

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Дойчин Николаев Ников

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОЦЕСА НА РЪЧНО ЕЛЕКТРОДЪГОВО ЗАВАРЯВАНЕ НА МЕТАЛИТЕ ПОД ВОДА

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна
степен „Доктор“

Научен ръководител:

1. проф.д.т.н. инж.Сава Иванов Контров

Рецензенти:

1. проф. д.т.н. инж. Илиана Йорданова
Маринова

2. доцент д-р инж. Христофор Петров
Тахрилов

ВАРНА 2018

Дисертационният труд е обсъден на __.__.____г в катедра „ЕТЕТ" и насочен за защита

Автор: инж.Дойчин Николаев Ников

Заглавие: Изследване на процеса на ръчно електродъгово заваряване на металите под вода

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Дойчин Николаев Ников

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОЦЕСА НА РЪЧНО ЕЛЕКТРОДЪГОВО
ЗАВАРЯВАНЕ НА МЕТАЛИТЕ ПОД ВОДА

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна
степен „Доктор“

ВАРНА 2018

Дисертационният труд съдържа 184 страници, включително 49 фигури, 9 таблици, 98 математически зависимости, оформени в увод, 5 части (обзорна с изводи, цели и задачи на дисертацията; разработка на методология за провеждане на научните изследвания, експериментално изследване на процеса електродъгово заваряване на метали под вода в изследване на взаимовръзка между параметрите на режима, шихтовият състав на покритието на електрода и тяхното влияние върху механични и технологични свойства на заваръчното съединение, експериментално изследване на влиянието на околната среда на подводно заваряване с електроди, създаване на модел за топлопредаване от дъгата към заваряваните съединения под вода, разработване на нови електроди и практическо им изследване по отношение на постигнатите технологични и механични показатели на заваръчното съединение под вода сравнено към електроди на световно известни компании, разработване на нов метод и приспособление за подводно електродъгово заваряване на металите, общи изводи и основни приноси – 3 научни, 14 научно-приложни и 12 приложни), списък с публикациите на автора по темата на дисертационния труд, списък на използваната литература от 251 заглавия, от които 153 на кирилица и 98 на латиница и 21 приложения.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на г. от
..... ч. в открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора № /
..... г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на
интересуващите се във ФД „Докторанти“, стая 318 НУК.

I. Обща характеристика на дисертацията

1. Актуалност на проблема.

Развитието на съвременните технологии за усвояване на природните ресурси е тясно свързано с прилагането на подводни заваръчни операции. Този процес има два аспекта: експлоатационна надеждност и екологична защита от аварии. Особено актуален е втория аспект, свързан с предотвратяване или бързо отстраняване на възникнали аварии и по този начин осигуряване на биологически чиста среда. Голяма част, от тези мероприятия се осъществяват чрез подводно заваряване по „мокрия“ способ. Ето защо големи фирми занимаващи се с усвояване на шелфовата зона като: „Taylor Diving and Salvage” Inc - САЩ; Comex S.A.- Франция, Draeger (Dräger) - Германия и др. приемат и развиват методите на „мокро“ подводно заваряване. Акцента в тази посока е към развитието на нови електроди за ръчно електродъгово заваряване. Този метод на заваряване се е наложил в световен мащаб поради две основни предимства: маневреност и големи възможности за регулиране на свойствата на наварения метал чрез покритието на електродите. По тези причини мощните европейски фирми производителки на заваръчни материали: Месер Грисхайм GmbH (Messer Griesheim GmbH) – Тисен (Thyssen) - САФ - Есаб [169] и др. са обединили усилията си за разработването на нови електроди за „мокро“ подводно заваряване (МПЗ). Тази разработка е подкрепена от съвместните действия и на фирмите Comex S.A.- Dräger GmbH.

България е стратегически коридор по доставка на газ, отчитайки добива на газ чрез налични сондажни платформи в България (фирмата Petreco, или днешната Melrose Resources) и проучванията в Румъния (OMV Petrom, ExxonMobil и други), поддръжката на съоръженията под вода и наличието на нови технологии за бързо отстраняване на възникнали аварии има съществено значение от екологически аспект в цел запазване на флората и фауната на Черно море - днес и в бъдеще. Допълнително наличието на множество хидротехнически съоръжения в България при висока инвестиционна стойност и с голямо стратегическо значение, като множество каскади ВЕЦ, АЕЦ ”Козлодуй” и голям обем язовири с водонапорни кули подлежащи на периодичен ремонт - изисква постоянно наличието на съвременни технологии за подводни ремонти, професионално подготвени кадри (водолази, инженери и технолози) с практически знания и подготовка по заваряване и рязане на метали, нови средства и екипировка за подводна заваряване на металите с цел реализация на бързи ремонтни операции (със значим икономически ефект в десетки милиони евро спестени на държавата, като при ремонта на язовири „Тича”, „Георги Трайков” и др., а често и с значим екологически ефект) и с възможности за бързо, ефективно и качествено ликвидиране на аварии под вода.

Подводното заваряване на метали и морски технологии е включено като приоритетно научно направление в Иновационната стратегия за интелигентна специализация на Република България в областта на морската индустрия за периода 2014-2020 година. Лабораторията за подводно заваряване и рязане на ТУ-Варна, която има значителни постижения в областта на научните изследвания и в приложна дейност по ремонт на плаващи конструкции, хидро съоръжения, АЕЦ и ВЕЦ-те в България е основен инфраструктурен обект в предложението за изграждане на Център за компетентност по обучение на професионални кадри на национално и международно ниво, а същевременно по провеждане на авангардни научни и приложни изследвания в областта на иновационни морски науки и подводни технологии.

Обект на изследване на настоящата работа е изследването на възможностите за регулиране свойствата на заваръчните съединения чрез покритието на електродите при мокро

подводно заваряване. Резултатите от това актуално изследване насочено към съвременните тенденции в тази област са скромни принос в развитието на методиките и научно-приложните принципи при разработването на електроди за „мокро“ подводно заваряване и в разработване на нов метод и приспособление за подводно електродъгово заваряване на металите. Разработеното приспособление позволява да се автоматизира процеса на заваряване под вода с важно практическо приложение в заваръчното производство, корабоплаването, ремонта на корабите, морското строителство и при заваряване на подводни съоръжения.

2. Цел и задачи на дисертацията.

Въз основа на направените изводи от литературния обзор и във връзка със актуалността на процеса ръчно електродъгово МПЗ, основната цел на дисертационната работа е следната:

Цел на настоящата дисертация е изследване зависимости и възможности за управление на основни технологични характеристики, състава на шихтата на ЕПЗ, допълнителните средства за защита шева и тяхното влияние върху качеството на заваръчното съединение при заваряване под вода с електроди .

Постигането на тази цел е свързано с решаване на следните основни задачи:

1. Разработване на методология за изследване на влиянието на шихтовия състав на обмалката на електроди за „мокро“ подводно заваряване (ЕПЗ) върху технологичните характеристики и свойствата на заварените съединения.

2. Разработване на методики за провеждане на изследванията, изпитанията и създаване на критерии за оценка на изследваните характеристики и параметри.

3. Изследване на взаимовръзката между параметрите на режима на заваряване и състава на шихтата на ЕПЗ върху качествата на заваръчното съединение при заваряване под вода.

4. Изследване на взаимовръзката между температурата, скоростите на охлаждане и структурата на заваръчното съединение при заваряване под вода.

5. Изследване на възможностите за допълнителна защита на заваръчния шев при заваряване под вода.

3. Обект и място на изследване

Обект на изследване в настоящата работа е „Изследване на процеса на ръчно електродъгово заваряване на металите под вода“ (ППО), като се установят технологичните възможности за оптимизиране на параметрите на подводно електродъгово заваряване с електроди и създаване на ЕПЗ (електроди за подводно заваряване) осигуряващи качествено заваръчно съединение при заваряване под вода. И разработване на нов метод и приспособление за подводно електродъгово заваряване на металите позволяващо автоматизация на процеса на заваряване под вода, обезпечавашо повишаване на качеството и производителността на процеса. Изследванията са проведени в ОУЛ по “Заваряване” към Технически Университет – Варна.

4. Научна новост на изследването.

Разработен е обемен теоретичен модел на топлопредаването от дъгата към заваръчните детайли като се използва метода на крайните елементи и е разработена програма за изчисляване на параметрите на температурното поле. Изследвани са температурата, термическият цикъл и скоростта на охлаждане при подводно заваряване и са получени структурите в заваръчното съединение.

Разработена е методология за изследване и избор на главните оценяващи-регулативни технологични характеристики на процеса на заваряване под вода с електроди, свойствата на заваряваните съединения и техните измерители, които се определят главно от изискванията за експлоатационната пригодност на заваръчните съединения.

5. Реализация на резултатите.

Основните практическо-приложни приноси се отнасят до разработката от автора на електроди за подводно заваряване, чиито параметри не отстъпват на известните марки електроди за заваряване под вода.

Разработена е пълна методика за изследване на процеса на електродъгово заваряване под вода с електроди, включващо както изследване и оценка на процеса на заваряване, така изследване на влиянието на параметрите на режима, шихтовият състав на покритието на електрода и влиянието му чрез химичен състав върху качеството, механични и технологични свойства на заваръчното съединение. Разработената методология дава възможност да се получат данни за термичните, структурните и механичните свойства, за която и да е точка на зоната на термично влияние в шева под вода, което дава възможност методологията да бъде използвана успешно не само за подводно заваряване, но и за други методи на заваряване.

Практическият принос на методологията е разработените от автора ЕПЗ-23Н и ЕПЗ-12С (ЕПЗ 4.3 и ЕПЗ 4.12), като при паралелни изследвания на разработените електроди и електродите производство на различни фирми G98 Германия, Е 6013, ЭПС-АН1 (Украйна) при еднакви режими на заваряване под вода е доказано, че разработените българските електроди не отстъпват по качество на вносните електроди.

Разработена е и апробирана технология за производство на ЕПЗ в "ЗАВОД ЗА ЕЛЕКТРОДИ" ООД – гр. Ихтиман (приемник на ЗЕ "Ихтиманска комуна" - гр. Ихтиман). Електродите ЕПЗ - 23Н и ЕПЗ – 12С за МПЗ се произвеждат по наша поръчка, към момента има произведени – 300 кг налични на склад.

Разработените електроди за МПЗ са апробирани от Център за професионално обучение към ТУ-Варна с лиценз №200312157, Пристанище Бургас ЕАД, Еко Клийн Технолоджи ЕООД, фирми „Соларис” и „Ремтехнолоджи” ООД (РЕМТЕХСТРОЙ ГРУП) при ликвидация на кораба „Олга” в Пристанище Бургас, и др. Допълнително разработените нови ЕПЗ (ЕПЗ-23Н и ЕПЗ-12С) се използват успешно от години при обучение на курсисти (водолази) от множество фирми и структури на Дирекция „Гражданска защита” в Център по професионално обучение към Технически университет – Варна.

6. Апробация на резултатите.

Основните теоретични и приложни резултати от дисертационния труд са докладвани и публикувани в следните научни форуми и издания:

• **Три броя самостоятелни доклада:**

- XXIII НТК с международно участие, ЕКОВАРНА 2016, ISSN 2367- 6299.
- XXIV НТК с международно участие, ЕКОВАРНА 2017, ISSN 2367- 6299.(под печат)

• **Три доклада в съавторство:**

- МНТК, V международен конгрес „Машиностроителни технологии 06”, 20-23 септември 2006 г., ISSN 1310 - 3946
- MEET/MARIND 2002 Proceedings of First International Congress on Mechanical and Electrical Engineering and Technology and Fourth International Conference on Marine Industry, Volume IV, 07-11 X 2002, Varna, ISBN 954-20-0214-9

7. Публикации по дисертацията.

Основните етапи от разработването на дисертационния труд са отразени в 7 публикации, списък на които е приложен в края на автореферата.

II. Кратко изложение на основните резултати от дисертацията.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ НА СЪВРЕМЕННОТО СЪСТОЯНИЕ И ВИЖДЕНИЯ ЗА ПРОЦЕСИТЕ ПРИ ПОДВОДНО ЕЛЕКТРОДЪГОВО ЗАВАРЯВАНЕ С ЕЛЕКТРОДИ

В прегледа на литературата са разгледани, анализирани и съпоставени различни методи за подводно заваряване на металите. Отделено е по-голямо внимание на изследвания метод за електродъгово заваряване на металите под вода чрез „мокро” подводно заваряване- начин, при който заваръчният процес, заваряването съединение и заварчика се намират в непрекъснат контакт с водата и възможностите за приложението му при заваряване на метали под вода с приложение в заваръчното производство, корабоплаването, ремонта на корабите, морското строителство и при отстраняване на аварии на подводни съоръжения.

Анализирани са подробно важни особеностите на „мокрото” подводно заваряване по отношение на параметри: електрическата заваръчна дъга под вода; парогазов мехур около дъгата, горяща под вода; характеристики на дъгата; топене и пренасяне на електродният метал и металургични процеси, също подробно са анализирани първа група проблеми появяващи се при подводно заваряване: горещи (кристализационни) и студени пукнатини; пористост; шлакови включвания и дефекти на формата на шева. Направен е подробен анализ на друга група важни проблеми свързани с процесите предизвикващи появата на пукнатини в процеса на експлоатация: породени от технологична якост на заваръчните съединения и породени от механичните свойства на заваръчните съединения.

На базата на подробният литературен анализ на „мокрото” подводно заваряване представени в тази глава, могат да се направят следните изводи:

1.1. В теоретичен аспект повишаването на експлоатационните свойства на заваръчните съединения, получени при МПЗ се определят от четири възможности за получаване на качествени съединения:

- регулиране на количеството вложена в системата енергия с цел компенсиране на отрицателното влияние на средата;
- въздействие върху константите на равновесие в газо-шлаковата и метална фаза чрез регулиране шихтовия състав на покритието на електродите;
- намаляване на скоростите на охлаждане на шева и ЗТВ;
- регулиране на структурните нееднородности в заваръчното съединение, като се въздейства върху скоростите на охлаждане на метала.

