата на нисковъглеродни нисколегирани стомани с повишена якост след заваряване с предварително подгряване до 120 °С и до 220 °С, Морски научен форум, сборник Енергетика, механика, кораборемонт, Варна, 2013 – под печат
4. Дичев Пл. Д., Г. К. Люцканов, Я. Б. Аргиров, Изследване на структурата на стомани с повишена якост след заваряване без предварително подгряване, Трети международен научен конгрес – 50 ГОДИНИ ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА, октомври 2012 – С. 87÷90
5. Люцканов Г. К., Б. Н. Дяков, Проблеми, възникващи при подводно заваряване на стомани, използвани за изграждане на морски съоръжения, Трудове на ВВМУ „Н.Й.Вапцаров”, 2008 – С .
6. Дичев Пл., Г. Люцканов, Д. Генов, Експериментално изследване на процеса заваряване на нисковъглеродни нисколегирани стомани с висока якост в програмна среда MATLAB, Компютърни науки и технологии, 2013 – С 75÷82