1.2. Технологичната якост-устойчивостта на метала срещу образуване на горещи пукнатини се определя главно от:

- от интензивното преохлаждане на заваръчната вана;
- насищането на метала с водород;
- натрупването на ендогенни структурни нееднородности и дефекти;
- натрупване на екзогенни дефекти (неметални включвания);
- дисперсионни процеси и прочие;
- устойчивостта срещу образуване на студени пукнатини определящи се от структурно- водоравното състояние на метала.

1.3. Механичните свойства на заваръчните съединения получени при МПЗ зависят от еластично-пластичните свойства на метала, който се определят от:

- структурно-водородното състояние на метала на шева и ЗТВ;
- количеството и размерите на екзогенните дефекти (основно микропори);
- устойчивостта на дъгата горяща под вода, която определя характера на кинетиката на протичащите процеси.

1.4. Анализа на причинно-следствените зависимости, определящи свойствата на заваръчните съединения при МПЗ определя главните насоки за получаване на качествено съединение:

- понижение и намаляване на количеството на неравностните структури и структурната нееднородност в заваръчния шев и ЗТВ;
- намаляване на количеството на водорода в метала на шева и ЗТВ;
- повишаване на устойчивостта на дъгата;
- използването на подходящата система за покритието на електрода (метала, материали, свойства и др.).

1.5. Количеството на неравностните структури може да се намали чрез създаване на условия за протичане на дифузионните процеси. Закономерностите при топлообмена са валидни и за дифузията. С намаляване на топлопроводимостта в една система при едни и същи значения за топлинния поток - q , температурата в системата ще се запази по-висока. Това означава, че повишаване на температурата в системата коефициента на дифузия ще се увеличи. Увеличаване на коефициента на дифузия намалява разликата между концентрациите в дадена точка и началната концентрация, т.е. има тенденция към изравняване на концентрациите в микро и макро аспект, което намалява количеството на неравностните структури, вътрешните напрежения, дефектите и др.

1.6. Намаляването на топлопроводимостта на заваръчното съединение се постига чрез шлага, като се използват шлаки с ниска топлопроводимост, съдържащи окиси на алкалоземни метали Ca, K, Na. За тази цел се използват и внасянето на газове с по-ниска топлопроводимост на водната пара и водорода в заваръчното пространство такива като CO_2 и CO. Намаляването на топлопроводимостта се постига и с изолация на заваръчното съединение с различни изолационни материали.

1.7. Увеличаването на количеството на шлага с цел намаляване на топлообмена в стадия на ваната изисква използването на дебело обмазани електроди. Това би могло да доведе до увеличаване на дължината на дъгата поради образуване на по-голяма козирка в края на електрода. Следователно е необходимо да се внесат такива компоненти в покритието на електрода, които да повишат енергопроводимостта, степента на йонизация в заваръчното пространство с цел повишаване на устойчивостта на дъгата. Могат да се използват: Fe прах, компоненти които при нагриване и дисоциация определят йони на Ca; Na; K; TiO_2 , ZrO_2 ; SiO_2 и др.

1.8. Анализа на посочените начини за намаляване на отрицателното въздействие на водата върху топлофизическите процеси при МПЗ показват, че се създават условия за подобряване на технологичните свойства на електродите в енергетичен аспект. Намалява се прегряване на метала в стадия на капката, а заедно с това и насищането му с водород. Създават се условия за протичане на дифузионни процеси в стадия на ваната, допринасящи за намаляване на количеството както на неравностните структури и водорода, така и на вътрешните напрежения.

1.9. Проблемите свързани с намаляване на концентрацията на водорода в навареният метал се свързани главно със създаване на условия за образуване на неразтворими в метала съединения още в стадия на капката. Един от начините за намаляване на водорода е да се образуват съединения на флуора – HF. Необходимо е да се отбележи, че флуорните йони са силно електроотрицателни, а това води до затормозяване на йонизационните процеси. По същия начин се проявяват и йоните на HF. В известна степен това се компенсира от Ca в атмосферата на дъгата, образувалия се при дисоциацията на CaCO_3 и CaF_2 . При създаването на подходящи условия, намаляването на водорода може да се постигне при взаимодействие на Ti и Zr и други например с водород и се образуват съединения като TiH_4 .

1.10. Особено значение за качеството на заваръчните съединения при МПЗ има физико-технологичните свойства на шлаките. Регулирането на специфичното им тегло, плътност им,

вискозитета, температурата на топене и отделимостта им се осъществява чрез изменение на съотношението между компонентите от шихтата на обмзката на електродите.

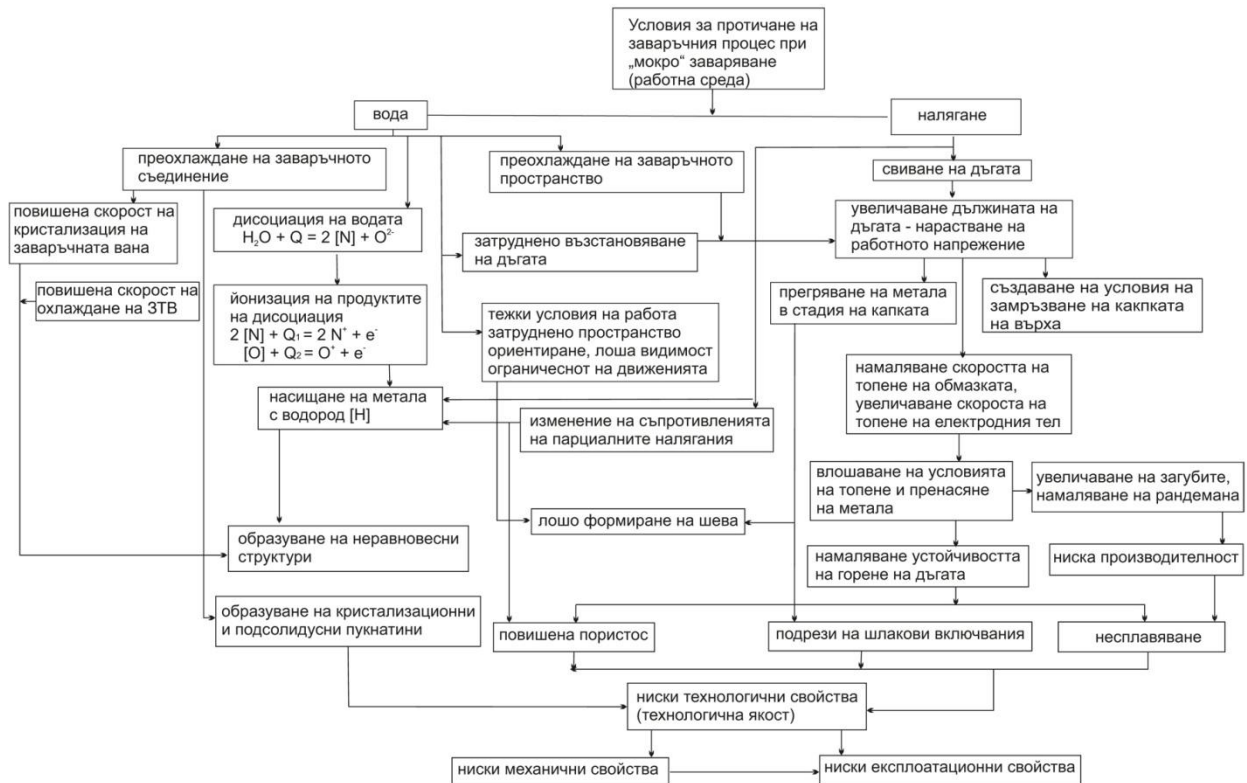
1.11. Анализа на проблемите и начините им за решаване показва, че качеството на заваръчното съединение може да се осъществи главно чрез регулирането на шихтовия състав на покритието на електродите, които определят термодинамичните процеси в дъгата и заваръчната вана. Характерен състав на шихтовата система на покритието на електрода е: $\text{CaCO}_3\text{-TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-FeTi-FeSi-FeMn-Fe}$ прах но в литературата няма данни за състава на покритието и съотношенията на оказаните компоненти. Необходимо да изследва състава на покритието и съотношението между компонентите при РПЗ .

1.12. По-голямата част от анализирани в Глава I изследвания са реализирани при изследването на различни видове електроди предназначени за заваряване на сухо поради което могат да бъдат използвани само като ориентировъчни при създаване на електродите за заваряване под вода и реализираните технологии при МПЗ.

1.13. Основно направление при разработване на електродите и технологиите при заваряване под вода трябва да бъде изследването на възможностите за изолация на шева от околната среда и намаляване на скоростта на охлаждане предизвикваща изменения на структурата на заваръчните съединения в резултат на което се появяват дефекти в шева и ЗТВ.

1.14. Анализирайки причинно-следствената връзка между условията за провеждане на заваръчния процес под вода по "мокрия" способ, характера на протичането му и свойствата на завареното съединение може да се предложи посочената на фиг.1.2 обобщена схема.

- Причина за ниските експлоатационни свойства на заварените съединения са условията, при които протича процеса: вода и налягане.
- Все още няма единно мнение относно оптималния тип шихтов състав и състав на наварения метал за електроди за „ мокро " подводно заваряване задоволяващ изискванията.



Фиг.1.2. Обобщена схема на причинно-следствената връзка между условията за провеждане на заваръчния процес под вода по "мокрия" способ

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТВАНЕ НА МЕТОДОЛОГИЯ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОЦЕСА НА ЗАВАРЯВАНЕ ПОД ВОДА С ЕЛЕКТРОДИ

В тази глава е разработена методология за провеждане на изследването, изпитанията и създаване на критерии за оценка на изследваните характеристики и параметри на процеса на заваряване под вода с електроди. Предварителният анализ и теоретичните постановки на изследването (гл. 1) в съществуващата информация установи, че не позволява построяването на теоретичен модел поради причини, свързани с нелинейността на зависимостите в различните изследвани системи. Това наложи използване на статистико-експериментален подход за разкриване на реалните взаимовръзки на изследваната система чрез определени въздействия и чрез експериментално измерване (определяне), анализ на свойствата на заварените съединения и процеса на заваряване чрез вариране на ш.с.

На базата на предварителни литературни проучвания, изпитания и натрупан опит от автора е разработена и се предлага рационална последователност на методология за изследване, и анализ на обмазани електроди, апробирана при създаването на няколко групи електроди, която по същество представлява непрекъснат интеграционен процес на задълбочаване на познанието и включва следните основни етапи описани в тази глава:

- Избор на главни, оценяващи резултативни (технологични) характеристики на заваръчния процес, свойствата на заварените съединения (в случая ръчно електродъгово МПЗ) и техни подходящи измерители;
- Избор на главни управляващи шихтовия състав променливи, диапазоните им на изменение;
- Избор на план за експеримента;
- Съставяне на схема на експеримента със схема на експерименталната установка, схема на измерване и регистрацията им;
- Провеждане на експериментални изследвания и изпитания;
- Статистическа обработка на резултатите;
- Анализ на получените зависимости (графични и числени) изводи и препоръки.

При избора на технологичните характеристики на процеса и свойствата на завареното съединение, вниманието бе концентрирано върху следните основни групи свойства:

- технологична якост на заваръчните съединения [195,247,248,249,250,251];
- устойчивост на горене на дъгата (Анализът в гл. 1 показва взаимовръзката между шихтов състав-работна среда и кинетиката на термодинамичните процеси) [195,247,248,249,250,251];
- енергетични показатели на процеса, свързани с производителност и относителна (специфична) енергия за стопяване (наваряване) на метала [19,195,247,248,249,250,251];
- структура и химически състав на навареният метал [195,247,248,249,250,251];
- механични свойства- представени главно чрез ударната жилавост като комплексен показател на еластично-пластичните свойства на метала на шева и ЗТВ чрез устойчивостта срещу „крехко” разрушаване [35,79,195,247,248,249,250,251];
- технологични дефекти-дефектност-микро- и макро-дефекти на съединенията, получени с различен ш.с. при МПЗ [195,247,248,249,250,251]

На базата на разработената методология представена в тази глава, могат да се направят следните изводи и реализирани приноси:

2.1. Разработена е методология за изследване и избор на главните оценяващо-регулативни (технологични) характеристики на процеса на заваряване под вода с електроди и свойства на заваряваните съединения и техните измерители се определя главно от изискванията за експлоатационната пригодност на заваръчното съединение.

2.2. Разработена е методика за избор на главните управляващи променливи на шихтовата система на покритието на електрода на базата на предварителният анализ в Глава 1 и 2 като основен момент е развитието и задълбочаване на зависимостите между компонентите на шихтовата система, и свойствата на заваръчния процес и завареното съединение.

2.3. Разработена е методика за избор на плана на експериментите, схемата на експериментите, схемата на експерименталната уредба и схемата на измерванията и тяхната регистрация като са прецизирани всички условия за отстраняване на неточностите при избора на пробни тела и измерваните характеристики.

2.4. Разработена е методика за определяне на дефектите в заваръчното съединение като са използвани рекомендациите на стандартите и литературни данни. В някои случаи са въведени изисквания превишаващи тези на стандартите.

2.5. Разработена е методика и са определени параметрите за оценяване на устойчивостта на горене на дъгата под вода.

ГЛАВА 3. ИЗСЛЕДВАНИ НА ВЗАИМОВРЪЗКАТА МЕЖДУ ПАРАМЕТРИТЕ НА РЕЖИМА И ШИХТОВИЯ СЪСТАВ НА ПОКРИТИЕТО НА ЕЛЕКТРОДА ПРИ ПОДВОДНО ЗАВАРЯВАНЕ

В глава 3 са представени експериментални и теоретични изследвания на база опитна поставка реализирана в съответствие на разработена методология в гл.2 и на изпитания на извадка от 17 броя електрода за подводно заваряване с различен шихтов състав.

Всички пробни тела са изработени от един лист стомана 09Г2 по БДС EN ISO 4880/89 с дебелина 13 mm. Изборът на тази дебелина е съобразен и с единствената спецификация за "мокро" подводно заваряване (МПЗ) AWS D 3.6 (AWS D 3.6M 2010 и AWS D 3.6:2017 [225]).

За провеждане на експериментите при МПЗ са изготвени образци, от нисковъглеродна конструкционна стомана 09Г2 по БДС EN ISO 4880/89 (09Г2 по ГОСТ 19281-89; аналог 7Мп6 по EU/DIN WS-№:1.1123 Германия). По литературни данни [228,229,230,231, 232,234,235,236,237,238,239,240,241,242] този клас стомани поради добрата си заваряемост се намерили широко приложени в сложни строителни конструкции за химическата, петролната, строителството, корабостроенето, подводни тръбопроводи [239], водонапорни тръби, затвори и аварийни прегради в ТЕЦ-ве [231], напорни тръбопроводи ВЕЦ (примерно ВЕЦ „Момина клисура” [236]), прегради във водонапорни кули на язовири, тръбопроводи и резервоари в АЕЦ, и други индустрии.

Нисколегирани корабни стомани 09Г2 и 09Г2С по БДС EN ISO 4880/89 (09Г2С по ГОСТ 19281-89, аналог 13Мп6 по DIN 17145) е отлично доказал се материал в морски транспорт, за плавателни съдове от речен и морски клас и за плаващи кранове, осигуряващи на корпуса изключителна здравина при относително ниско тегло [233,240,241]. Въпросният клас нисколегирани стомани се използват при изграждане и на фундаментите на мостове (примерно моста през Керченски проток и др.) в морска вода [232].

Експерименталните резултати са групирани в три основни групи дадени в §3.1. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТА:

- технологични характеристики – Приложение 4; Приложение 5, [251]
- механични свойства – Приложение 6, [251]
- сравнителни изпитание и изследвания – Приложение 7; Приложение 14

В последната група са посочени резултатите от дълбоководни изпитания на електроди с рутилови-базичен тип покритие – Приложение 7; Приложение 14

На заварените съединения е извършено металографско изследване на структурата. Резултатите са посочени в гл.5.

§3.1. Анализ на резултатите от изследването.

При планирането на експеримента - композирането на шихтовите състави, бе използван план на Хартли, предполагащ връзка между независимите променливи X_i изследваните (резултативните) променливи (параметри) във вид на полином от ред, не по-висок от следния:

$$Y_{ij} = a_0 + \sum_i A_i x_i + \sum_{ij} A_{ij} x_i x_j + \sum_{ii} A_{ii} x_i^2 \quad (3.1)$$

На база извършеното изследване е извършено разкриване и анализиране на взаимовръзки между независимите променливи, технологичните и механични свойства на заваръчния процес, и заваръчните съединения, като преобладаващата част от тези зависимости се описват с нелинейни уравнения (гл.2). Това наложи линеаризация на зависимостите в статистически план. Което наложи да се пристъпи към необходимо установяване и анализиране, на значимите и значимостта на изследваните зависимости и преди всичко описващите ги независими променливи параметри (зависими, резултативни величини). Това беше постигнато с корелационен анализ, който е удачен в случаи, когато вида на изследваната зависимост в статистически аспект е с неизвестен характер.

В изследването, корелационният анализ е развит в два етапа: рангова корелация на Спирмен за установяване на значимите (степената на свързаност) взаимовръзки между двойките от независима променлива и изследвана величина (параметър). Резултатите са посочени в Приложение 15.

- коефициент на конкордация на Кендал (Kendall's W) като измерител на статистическите връзки между ранговете на няколко променливи или изследвани величини, резултатите са посочени в Приложение 16.

Критерии за статистическа значимост на коефициента на рангова корелация на Спирмен r_S с критичната стойност $r_{S_{кр}}$, зависища от нивото на значимост α ($\alpha = 0,05$), т.е. 95% доверителен интервал [14;56] при n броя изследвани обекта.

Например при $\alpha = 0,05 \div 0,1$ и $n = 17$; $r_{S_{кр}} = 0,412 \div 0,33$

3.2.1. Изследване на значимите зависимости между двойки величини измерени чрез .

3.2.1.1. Изследване на технологичните свойства чрез r_S (Приложение 4; Приложение 5; Приложение 15) [251].

При изследването на технологичните свойства на 17 броя ЕПЗ с различни шихтови състави се установи тяхната най-значима връзка от:

- устойчивост на горене на дъгата k_S - статистически най-значима е връзката на k_S с CaF_2 : Увеличаване на количеството CaF_2 води до увеличаване на ранга k_S т.е. понижава се устойчивостта на горене на дъгата (УГД). Слаба е статистическата значимост на зависимостта между k_S и $Fe_{\text{прах}}$, но тя отразява тенденция за обратна пропорционалност между ранговете на k_S и $Fe_{\text{прах}}$: увеличаването на металната фаза в шихтовия състав (ш.с.) на покритието повишава УГД [251].

- количество на макродефекти N (относителна дефектност) се определят главно от количеството на CaF_2 в покритието. Увеличаването на CaF_2 е свързано с нарастване на макродефектите N . От останалите компоненти най-значимо влияние като тенденция само оказва съдържанието на TiO_2 в покритието: с нарастването му намалява количеството на макродефектите N [251].

- количеството на неметалните включвания в наварения метал D_S - тук най-значимата взаимовръзка е с количеството на $CaCO_3$ в ш.с. на покритието: увеличаването на $CaCO_3$ в покритието е свързано с нарастване на микрошлаковите включвания. Противоположно влияние оказва увеличеното съдържание на TiO_2 (рутил) в покритието. Увеличаването му е свързано с намаляване на неметалните включвания [251].

- количество на микропори D_P - в статистически аспект най-значима е взаимовръзката между D_P и CaF_2 , отразяваща нарастване на количеството на флушпат в ш.с. на покритието. Обяснението на феномена трябва да се търси в съвместното действие от повишаване парциалното налягане на газовата фаза и комплексите от CaO , явяващи се като зародиш на газови пори при ускорена кристализация на стопилката. Аналогично влияние оказва и повишеното съдържание на $FeMn$ [251].

- устойчивост на метала срещу кристализационни пукнатини P_{cr} - Анализът показва, че най-силно влияние за увеличаване на устойчивостта на метала срещу кристализационни пукнатини оказва повишаване на количеството на Fe прах в покритието на ЕПЗ. Аналогично влияние оказва и повишаването на количеството на FeMn в ш.с. на покритието. Нарастването на P_{cr} (устойчивостта на метала срещу кристализационни пукнатини) е пропорционално на нарастването на количеството на CaCO_3 в ш.с. покритието [251].

- количество топлина за разтопяване на 1 kg метал q_L - най-силно се влияе от количеството на CaCO_3 в ш.с. на покритието. Взаимовръзката между ранговете е обратнопропорционална, но във физически аспект q_L нараства с намаляване съдържанието на CaCO_3 в покритието [251].

- количеството топлина, необходимо за наваряване на 1 kg метал q_r - се влияе най-силно от количеството на Fe прах и TiO_2 в покритието на ЕПЗ. Нарастването на количеството на Fe прах в покритието е свързано с намаляване на количеството топлина за наваряване на 1 kg метал. Този параметър се явява своеобразен показател на производителността, която е свързана и с количеството Fe прах в покритието на ЕПЗ. Увеличаването на количеството на TiO_2 в покритието на ЕПЗ води до намаляване на количеството енергия за наваряване на 1 kg метал [74,83,132,251].

- производителност на заваръчния процес [251]:

- коефициент на стопяване - α_L , нараства с нарастването на съдържанието на CaCO_3 и CaF_2 в покритието.
- коефициента на наваряване - α_r , най-силно се влияе от съдържанието на TiO_2 в покритието и на Fe прах. Зависимостта между α_r и TiO_2 е обратнопропорционална и се изразяваше в намаляване на α_r с увеличаването на TiO_2 .

3.2.1.1. Изследване на зависимостта шихтов състав – химически състав на наварения метал (Приложение 6; Приложение 16) [251].

- въглерод C% - съдържанието на въглерод в наварения метал е статистически слабо свързано с шихтовия състав на покритието. Значимостта се свежда до тенденция, изразяваща се в намаляване съдържанието на "C" с увеличаване на металната фаза в покритието, което е свързано с увеличаване количеството на разтворителя (желязо). Съдържанието на "C" се запазва ("увеличава") с нарастване съдържанието на CaCO_3 в покритието [251].

- манган Mn % - количеството му зависи главно от съдържанието на FeMn в шихтовия състав на покритието. Увеличаването на TiO_2 и CaF_2 води също до увеличаване съдържанието му в наварения метал [251].

- силиций Si % - неговото количество най-силно зависи от съдържанието CaCO_3 , с увеличаване на карбоната в ш.с. на покритието съдържанието на Si намалява. По същия начин (-като разтворител) влияе и металната фаза. Увеличаване на Fe прах способства за разтваряне на по-големи количества Si в метала. Увеличаването на FeMn в ш.с. на покритието намалява разтворимостта на Si в Fe, тъй като се разтваря Mn. Намалява се количеството на Si в метала на шева [250,251].

- дифузионен подвижен водород [H] [ml/100g Me] - зависимостта между количеството на дифузионно подвижен водород и шихтовия състав е слабо представена в статистически аспект. Количеството [H] в метала на шева се влияе от количеството на CaF_2 в покритието, с чието повишаване съдържанието на [H] намалява вследствие образуването на HF [250,251].

3.2.1.3. Изследване на зависимостите между компонентите на шихтовия състав и механичните свойства на наварения метал.

Направените изследване на тези зависимости в гл. 2 са представени главно чрез устойчивостта на метала срещу крехко разрушаване - ударна жилавост $a_k(A_V)$. Анализът на получените резултати във физико-статистически аспект показват, че нарастването на A_V е съпроводено с намаляване на FeMn в ш.с., на ниво тенденция може да се оцени влиянието на CaCO_3 върху A_V , а именно с увеличаване на CaCO_3 ударната жилавост намалява.

Твърдостта на наварения метал - $HV_{H.M.}$ - се определя главно от FeMn в ш.с. на покритието. Нарастването на $HV_{H.M.}$ се определя от повишеното количество FeMn в шихтовия състав на покритието при равни други външни условия. Влияние в значим статистически аспект оказва CaF_2 от ш.с. на покритието.

3.2.1.4. Изследване на зависимостите между параметрите на технологичните свойства на наварения метал.

Анализирайки основните зависимости между параметрите на технологичните свойства на наварения метал, като основни такива се открояват [251]:

- устойчивостта на горене на дъгата (УГД) k_S - най-значима е зависимостта с макродефектите, т.е. увеличаването на макродефектите N е свързано с понижаване на k_S (устойчивостта на горене на дъгата - УГД). УГД определя количеството на микропори и микрошлакови включвания, или количеството на микро- и макродефектите е свързано с устойчивостта на горене на дъгата чрез характера на пренасяне на метала на електрода, определящ вариациите в параметрите на режима I_S и U_S . УГД - k_S влияе на твърдостта на наварения метал, намалявайки я в случаите когато $k_S \rightarrow 1$, и върху [H]. УГД влияе слабо, но с изразена тенденция към увеличаване на дифузионно подвижния водород [H] в наварения метал с увеличаване на УГД - k_S т.е. $k_S \rightarrow 1$. УГД влияе значимо върху коефициента на стопяване α_L и сравнително слабо върху коефициента на наваряване α_r [251].

- количество на макродефектите N (относителна дефектност) - се определят главно от количеството на микродефектите и преди всичко от микрошлаковите образувания D_S . При изследване на тенденциите, количеството на макродефектите зависят от количеството дифузионно подвижен водород в наварения метал, а също и производителността на процеса: α_L , α_r . [28,29,45,46,251].

Нарастването на тези параметри води до нарастване на макродефектите [251]:

- количество на неметалните включвания в наварения метал D_S - количеството на микровключванията са свързани с увеличаване на енергоемкостта на процеса на стопяване на електродния метал q_L и коефициентите на стопяване α_L и на наваряване α_r . Тези включвания оказват отрицателно влияние върху P_{cr} [251]

- количеството на микропори D_P - количеството на микропорите зависят от количеството дифузионно подвижен водород [H] в наварения метал. Отрицателно влияние микропористостта оказва на P_{cr} , но изразена по-скоро като тенденция, като феномен, допълващ механизма на разрушаване на метала в ТИК [251]

- устойчивостта на метала срещу кристализационни пукнатини P_{cr} - показва тенденция на обратнопропорционална зависимост с устойчивостта на метала срещу крехко разрушаване - A_V ударна жилавост.

- устойчивостта на метала срещу крехко разрушаване A_V - е най-силно свърза с твърдостта на наварения метал - параметър, съчетаващ влиянието на химическия състав и вида на термообработката. Нарастването на $HV_{H.M.}$ намалява A_V . Влияние върху A_V , но по-слабо оказва съдържанието на дифузионно подвижен водород [H] в наварения метал. То се изразява в намаляване на A_V с израстване на [H]. Този феномен е показател за структурно-водородното състояние на наварения метал, изразено чрез A_V [250,251]

3.2.2. Изследване на многомерните зависимости, измерени чрез коефициентите на Кендал - $W_{(m)}$ [249,250,251].

Конкордационния коефициент на Кендал анализира взаимната свързаност между изследваните величини, посочени в Приложение 16 (продължение), както следва:

3.2.2.1. Технологични свойства на заваръчния процес и заварените съединени. [195,249,250,251].

На базата на извършено детайлно изследване на технологичните свойства на заваръчния процес и заваръчните съединения (МПЗ) се установява, че определящо за технологичните свойства и решаващо влияние върху тях има:

- устойчивостта на горене на дъгата (УГД) k_S - най-силно е свързана със съвместното влияние на $x_3 = CaF_2$ и $x_4 = Fe_{\text{прах}}$ (Нарастване на металната фаза x_4 при намаляване съдържанието на CaF_2 . В план на цялата шихтова система най-значимо увеличаване на УГД - k_S се постига с увеличаване на съдържанието на $CaCO_3$, Fe прах и намаляване на количеството на CaF_2 в ш.с. на покритието.

УГД - k_S - определя съдържанието на С и Мп - нарастването на k_S е свързано с увеличаване на прехода на елементи от покритието в метала на шева. УГД - k_S - определя количеството на макродефекти N и микрошлакови включения D_S . Увеличаването на k_S намалява N и D_S . УГД - k_S - определя C_{eq} и $HV_{H.M.}$ - двата параметъра са взаимно свързани помежду си и са зависими от прехода на елементи от ш.с. на покритието в метала на шева. Този преход е по-значим тогава, когато вариациите на I_S и U_S са минимални, т.е. когато $k_S \rightarrow 1$. Този факт се потвърждава и от следващата зависимост $k_S = W_{(m)}(\alpha_L; HV_{H.M.})$. Значима е зависимост между k_S и α_L , и $[H]$. Нарастването на УГД е съпроводено с нарастване на α_L , но същевременно и с $[H]$ в наварения метал. Това е обяснимо, тъй като в по-голямо количество метал респ. α_L се разтваря по-голямо количество водород.

- количество на макродефектите N - има паралелното взаимодействие между $x_1 = TiO_2$ и $x_3 = CaF_2$ изразено чрез увеличаване на TiO_2 и намаляването на CaF_2 в ш.с. на покритието предизвиква намаляване на количеството на макродефектите N при МПЗ.

Количеството на макродефектите N - се определя от количеството на C и Mn . Увеличаването на количеството на C и Mn в наварения метал е свързано с увеличаване на макродефектите. Количеството на макродефектите N - в технологичен аспект е свързана както с шихтовия състав чрез количеството CaF_2 така и с устойчивостта на горене на дъгата k_S . Увеличаването на количеството на CaF_2 при намаляване на k_S определя значителното нарастване количеството на макродефектите N . Количеството на макродефектите - N - е пряка връзка от производителността на процеса: α_L и α_r коефициентите на стопяване и наваряване. Тройната зависимост: $N = W_{(m)}(\alpha_L; \alpha_r; H)$ дефинира макродефектността като зависима от количеството стопен, насител с водород метал и наварен метал.

- устойчивост на метала срещу кристализационни (горещи) пукнатини P_{Cr} - се определя от две групи двойни независими променливи $x_1; x_5$ - съответна Fe прах и FeMn, и $x_2; x_4$ - $CaCO_3$ и Fe прах.

В първата група променливи нарастването на количеството железен прах и съдържанието на Мп в кристализиращия метал повишават устойчивостта му срещу кристализационни пукнатини P_{Cr} . Повишаване на P_{Cr} се постига и при едновременното (съвместно) повишаване на съдържанието на $CaCO_3$ и Fe прах в ш.с. на покритието на ЕПЗ. Изследването на влиянието на трикомпонентните комплекси от ш.с. на покритието: $x_1; x_2; x_4$ ($TiO_2; CaCO_3; Fe_{\text{прах}}$) и $x_2; x_4; x_5$ ($CaCO_3; Fe_{\text{прах}}; FeMn$) върху P_{Cr} показва, че и двата комплекса съдържат двойната група $x_4; x_5$. Тази група от компоненти в ш.с. представя металната фаза и детерминира P_{Cr} . Нюанса е влиянието на шлаковите и газо-шлаковите образуващи компоненти от ш.с. върху P_{Cr} . По-силно влияние в този аспект оказва $CaCO_3$ - основния газо-шлакообразуващ компонент от шихтов състав.

Устойчивост на метала срещу кристализационни (горещи) пукнатини - P_{Cr} - се влияе значимо от количеството на легиращите елементи в наварения метал главно от Mn; Si. Повторостепенно значение има легиращата система C; Mn. Нарастването на количеството на легиращите елементи в наварения метал предизвиква понижаване на P_{Cr} при МПЗ. Устойчивостта на метала P_{Cr} - намалява значимо с нарастване на количеството на микродефекти D_S и D_P .

- коэффициента на стопяване - α_L - се определя от двойната система CaCO_3 ; CaF_2 и тройната TiO_2 - CaCO_3 - CaF_2 . Нарастването на α_L се получава при едновременното увеличаване на количеството на CaCO_3 и CaF_2 , и намаляването TiO_2 на в ш.с. на покритието.

Коефициента на стопяване α_L - определя количеството на легиращите елементи в наварения метал - C и Si в метала на шева. Коефициента на стопяване α_L - се определят от УГД - k_S ; x_3 или от комплекса $k_S - x_2$. Същевременно α_L определя количеството на неметални включвания в наварения метал D_S и P_{Cr} . Установено е, че съществува косвена взаимовръзка между x_3 ; x_2 ; k_S и D_S и P_{Cr} . Анализът на тази взаимовръзка показва, че съществуват тенденции към нарастване на P_{Cr} с увеличаване на УГД - k_S вследствие намаляване количеството на микродефекти D_S и D_P .

- коэффициента на наваряване α_r - се определя от комплекса x_1 ; x_4 т.е. от киселинността на шлаковата фаза и количеството на метална фаза в покритието на ЕПЗ.

- количеството топлина за стопяване на 1 кг метал q_L - се определя главно от киселинността (респективно основността) на шлаковата фаза представена с комплекса x_1 ; x_2 . Количеството топлина за стопяване на 1 кг метал q_L - оказва значително влияние върху количеството на микродефекти и дифузионно подвижен водород в наварения метал. Намаляването на q_L е свързано с увеличаване на [H] и свързаните с това D_p , и количеството на микрошлакови включвания D_S . Количеството топлина за стопяване на 1 кг метал q_r - се определя от компонентите на ш.с. на покритието на ЕПЗ, които определят и α_r . Особеност е тройния комплекс x_1 ; x_3 ; x_4 - които по косвен начин определя влиянието на УГД - k_S .

Количеството топлина за стопяване на 1 кг метал q_r - определя взаимовръзката между механичните свойства и количеството дифузионно подвижен водород. На лице е тенденция за увеличаване на ударната жилавост A_V и намаляване количеството на дифузионно подвижен водород [H] в наварения метал при увеличаване на q_r .

- количеството на неметални включвания в наварения метал D_S - зависи главно от шлаковата фаза в състав x_1 ; x_2 (TiO_2 ; CaCO_3), нарастването на количеството на D_S се определя от намаленото количество TiO_2 и увеличение на CaCO_3 в покритието на ЕПЗ. Обяснението на този феномен е свързано с морфологията на основните шлаки и големите скорости на кристализация на заваръчната вана, характерни за МПЗ.

Повишената производителност на процеса представена чрез α_L и α_r също благоприятства нарастването на количеството на шлакови включвания. Количеството на микропори в наварения метал D_P - или микропористостта на наварения метал се увеличава с увеличаване на CaF_2 и FeMn в покритието на ЕПЗ.

3.2.2.2. Изследване на механичните свойства на заваръчния процес и заварените съединения (МПЗ) [247,248,249,250,251].

На базата на извършено детайлно изследване на механичните свойства на заваръчния процес и заваръчните съединения (МПЗ) се установява, че определящо за механичните свойства и решаващо влияние върху тях има:

- ударната жилавост на наварения метал A_V - се определя от ш.с. на покритието чрез $\text{CaCO}_3 = x_2$ и $\text{FeMn} = x_5$. Увеличаването на концентрациите им в ш.с. е съпроводено с понижаване на метал A_V на наварения метал при МПЗ. Обяснението на този факт е свързано с образуване по-голямо количество неравновесни структури в наварения метал, провокирано от големите скорости на охлаждане и повишената концентрация на Mn. Ударната жилавост на наварения метал A_V - се влияе главно от химическия състав на наварения метал и главно от съдържанието на C и Mn, чието повишаване намалява A_V .

Най-значимо влияние върху намаляването на A_V оказва повишените значения на C_{eq} и вида на термообработката представена с твърдостта HV_{HM} на наварения метал.

- твърдостта на наварения метал $HV_{H.M.}$ - нараства с нарастването на $x_2 = CaF_2$ и $x_5 = FeMn$ от покритието на ЕПЗ. Твърдостта на наварения метал $HV_{H.M.}$ - се определя главно от съдържанието на С и Мп в наварения метал при равни други външни условия: морфология на работната среда, количеството вложена енергия при МПЗ, топлинен модел на заваряването.

Твърдостта на наварения метал $HV_{H.M.}$ - зависи от комплекса $(x_5; [H])$ и $(x_3; [H])$. Тази зависимост дава косвена представа за структурно-водородното състояние на наварения метал както чрез $HV_{H.M.}$, така и чрез функционалната зависимост:

$$A_V = W_{(m)}(C_{eq}; HV_{H.M.}) \quad (3.5)$$

$$\text{където: } HV_{H.M.} = W_{(m)}(x_5; [H]) \quad (3.6)$$

$$\text{или: } HV_{H.M.} = W_{(m)}(x_3; [H]) \quad (3.7)$$

Тази зависимост позволява прогнозиране на тенденциите, свързани с експлоатационните свойства на заварените съединения, получени при МПЗ.

- количеството на дифузионно-подвижен водород в наварения метал $[H]$ - се определя главно от смесеното въздействие на TiO_2 , CaF_2 ; Fe прах ($x_1; x_3; x_4$). Нарастването на парциалното налягане на метално-шлаковата фаза в заваръчното пространство води до намаляване на парциалното налягане на водорода. Взаимодействието между $[H]$ и CaF_2 в заваръчното пространство намалява парциалното налягане на водорода и в разтопения метал на заваръчната вана.

§3.3. Изследване на резултатите получени при различни типове покрития на ЕПЗ заварявани при различни режими [247,248,249,250,251].

С цел установяване на влиянието на режима на заваряване върху някои свойства на заварените съединения и характера на протичащия процес бяха проведени сравнителни изпитания на трите типа изследвани ш.с. на покрития. Резултатите са посочени в Приложение 7 на изпитание бяха подложени рутилово базичен и два типа рутилово-базични покрития на ЕПЗ, съответно с и без CaF_2 . Заваряването бе извършвано при три нива на силата на тока респ. количеството внесена енергия в процеса.

- устойчивостта на горене на дъгата (УГД): k_s – при заваряване с различните типове покрития с увеличаване на I_s нараства (вж. Приложение 7 – фиг.3.23 и фиг.3.24) и k_s поради нарастването на степента на йонизация респ. термоелектронна емисия (нараства G , с намаляват V_G). Изключение са рутилово-базичните покрития, съдържащи CaF_2 . При тези покрития, увеличаването на I_s води до намаляване V_G , но не променя проводимостта на дъгата G в диапазона от $I_s = 200$ до 240 А и мощност $UI_{SR} = 6,5$ до $8,2$ kW. Причината за това би могла да се обясни със съдържанието на CaF_2 в покритието на ЕПЗ.

- устойчивост на метала срещу кристализационни (горещи) пукнатини: P_{cr} - намалява равномерно с увеличаване на респ. количеството вложена енергия (вж. Приложение 7 – фиг.3.25). Обяснението на това явление може да се свърже с критичните скорости на кристализация и значимото нарастване при тях на точковите и линейни дефекти в метала.

- твърдостта на метала в ЗТВ $HV_{ЗТВ}$ - не зависи от ш.с. на покритието на (вж. Приложение 6). Получените в Приложение 6 и Приложение 7 резултати дават основание да се твърди, че $HV_{ЗТВ}$ зависи от вложеното количество енергия по следният начин: при малки стойности на I_s ($U_R I_s$) твърдостта на ЗТВ е по-висока от тази при $I_s = 200 \div 215$ А (вж. Приложение 7 –фиг. 3.26). След това $HV_{ЗТВ}$ нараства като остава винаги по-голяма от тази при малки стойности на I_s .

- твърдостта на наварения метал $HV_{H.M.}$ – се изменя по същия начин както и от $HV_{ЗТВ}$ (вж. Приложение 7- фиг.3.27). Изключение са рутилово-базичните покрития, съдържащи $CaCO_3$.

§3.4. Изследване на влиянието на хидростатичното налягане върху технологичните свойства на заваръчния процес под вода.

Резултатите от тези вид изпитания са посочени в Приложение 14. Представените резултати са получени при МПЗ в имитационни условия с помощта на барокамерния комплекс [195,250,251]. Представени са най-характерните резултати от изпитания на електроди с рутилово-базичен тип покритие, осигуряващо добра УГД - k_s . Това условие в хода на изпитанията на заваръчния процес в екстремни условия е без участие на оператор. Получените резултати дават основание да се твърди, че:

- устойчивостта на горене на дъгата (УГД) k_s - намалява с увеличаване на налягането съответно на дълбочината (вж. Приложение 14 – фиг.3.28). Своеобразна критична дълбочина са 80 μ m, при която се получават скокообразно нарастване (намаляване) на k_s . Причината за понижаване на УГД с увеличаване на налягането е изменението на константите на равновесие на термодинамичните процеси при заваряване на различни дълбочини.

- характера на изменение на N , микродефектите: D_S , D_P и устойчивостта на наварения метал срещу кристализационните пукнатини P_{cr} е идентичен с този на УГД - k_s (вж. Приложение 14 – фиг. 3.29). Специфична особеност е изследването и установяването на критична дълбочина (налягане) 80 μ m, при която се получават екстремни значения на изследваните величини. Обяснението на този феномен налага специални изследвания на заваръчния процес при повишени налягания.

ЗАБЕЛЕЖКА: Посочените резултати са средностатистически от 5-кратни изпитания на всеки опит от плана на експеримента.

§3.5. Изследване и анализ на резултатите от паралелните изпитания на електроди за МПЗ, проведени от различни фирми и разработени за изследването ЕПЗ.

В таблица 3.1 са посочени резултатите от някои представителни технологични свойства на заваръчния процес, заварените съединения и механичните им свойства на ЕПЗ по "мокрия" способ [195]. В изпитанието участват електроди, произведени от:

G 98 - GRICON 98 на Messer Griesheim GmbH

E6013 - Електроди на фирмата Taylor USA –САЩ/Англия

23-Н (23Н) – Електроди, произведени по задание рецепта и технология на колектив с ръководител автора на изследването

ЕПЗ 3.3 (3.3) – Електроди за МПЗ с рутилов тип обмазка

ЕПЗ 3.12 (3.12)– Електроди за МПЗ с рутилово-базичен тип покритие.

Анализирайки резултатите се установя, че: k_s - УГД е максимална при електроди Е6043 с повишено съдържание на рутил в окислителен тип покритие.

Равностойни по този показател са G 98 и 3.12. Различията са главно в останалите свойства:

- устойчивост на метала срещу кристализационни (горещи) пукнатини P_{cr} - на ЕПЗ с рутилово-базичен тип покрития е по-голяма от тези на ЕПЗ с рутилов тип G 98 – GRICON 98;

- ударната жилавост на наварения метал A_V - на рутилово базичните ЕПЗ 3.12 значително превишава тази на другите типове покрития. Обяснението на тези резултати може да се свърже в съчетаването на свойствата, на двата типа покрития - рутилови и базични.

Таблица 3.1 – Сравнителни данни за ЕПЗ

№	Електр. марка	\bar{U} [v]	\bar{I} [A]	\bar{U}_{SR} [kW]	k_s	P_{cr} %	10HV 3ТВ x0,1Мра	10HV Н.М. x0,1Мра	A_V [J]
1.	G-98	30,40	208,0	6,328	0,808	34,44	343	222	52,1
2.	23-Н	29,60	214,8	6,310	0,521	86,65	339	206	54,5
3.	6013	29,90	208,3	6,230	1,000	84,80	339	196	54,1
4.	3.3	29,90	209,0	6,230	0,475	88,80	343	217	47,3
5.	3.12	28,30	215,6	6,090	0,786	87,90	339	196	71,5

§3.6. Изследване на структурата на заваръчното съединение при ЕПЗ [195,247,248].

От направите детайлни изследвания на ЕПЗ и анализ на структурата на заваръчното съединение беше установено, че при различните ЕПЗ:

1. Основен метал - структурата е финодисперсна ферито перлитна бал 7 - 8 БДС 11174:1982/Изменение 1:1997/, (ГОСТ 5639-82, СТ СЭВ 1959-79) Приложение 17, фиг. 3.1 x 100 (вж. Приложение 17) на ниско въглеродната нисколегирани стомана 09Г2.

2. Наварен метал с електроди с рутилов тип покритие Приложение 17, фиг.3.2÷3.5 [ЕПЗ с 3.1,3.3,3.5,3.7] x 100 - структурата е дендритна с дисперсност, определена от феритната фаза в покритието (вж. Приложение 6). Характерна особеност на структури, получени с този тип покрития, че при съдържание на:

$$C \left(\frac{Fe}{CaCO_3} \right) = 1 \text{ и } D \left(\frac{FeMn}{CaCO_3} \right) = 0,2 \quad (3.8)$$

възникват микропукнатини, фиг. 3.2 x 100 (вж. Приложение 17). На фиг. 3.6 x 500 (вж. Приложение 17) е фиксирана микропукнатина в структура с неравновесен характер, получена в наварения метал при МПЗ с ЕПЗ 3.1 ; 3.9 . Структурите без микропукнатини са получени с ЕПЗ 3.3; 3.5; 3.7, за които:

$$C = 0,5; D = 0,3 \text{ или } C = 1,5; D = 0,1 \quad (3.9)$$

Твърдостта на наварения метал е посочена в Приложение 6.

3. Зона на термично влияние [247,248].

На фиг. 3.7; 3.8 x100 (вж. Приложение 17) е показана структурата характерна за този участък от завареното съединение състояща се от нисковъглероден мартензит и бейнит с 340÷360 HV0,1.

В ЗТВ в заварения съединения с ЕПЗ с повишена концентрация на TiO_2 -

$$A \left(\frac{TiO_2}{CaCO_3} \right) > 1,5 \quad (3.10)$$

се наблюдава тенденция към увеличаване на пукнатинообразуването фиг. 3.9 1x100 (ЕПЗ 3.9) и фиг 3.10 x500 (вж. Приложение 17)

4. Наварен метал се електроди с базичен тип покритие фиг. 3.11; 3.12 X100 се характеризира с фино-дисперсна структура, получена при заваряване с ЕПЗ 3.2; 3.4, които са с максимални значения на $D \left(\frac{FeMn}{CaCO_3} \right)$ [247,248].

Дендритни структури се получават при заваряване с електроди с базичен тип покрития с понижено съдържание на FeMn фиг. 3.13; 3.14 X100 (вж. Приложение 17).

5. Зона на термично влияние - характеризира се с неравновесни структури и подчертано изразени микропукнатини, успоредни на границата на сплавяване фиг. 3.15 X100, фиг. 3.16 X500 (370÷380 HV 0,1) (вж. Приложение 17).

6. Наварен метал с рутилово-базичен тип покритие на ЕПЗ - фиг 3.17; 3.18 x100 (вж. Приложение 17). Структурата е с дендритен характер, подобна на тази получена при заваряване с базичен тип покритие на ЕПЗ със понижено съдържание на FeMn (вж. Приложение 6). Нарастването на концентрацията на FeMn до максимални значения (над 5,5-6%) е свързано с образуване на пукнатини в неравновесната структура на наварения метал фиг.3.10X500 (вж. Приложение 17) [247].

7. Зоната на термично влияния – характеризираща се с типична неравновесна структура фиг. 3.20 X100 (вж. Приложение 17). При шихтови състави с шлакова фаза под 45÷47% или над 57÷60% в ЗТВ се наблюдават микропукнатини, успоредни на границата на сплавяване фиг. 3.21 x100 и фиг.3.22 x500 (вж. Приложение 17) [247].

8. Заключение: Заварените съединения с рутилов и рутилово-базичен тип покрития са с най-малка склонност към образуване на студени пукнатини в навареният метал. Повишеното количество на метална фаза в покритието намалява склонността към пукнатини при спазване на условието [247]:

$$C \left(\frac{Fe_{\text{прах}}}{CaCO_3} \right) = 0,05 \text{ и } D \left(\frac{FeMn}{CaCO_3} \right) = 0,3 \quad (3.11)$$

или

$$C \left(\frac{Fe_{\text{прах}}}{CaCO_3} \right) = 1,5 \text{ и } D \left(\frac{FeMn}{CaCO_3} \right) = 0,1 \quad (3.12)$$

ако съдържанието на FeMn е не повече от 5,5÷6%.

Образуването на микропукнатини в ЗТВ е характерно и за трите типа покрития на ЕПЗ и няма ясно изразена зависимост с шихтовия състав на покритието. Следователно склонността към образуване на микропукнатини в ЗТВ се определя главно от химическия състав на основният метал.

Изводи на глава 3: На базата на извършени изследвания, могат да се направят следните изводи и реализирани приноси:

3.1. Изследвани са значимите зависимости между двойните променливи. Особеност при анализирани на зависимостите между изследваните величини чрез коефициентите на Спирмен е значимостта. Изследвани са устойчивостта на горене на дъгата – k_S , количеството на микродефектите - N , количеството на неметалните включвания в навареният метал - D_S , количеството на микропорите – D_P , устойчивостта на метала срещу кристализационните пукнатини – P_{cr} , количеството топлина за разтопяване на 1 кг метал - q_L , и за наваряване - q_r , коефициентите на стопяване - α_L и на наваряване - α_r , и тяхната зависимост от компонентите на шихтата на покритието на електрода.

3.2. Изследвани са зависимостите между шихтовия състав на покритието на електрода и елементите на химическия състав на навареният метал C%, Mn%, Si%, [H] *ml/100g Me*, шихтовия състав на покритието на електрода и елементите на химическия състав на навареният метал C%, Mn%, Si%, [H] *ml/100g Me*.

3.3. Изследвани са зависимостите между компонентите на шихтовия състав на покритието и механичните свойства на заваръчното съединение.

3.4. Изследвани са многомерните зависимости, измерени чрез коефициентите на Кендал – $W_{(m)}$, между технологичните свойства на заваръчния процес и заварените съединения и техните механични свойства.

3.5. На базата на разработената методика са изследвани различните типове покрития на ЕПЗ при различни режими на заваряване.

3.6. Изследвано е влиянието на дълбочината върху технологичните свойства на заваръчния процес.

3.7. Проведени са паралелни изследвания на електроди производство на различни фирми G98 Германия, E 6013, ЭПС-АН1, ЕПЗ-23Н, ЕПЗ-12С (ЕПЗ 3.3, ЕПЗ 3.12) и е доказано, че разработените българските електроди не отстъпват по качество на вносните електроди.

3.8. Изследвани са структурите на заваръчното съединение на базата на металографските изследвания, в зоната на термично влияние и зоната на шева, който дават възможност да се оценява качеството на заваръчното съединение.

3.9. Установи се, че независимо от условията, в които протича заваръчния процес основните определящи свойства на заварените съединения са :

- технологичната якост;
- механични свойства (устойчивост на метала срещу крехко разрушаване A_V).

3.10. Установени са зависимости между свойствата на заваръчния процес, заварените съединения и шихтовия състав на покритието на електроди за "мокро" подводно заваряване. Тези зависимости определят начина на въздействие върху изследваните свойства - чрез изменение на концентрациите на компонентите в състава на покритието.

3.11. Технологичната якост на заварените съединения P_{cr} изпълнени при МПЗ се определя от съдържанието на $X_2; X_4; X_5$ ($CaCO_3$; Fe прах; FeMn) в покритието на ЕПЗ. Главно значение за повишаване на P_{cr} имат Fe прах и FeMn в концентрации, съответно до 40% (*Fe прах*) и до 9,8% (*FeMn*). Значение за подобряването на P_{cr} има и увеличаването на концентрацията на $CaCO_3$ в покритието на ЕПЗ.

3.12. Съществува косвена зависимост между P_{cr} и УГД - k_s , определена от отрицателното влияние на микродефектите в метала на шева D_s и P_p . Следователно, P_{cr} зависейки от k_s зависи и от концентрацията на X_3 и X_4 , които определят k_s ($x_3 = CaF_2$; $x_4 = Fe$ прах). Едновременното нарастване съдържанието на метална фаза в покритието x_4 (Fe прах) и намаляване на концентрациите на CaF_2 в покритието, увеличават k_s , намаляват се D_s и D_p , а с това нараства технологичната якост на наварения метал, представена чрез устойчивостта му срещу кристализационни пукнатини - P_{cr} . Концентрациите на Fe прах в покритието трябва да има максимални значения до 40% и минимални - не по-малко от 24 – 25%. Концентрациите на CaF_2 в покритието трябва да са минимални. Тези стойности са в граници, определени от условието за минимална концентрация на дифузионно подвижен водород в наварения метал $[H]$. Това условие изисква компромисно решение по отношение на УГД - k_s , която е свързана в обратнопропорционална зависимост с концентрацията на $[H]$ (вж. Приложение 6):

Концентрацията на CaF_2 в покритието трябва да е не повече от 4÷4,5%.

3.13. Механичните свойства се определят от шихтовия състав на покритието от концентрацията на x_2 ($CaCO_3$) и x_5 ($FeMn$). Най-силно влияние на тази зависимост оказва $FeMn$, с чието нарастване, A_V - ударната жилавост намалява. Компромисното решение на обратнопропорционалната зависимост между A_V ; P_{cr} ; $[H]$, определящо структурно-водородното състояние на метала и шихтовия състав на покритието изисква съдържанието на $FeMn$ в покритието да бъде 4 ÷ 6 % .

3.14. Подходящ е рутилово-базичен тип на покритието на ЕПЗ на МПЗ при спазено условие:

$$A = \frac{x_1}{x_2} \left(\frac{TiO_2}{CaCO_3} \right) = 1,25 \div 1,30 \text{ и съдържание на } CaF_2 \text{ в покритието - } 4 \div 4,5\%,$$

3.15. Използвания корелационен анализ за разкриване на зависимостите между изследваните величини позволява определяне на тенденция за подобряване свойствата на заварените съединения, получени при МПЗ. Освен това този анализ позволява с достатъчна достоверност (вж.гл.2) да се определят конкретните мероприятия за регулиране (изменение) на всяко едно от изследваните свойства, чрез разкритите взаимовръзки, посредством шихтовия състав на покритието.

3.16. Направените изследвания, анализи и изводи дават основание за разширяване и развитие в направление на регресионен анализ. Посредством създаване на непараметричен критерий, обединяващ основните зависимости: ш.с.; k_s ; P_{cr} ; A_V е възможно решаването на оптимизационната задача.

ГЛАВА 4. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОЦЕСА РЪЧНОЕЛЕКТРОДЪГОВО ЗАВАРЯВАНЕ ПОД ВОДА НА ОБРАЗЦИ ОТ СТОМАНА 09Г2.

В глава 4 са представени експериментални-статистически и теоретични изследвания на влиянието на шихтата при ръчноелектродъгово заваряване под вода на 35 броя образци от стомана 09Г2 (използвана широко в корабостроенето) в цел изследване на влиянието им върху устойчивостта на процеса и качеството на шева. С помощта на програмата: "Qstatlab 6" се обработват данните от плана и са изчислени регресионните уравнения отразяващи изменението на устойчивостта на процеса и качеството на шевовете на съответните образци във функция на входните фактори.

В тази част от изследването в съответствие с т.2.1 и т.2.1.2 разработена от автора „Методика за експериментално- статистическо изследване на взаимовръзката между компонентите на покритието и технологичните свойства на заваръчното съединение” беше извършено:

§4.1. Експериментално-статистическо изследване на влиянието на шихтата при ръчноелектродъгово заваряване под вода на образци стомани 09Г2, върху устойчивостта на процеса и качеството на шева.

4.1.1. Планиране и провеждане на експеримента [249,250].

Поведението на изследвания процес (обект) устойчивост на дъгата и качество на шева, избрани в Методиката от т. 2.1 за изходен параметър зависи от много променливи величини [249].

Тъй като не може практически да се посочат всички променливи оказващи въздействие на обекта, затова се отделят най-важните входните фактори (независимите променливи). Изследват се взаимовръзките само между компонентите на покритието, който се изменят и контролират по време на експеримента, а останалите се приемат за постоянни или въобще не се контролират. Очаквайки с този избор, че функцията на отклика ще бъде нелинейна за изучаваната област на междуфакторното пространство и се решава да се строи квадратичен модел. В този случай се избира, че е необходимо факторите да се изменят на 3 нива. За по-удобно се работи с така наречените нормирани (безразмерни) фактори. Преминаване от размерен в безразмерен вид на факторите може да стане по формулата [249]:

$$X = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i} \quad (4.1)$$

където: X_{i0} - основно ниво ΔX_i - интервал на вариране

При избора на конкретен план за експериментиране се налага компромис в изискванията за точност на математическото описание на процеса, простота на обработка на експерименталните данни и минимален брой експерименти. Разглежда се план на експеримента за построяване на модел от II ред, който има вида [249]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_i X_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_{ii} X_i^2 \quad (4.2)$$

където: Y - е истинската стойност на отклика;

$\beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$ - истинска стойност на коефициентите;

k - броят на факторите

Броят на членовете на този модел е:

$$C_{k+2}^k = \frac{(k+2)!}{2!} = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (4.3)$$

затова броят на опитите за построяването не трябва да бъде по малко от:

$$N \geq \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (4.4)$$

Освен това е необходимо всеки фактор да се изменя на не по-малко от три нива.

Резултатите от опитите се пресмятат избраните оценки на коефициентите на модела и се съставя регресионното уравнение [249]:

$$Y(X_1, X_2, X_3, X_4) = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_4 * X_4 + b_{12} * X_1 * X_2 + b_{13} * X_1 * X_3 + b_{14} * X_1 * X_4 + b_{23} * X_2 * X_3 + b_{34} * X_3 * X_4 + b_{11} * X_1^2 * X_2 + b_{22} * X_2^2 + b_{33} * X_3^2 + b_{44} * X_4^2; \quad (4.5)$$

Един от критериите за оптималност на плановете може да бъде броят на опитите в тях. В по-голяма част от случаите експериментаторите се стремят броят на опитите да бъде колкото може по-малък. Оказва се, че може да се поставят плановете броят на опитите, който е или равен на броя на коефициентите в модела или малко по-голям.

Един от най-икономичните по броя на опитите плановете са предложени от Хартли Рехтшафнер.

Структурата на информационната матрица и матрицата на грешките за плановете е анализирана подробно. Оказва се, че в информационната матрица може да се появят различно от нула нечетни моменти. В резултат на това такива плановете се оказват несиметрични.

Експериментите са проведени на базата на приетия ОЦКП при избраните фактори и нива на вариране. Избираме план на експеримента - план на Рехтшафнер за четири фактора с тридесет и един опита, и оценяваме влиянието им върху устойчивостта на процеса и качеството на шевове на обработваните метали. Матрицата на избрания план е дадена в Приложение 18.

Ръчноелектродъгово заварени под вода са 35 образца: 31 образца съгласно избрания план и 4 образца за проверка повторяемостта на резултатите [249]. Качеството на образците след подводното заваряване е оценено количествено с бална оценка от (0 до 1) [249].

С помощта на програмата: "Qstatlab 6" се обработват данните от плана и се изчисляват регресионните уравнения отразяващи изменението на устойчивостта на процеса и качеството на шевове на съответните образци във функция на входните фактори (взаимовръзка между компонентите на покритието в проценти) при ръчноелектродъгово заваряване под вода.

4.1.2. Проверка на възпроизводимост на експеримента.

Извършването на тази проверка е в същност проверка на изпълнението на второто предположение на еднородност на дисперсиите. Тази задачата са състои в проверка на хипотезата за равенство на дисперсиите, при експерименти, съответстващи на точките (редовете) от матрицата на планиране [249].

Оценката на дисперсията за всеки ред (по редовата дисперсия), се дава по формулата [249]:

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 \quad (4.6)$$

със степени на свобода $v=m-1$. Тук m е брой опити ($m=4-1$).

За проверката на хипотезата за еднородност на дисперсиите е използван критерия на Кохрен, който се основава на закона на разпределение на отношението на максималната емпирична дисперсия към сумата на всички дисперсии [249]:

$$G_{max} = \frac{\max [S_i^2]}{\sum_{i=1}^N S_i^2} \quad (4.7)$$

от таблица се определя $G_{кр.}(\alpha, v_{1b}, v_{2b})$, където α е ниво на значимост (обикновено е 0,05) и $v_{1b}=m-1=3$, $v_{2b}=N=31$. Ако $G_{max} < G_{кр.}=3,49$, то хипотезата за еднородност на дисперсията се приема.

За дисперсия на единичния опит се приема величината [249]:

$$S^2(y) = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} \quad (4.8)$$

4.1.3. Определяне на коефициентите и тяхната значимост.

Оценките на регресионните коефициенти се пресмятат по формулата [249]:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \hat{f}_{iu} y_u, \quad i = 1, \dots, k \quad (4.9)$$

Замествайки стойностите им в уравнение (4.5) се получава уравнението на регресия във вида [249]:

За A_V :

$$Y(X1, X2, X3, X4) = 53.652632 + 1.525 * X3 + 4.3166667 * X4 + 1.7695175 * X4 * X4 + 2.575 * X1 * X2 - 1.65 * X2 * X4 - 2.925 * X3 * X4 + 1.975 * X1 * X3 + 2.4125 * X1 * X4; \quad (4.10)$$

За HV(ЗТВ) /HV_{ЗТВ}/:

$$Y(X1, X2, X3, X4) = 341,46809 - 1.5 * X1 - 1.9166667 * X2 + 1.0345745 * X2 * X2 + 1,6595745 * X3 * X3 + 2.2845745 * X4 * X4 + 2.25 * X2 * X3 - 2,875 * X3 * X4 - 2.25 * X1 * X3; \quad (4.11)$$

За HV(НМ) /HV_{НМ}/:

$$Y(X1, X2, X3, X4) = 208.85714 + 2.3333333 * X1 - 8.5833333 * X2 - 4.3333333 * X3 - 6.25 * X4 + 5.2857143 * X1 * X1 + 6,2857143 * X2 * X2 + 3,1607143 * X3 * X3 + 0.91071429 * X4 * X4 - 6.125 * X1 * X2 - 1.75 * X2 * X3 + 9.125 * X3 * X4 - 4.75 * X1 * X4 + 3.875 * X2 * X4 + 0.125 * X1 * X3; \quad (4.12)$$

За k_S :

$$Y(X1, X2, X3, X4) = 0.29785714 + 0.00808333 * X1 + 0.13866667 * X2 - 0.02166667 * X3 + 0.01633333 * X4 + 0.01182738 * X1 * X1 + 0.05807738 * X2 * X2 + 0.11807738 * X3 * X3$$

$$+0.02157738*X4*X4 + 0.087875*X1*X2 - 0.09275*X2*X3 - 0.0145*X3*X4 - 0.029875*X1*X3 + 0.026625*X1*X4 - 0.06975*X2*X4; \quad (4.13)$$

За P_{cr} :

$$Y(X1, X2, X3, X4) = 88.114286 + 0.39583333*X1 + 0.35416667*X2 - 1.0875*X3 + 0.5625*X4 - 0.26502976*X1*X1 + 0.02247024*X2*X2 - 0.96502976*X3*X3 + 0.0447024*X4*X4 - 1.19375*X1*X2 + 0.53125*X2*X3 + 0.31875*X3*X4 + 0.48125*X1*X3 + 0.19375*X1*X4 - 0.53125*X2*X4; \quad (4.14)$$

За да проверим хипотезата за значимост на коефициентите на модела е необходимо да определим дисперсията на оценките им [249]:

$$S_{bi}^2 = \frac{S^2(y)}{N.m} \quad (4.15)$$

където S_{bi}^2 е оценка на дисперсията на случайната грешка и се определя след провеждане на p допълнителни опита.

Величината t_l има разпределение на Стюдънт. По таблици се определя $t_{кр.}(\alpha, v_\epsilon) = 2,021$, където α е ниво на значимост (обикновено е 0,05) и $v_\epsilon = N(m-1) = 93$. Ако $t_l > t_{кр.}$, то нулевата хипотезата се отхвърля и коефициента b_i се признава за значим, т.е. $b_i \neq 0$.

$$\Delta b_i = \frac{b_i}{S(b_i)} \quad (4.16)$$

4.1.4. Проверка на адекватност на модела.

За да се провери хипотезата за адекватно представяне на резултатите от експеримента с намереното регресионно уравнение е достатъчно да се оцени отклонението на предсказаната по модела функция от резултатите от експеримента в същите точки на фактурното пространство [249].

Пресмята се остатъчната сума [249]:

$$Q_{ост} = \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.17)$$

където \hat{y}_i са стойности на отклика, предсказани от модела. Определят се степените на свобода на остатъчната сума: $v_{ост} = N - k$ (k -коефициент на значимост на модела, а N - брой на експерименталните стойности).

Пресмята се дисперсията на адекватност:

$$S_{ост}^2 = \frac{Q_{ост}}{v_{ост}} \quad (4.18)$$

Адекватността на математичния модел проверяваме по критерия на Фишер (F - критерий) чрез сравняване на изчислената F с табличната му стойност $F_{кр}$:

$$F = \frac{S_{ост}^2}{S_y^2} \quad (4.19)$$

От таблиците с разпределение на Фишер се определя $F_{кр}(\alpha, v_{ост}, v_2)$

Броят на степените на свобода на F в случая е $v_1 = N - k = 17$, $v_2 = N(k - 1) = 13$ при ниво на значимост $\alpha = 0,05$ и $F_{кр} = 3,07$. Тъй като $F < F_{кр}$ - моделът е адекватен и може да се използва за предсказване [249].

4.1.4. Оптимизиране параметрите на регресионния модел.

Използва се компютърна програма за оптимизиране параметрите на регресионния модел [250], която реализира метода на въртящите координати (метод на Розенброк) за итерационно търсене на оптимум на произволна аналитично зададена функция F (целева функция на няколко променливи). Основният алгоритъм е построен за минимизиране на F , но при необходимост от максимизиране се налага обръщане знака на целевата функция чрез специална трансформация на променливите, което прави възможно решаването на задачата за оптимизиране при отчитане на ограничения от вида [250]:

$$a_i < x_j < b_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.20)$$

Въвеждат се нови променливи чрез трансформацията

$$X_i = a_i + (b_i - a_i) \sin^2 Z_i \quad (4.21)$$

Тези променливи по-нататък се интерпретират като неограничени.

Методът на Розенброк е един от най-ефективните и универсални начини за оптимизиране без изчисляване на производни на целевата функция [250].

Чрез компютърна програма за оптимизиране параметрите на модела отразяваме изменението на устойчивостта на процеса и качеството на шева във факторното пространство, ограничено от звездните точки на кодираните променливи с граници (-2; +2). В натурални измерители границите на факторното пространство изглеждат така [250]:

$$\begin{aligned} X_1 &= TiO_2/CaCO_2 = (0,5; 1,5), \% \\ X_2 &= CaF_2/CaCO_3 = (0,15; 0,45), \% \\ X_3 &= Fe/CaCO_3 = (0,5; 1,5), \% \\ X_4 &= FeMn/CaCO_3 = (0,1; 0,3), \% \end{aligned} \quad (4.22)$$

В оптималната точка се получава за ударната жилавост след подводно заваряване $A_v = 75,967$ и тя има следните кодирани и натурални координати (за A_v):

$$\begin{aligned} - TiO_2/CaCO_2 - & x_1 = 1,5959 (A = 1,1794 \%); \\ - CaFe/CaCO_3 - & x_2 = 0,5116 (B = 0,1984 \%); \\ - Fe/CaCO_3 - & x_3 = 0,0141 (C = 1,0469 \%); \\ - FeMn/CaCO_3 - & x_4 = 1,8945 (B = 0,1956 \%). \end{aligned} \quad (4.23)$$

В оптималната точка се получава максимална твърдост (HV) след подводно заваряване в $HV_{ЗТВ} = 334,1192$ и тя има следните кодирани и натурални координати (за ЗТВ):

$$\begin{aligned} - TiO_2/CaCO_2 - & x_1 = 1,9229 (A = 0,6045 \%); \\ - CaFe/CaCO_3 - & x_2 = -1,0847 (B = 0,2293 \%); \\ - Fe/CaCO_3 - & x_3 = 1,3612 (C = 0,9988 \%); \\ - FeMn/CaCO_3 - & x_4 = 0,7055 (D = 0,1997 \%). \end{aligned} \quad (4.24)$$

В оптималната точка се получава максимална твърдост (HV) след подводно заваряване в $HV_{НМ} = 193,1191$ и тя има следните кодирани и натурални координати (за НМ):

$$\begin{aligned} - TiO_2/CaCO_2 - & x_1 = -0,6060 (A = 1,0143 \%); \\ - CaFe/CaCO_3 - & x_2 = 0,5714 (B = 0,296 \%); \\ - Fe/CaCO_3 - & x_3 = 1,5571 (C = 1,014 \%); \\ - FeMn/CaCO_3 - & x_4 = -1,6870 (D = 0,2027 \%). \end{aligned} \quad (4.25)$$

В оптималната точка се получава устойчивост на дъгата при подводно заваряване $k_s = 0,967$ и тя има следните кодирани и натурални координати (за k_s):

$$\begin{aligned} - TiO_2/CaCO_2 - & x_1 = 2 (A = 0,9859 \%); \\ - CaFe/CaCO_3 - & x_2 = 2 (B = 0,3455 \%); \\ - Fe/CaCO_3 - & x_3 = 2 (C = 1,0 \%); \\ - FeMn/CaCO_3 - & x_4 = -2 (D = 0,2 \%). \end{aligned} \quad (4.26)$$

В оптималната точка се получава устойчивостта срещу кристализационни пукнатини след подводно заваряване $P_{cr} = 96,2956$ и тя има следните кодирани и натурални координати (за P_{cr}):

$$\begin{aligned} - TiO_2/CaCO_2 - & x_1 = 2 (A = 1,1856 \%); \\ - CaFe/CaCO_3 - & x_2 = -2 (B = 0,1312 \%); \\ - Fe/CaCO_3 - & x_3 = 0,28475 (C = 0,9996 \%); \\ - FeMn/CaCO_3 - & x_4 = 2 (D = 0,2 \%). \end{aligned} \quad (4.27)$$

*A, B, C, D – са в относителни стойности.

По значимост факторите се подреждат така [250]:

а) Устойчивостта на горене на дъгата - k_s има най-значима връзка с CaF_2 с намаляването, на който се повишава УГД. Значимостта на зависимостта между k_s и $Fe(nрах)$ е слаба с тенденция за обратна пропорционалност на ранговете им. Увеличаването на металната фаза в покритието повишава УГД. УГД се увеличава с нарастване на съдържанието на $CaCO_3$, Fe и намаляване на CaF_2 . Прехода на С и Мп от покритието нараства с повишаване на k_s . УГД нараства с увеличаване на тока на заваряване за

различните видове покрития с изключение на рутило-базичните (наличие на CaF_2). УГД намалява с увеличаване на налягането.

б) Устойчивостта на метала срещу корозионни пукнатини - P_{cr} нараства с увеличаване на количеството на $Fe(прах)$ в покритието. Аналогично е и влиянието на $FeMn$. Нарастването на P_{cr} е пропорционално на нарастването на количеството на CaCO_3 в състава на покритието. Устойчивостта на метала P_{cr} показва тенденция на обратно пропорционална зависимост с ударната жилавост A_v . Устойчивостта на метала срещу кристализационни пукнатини се определя чрез две групи от двойки променливи ($Fe(прах)$ и $FeMn$) и (CaCO_3 и $Fe(прах)$).

В първата група нарастването на количеството на $Fe(прах)$ и съдържанието на Mn в кристализация метал повишава P_{cr} . Повишаване на P_{cr} се постига и при едновременно повишаване на съдържанието на CaCO_3 и $Fe(прах)$ в покритието. Нарастването на легиращите елементи в наварения метал главно Mn и Si и по-слабо C и Mn като легираща група понижава P_{cr} при МПЗ.

в) Твърдостта на наварения метал HV_{HM} нараства с повишаване на съдържанието на $FeMn$ в покритието. Влияние в значим статистически аспект оказва CaF_2 от покритието. Въздействие на CaFe и $FeMn$ е двойно се изразява с това, че HV_{HM} нараства с увеличаването на съдържанието им. Твърдостта на наварения метал също зависи главно от концентрацията на C и Mn . Тази твърдост също зависи от комплексите $FeMn - [H]$ и $\text{CaF}_2 - [H]$.

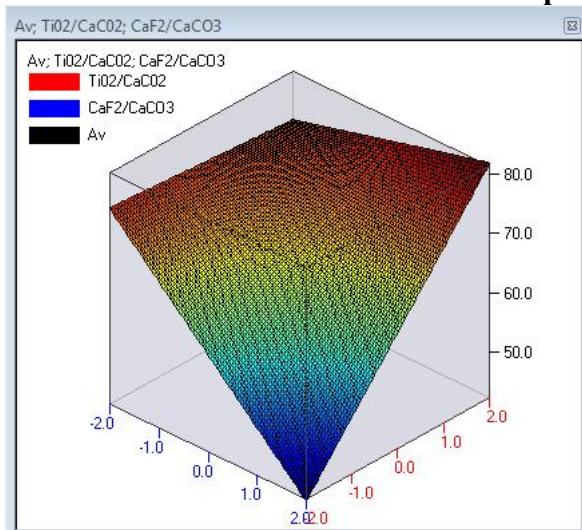
г) Твърдостта на метала в ЗТВ: $HV_{ЗТВ}$ не зависи от шихтовия състав на покритието, но зависи от условията на заваряване и количеството на вложената енергия.

д) Самата Устойчивостта на метала срещу крехко разрушение A_v намалява с увеличаването на $[H]$, но по-слабо. Увеличаването на C и Mn в наварения метал води до намаляване на A_v . Увеличаване на концентрацията на CaCO_3 и $FeMn$ в покритието е съпроводено с понижаване на A_v на наварения метал.

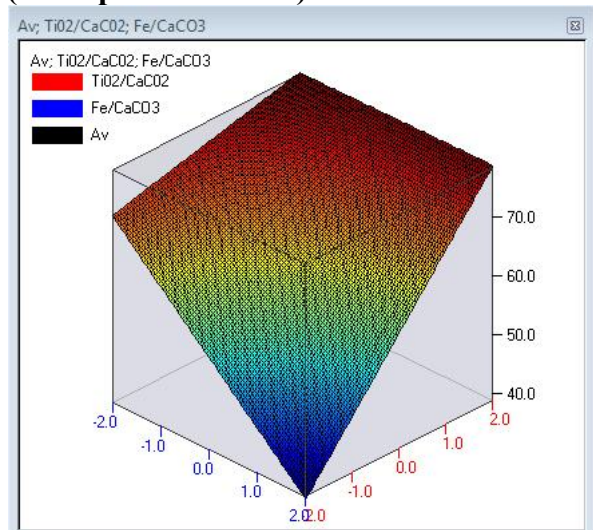
4.1.6. Графичен анализ на регресионния модел за A_v , $HV_{ЗТВ}$, HV_{HM} , k_S и P_{cr} в областта на оптимума. Резултати от машинната обработка на регресионните уравнения.

Представени диаграми с изолинии, които отразяват изменението устойчивостта на дъгата и качеството на шева (Y) във функция на изменението на компонентите на покритието: за TiO_2/CaCO_2 (x_1); за $\text{CaFe}/\text{CaCO}_3$ (x_2); за Fe/CaCO_3 (x_3); за $FeMn/\text{CaCO}_3$ (x_4), където: x_1 , x_2 , x_3 и x_4 - са безразмерни променливи [248,250].

Фиг.4.1-4.4.(а÷б) Зависимости между A_v , $HV_{ЗТВ}$, HV_{HM} и k_S при подводно заваряване и изменението на компонентите на покритието (вж. Приложение 19)

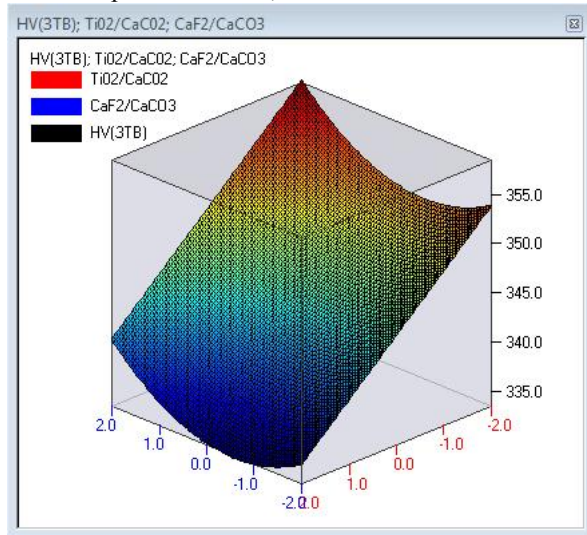


Фиг.4.1. а) $A_v = (X_1, X_2)$



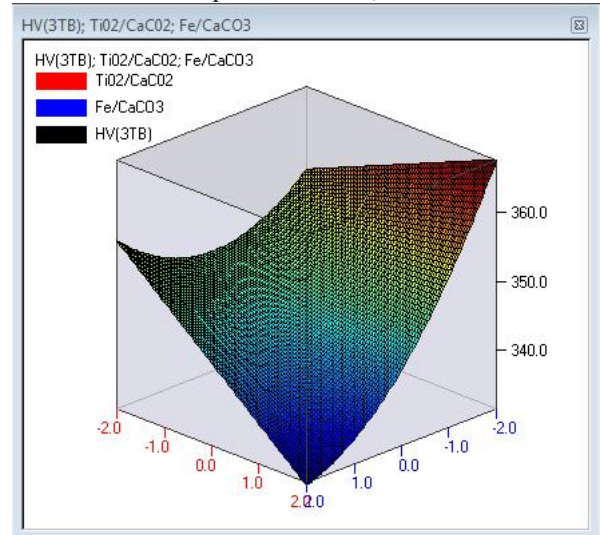
Фиг.4.1.б) $A_v = (X_1, X_3)$

при $X_3=+0.014; X_4=+1.895$

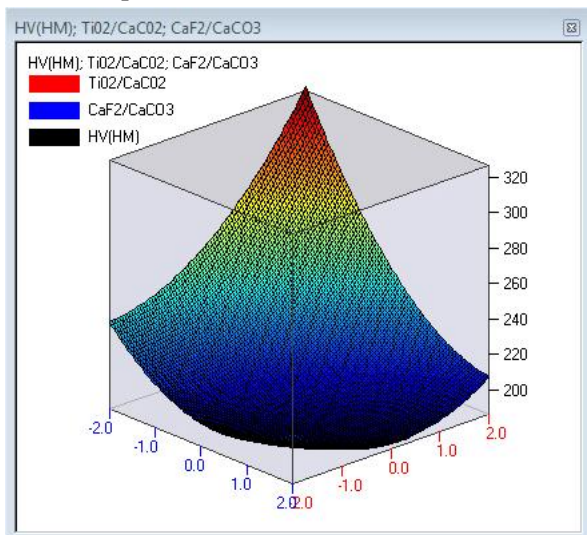


Фиг.4.2. а) ЗТВ = (X_1, X_2)
при $X_3=+1.36; X_4=+0.706$

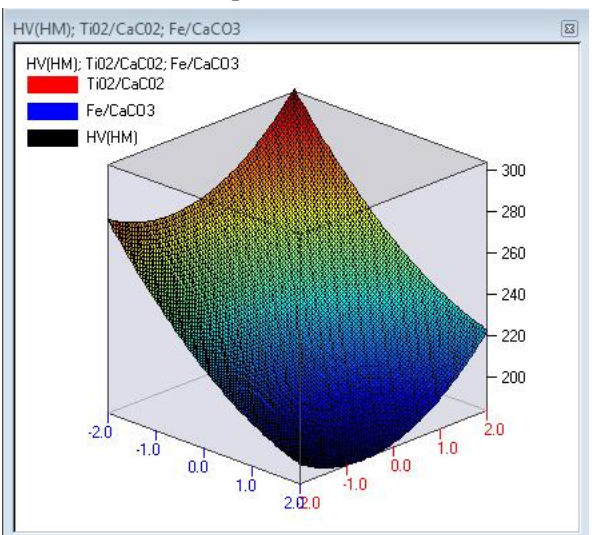
при $X_2=+0.512; X_4=+1.895$



Фиг.4.2.б) ЗТВ = (X_1, X_3)
при $X_2=-1.084; X_4=+0.706$

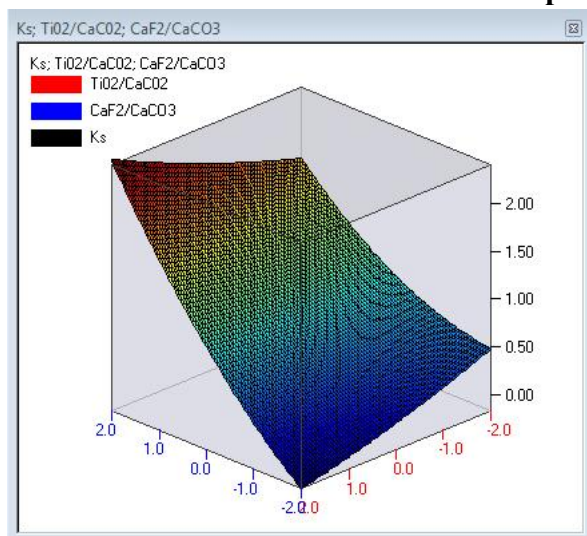


Фиг.4.3. а) НМ = (X_1, X_2)
при $X_3=+1.557; X_4=-1.687$

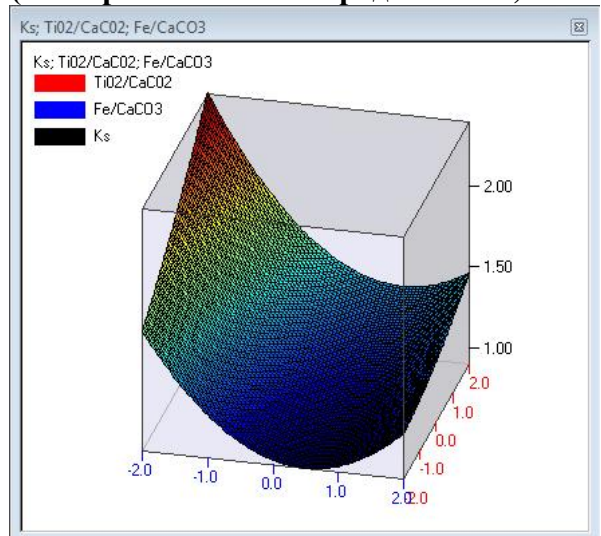


Фиг.4.3.б) НМ = (X_1, X_3)
при $X_2=+9.57; X_4=-1.687$

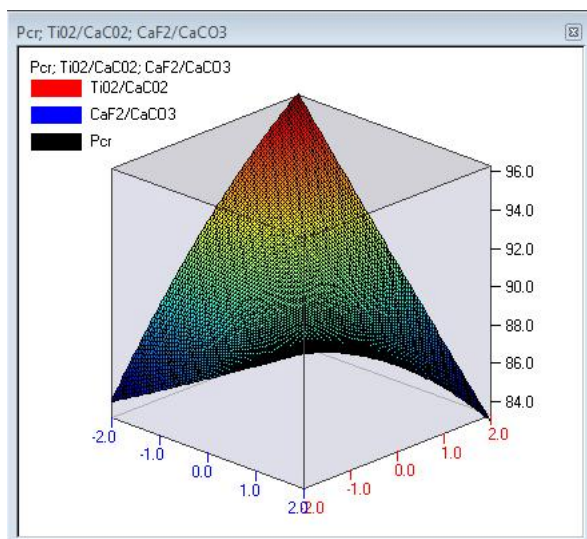
Фиг.4.4.÷4.5.(а÷б)/продължение/ Зависимости между k_s и P_{cr} при подводно заваряване и изменението на компонентите на покритието (вж. Приложение 19 -продължение)



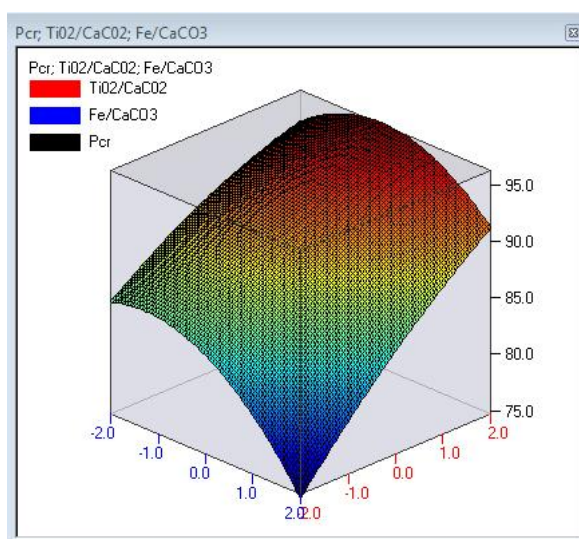
Фиг.4.4. а) $K_s = (X_1, X_2)$
при $X_3=-2; X_4=-2$



Фиг.4.4.б) $K_s = (X_1, X_3)$
при $X_2=+2; X_4=-2$



Фиг.4.5. а) $P_{cr} = (X_1, X_2)$
при $X_3 = -0.285; X_4 = +2$



Фиг.4.5.б) $P_{cr} = (X_1, X_3)$
при $X_2 = -2; X_4 = +2$

Обработката на статистическите данни е направена, чрез програмен продукт "Qstatlab 6" позволява построяването на изолинии, показващи изменението на изходните параметри на образци от стомана 09Г2 при подводно заваряване [250]. От фиг.4.1 до фиг.4.5 (вж. Приложение 19) са показани същите диаграми, в които x_1, x_2, x_3 и x_4 са представени като размерни променливи, т.е. с действителните им стойности, за изследваните параметри.

Анализът на графичните зависимости потвърждава изводите, направени по-горе, по отношение на аранжирането и значимостта на четирите фактора и влиянието им върху изходните параметри (Y), въпреки че някои от координатите на точката на оптимума са далеч извън границите на факторното пространство. Ясно се вижда влиянието на факторите върху устойчивостта на дъгата и качеството на шева след ръчноекродъгово подводно заваряване и тенденцията на възможностите за тяхното увеличение.

4.1.7. Влияние на параметрите на състава на шихтата на електродите върху качеството на шева чрез металографски анализ на заваръчните съединения при МПЗ.

Формирането на структурата на метала в ЗТВ и в зоната на стопяване има ясно изразен не равновесен характер с висока дисперсност фиг. 4.6 и фиг. 4.7 [247,248,250].



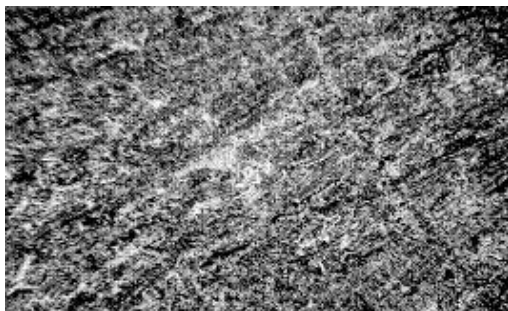
Фиг.4.6.а. Заваръчен шев

Металът на зав.шева, получен с покритие от рутилов тип № 1, 3, 5 и 7 се характеризира с това, че при съдържание $\frac{Fe(нр\alpha)}{CaCO_3} = 1$ и $\frac{FeMn}{CaCO_3} = 1$ възникват микропукнатини в структура с неравновесен характер, получена в наварения метал с електрод №1.

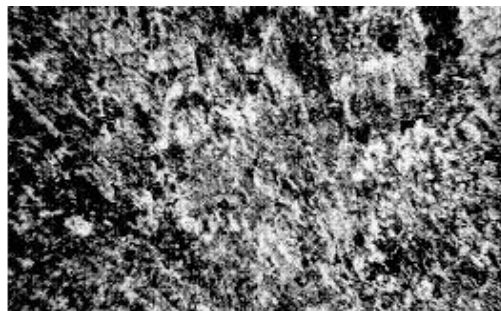
Структури без микропукнатини са получени с ЕПЗ N:3, 5 и 7. Процесът на кристализация в зоната на стопяване протича с образуване на удължена по посока на топлоотвеждането зърнеста структура. При по големи увеличения тя може да се характеризира като периста мартензито- подобна или троостито- подобна бейнитна (фиг.4.8, фиг.4.9, фиг.4.10, фиг.4.11.), което се потвърждава от стойностите на микротвърдостта $290 \div 330HV$ в тази зона.

В някои случаи фиг.4.10 се наблюдават структури с отделяне на ферит с видманщетенора ориентация по границите на самите зърна, затварящ по тъмни участъци от бейнитни и др. дисперсни неравновесии структури.

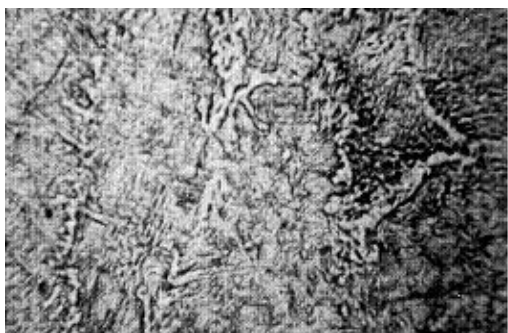
Фиг.4.6.- 4.11. Металографски анализ на заваръчните съединения при МПЗ [247,250]:



Фиг.4.6x100



Фиг.4.7x100



Фиг.4.8x100



Фиг.4.9x100



Фиг.4.10x100



Фиг.4.11x100

На границата на сплавяване се формират благоприятни условия за образуване на неравновесни структури. И при права полярност заваряване (фиг.4.12 и фиг.4.13) границата между основния и наварения метал е рязко изразена като структурата и е груб едър бейнит (HV=290-330). При заваряване в прясна вода на обратна полярност (фиг.4.14 и фиг.4.15), се констатира сравнително плавен преход между основния и наварения метал, като структурата бейнит+иглист ферит (HV=290-320) епо-фина в сравнение със заваряване (права полярност) [250].

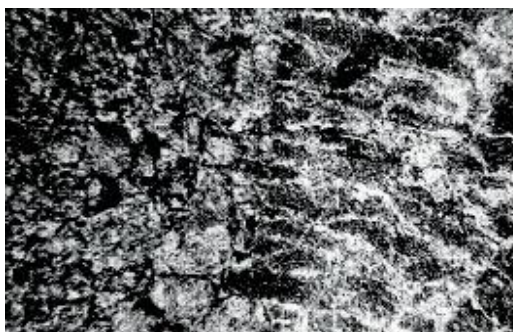
Фиг.4.12.- 4.15. Металографски анализ на заваръчните съединения при МПЗ [247,250]:



Фиг.4.12x100



Фиг.4.13x100



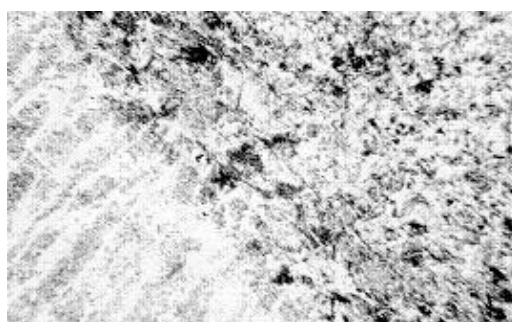
Фиг.4.14x100



Фиг.4.15x1000

При заваряване в морска вода на обратна полярност преходът между наварения и основния метал е плавен сравнително (фиг.4.16 и фиг.4.17), като структурата е напълно аналогична с тази при заваряване в прясна вода на обратна полярност [247,250].

Фиг.4.16.- 4.17. Металографски анализ на заваръчните съединения при МПЗ [247,250]:



Фиг.4.16x100



Фиг.4.17x1000

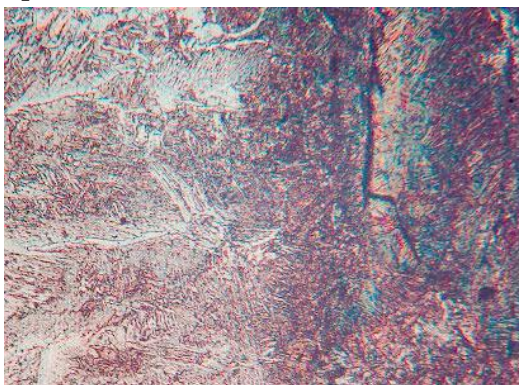
Характерно за тези ЕПЗ е, че ЗТВ независимо от полярността е сравнително постоянна по ширина, а самата микротвърдост се променя в границите HV=330-346, като ширината е в границите на от 2,0 до 2,5 mm.

При концентрация $\frac{TiO_2}{CaCO_3} \geq 1,5$ се наблюдава тенденция към увеличаване на пукнатинообразуването [250].

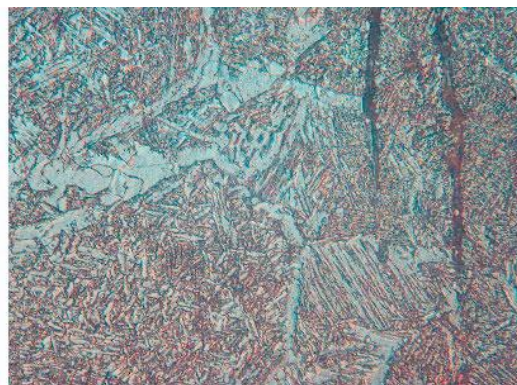
Металът на шева, получен с електроди с базичен тип покритие (електрод №2 и 4) с максимално съдържание на (FeMn/CaCO₃), се характеризира с фино-дисперсна структура. Повишаването на съдържанието на FeMn в покритието води към получаване на дендритни структури. В зоната на термично влияние се характеризира с неравновесни структури и микропукнатини, успоредни на границата на сплавяване (HV=370-380) фиг. 4.18.

Металът на шева, получен с ЕПЗ с покритие рутило-базичен тип, е със структура с дендритен характер. Нарастването на FeMn до максимални стойности води до образуване на пукнатини в наварения метал. ЗТВ се характеризира с типично неравновесна структура и наличие на пукнатини успоредни на границата на сплавяване фиг.4.19.

Фиг.4.18.- 4.19. Металографски анализ на заваръчните съединения при МПЗ [247, 248,250]:



Фиг.4.18x500



Фиг.4.19x500

Склонността на ЗТВ към образуване на пукнатини няма ясно изразена зависимост от типа на покритието.

На базата на направеното изследване бяха разработени и изработени електроди условно обозначени ЕПЗ-12С, чиито състав не е възможно да бъде даден по определени съображения. Изпитанията на електродите проведени в лабораторни и натурни условия показват, че те удовлетворяват всички изисквания за заваряване в подводни условия.

В табл.4.2 са дадени сравнителните резултати от изследването на различни марки електроди производство на Германия - 098, на фирма Тейлор - САЩ (Англия) - Е 6013 и електрод на ИЭС им. Е.О.Патона ЭПС-АН1.

Както се вижда от сравнителните данни, ЕПЗ-12С има най-добри характеристики.

Табл.4.2. Технически характеристики [247,250]

N:	марка на електрода	UI [kW]	K_s	P_{cr} %	$HV_{змс}$	$HV_{нм}$	A_v [J]
1	G 98	6,328	0,808	84,44	343	222	52,1
2	E 6013	6,310	1,00	84,80	339	196	54,1
4	ЭПС-АН1	6,275	0,850	85,05	325	216	57,1
5	ЕПЗ-23Н	6,280	0,853	85,30	328	217	57,3
6	ЕПЗ-12С	6,290	0,786	87,90	330	208	71,5

4.2. Изводи: На базата на извършени изследвания, могат да се направят следните изводи и приноси:

4.1. Експериментално-статистически е изследвано влиянието на шихтата на електродите при ръчно електродъгово заваряване под вода върху устойчивостта и качеството на заваръчната дъга, в резултат на което са получени регресионните уравнения.

4.2. Оптимизирани са параметрите на регресионния модел като се използват програма за оптимизация, която реализира метода на въртящите се координати (Метод на Розенброк) за итерационно търсене на оптимума на произволна аналитично зададена функция F и са получени стойности на компонентите в оптимални точки.

4.3. Изследвано е влиянието на параметрите на състава на шихтата на електродите върху качеството на шева с помощта на металографски анализ на заваръчните съединения при МПЗ.

4.4. Изследвано е влиянието на компонентите на покритието върху механичните характеристики и структурата на заваръчното съединение и технологическите свойства на дъгата при заваряване под вода с електроди.

4.5. Анализът на получените резултати показва, че основния фактор, влияещ на структурата на заваръчното съединение получено под вода е топлоотдаването в околната среда.

4.6. Съставът на покритието съществено влияе на механичните свойства на заваръчното съединение и технологичните характеристики на дъгата при заваряване под вода.

4.7. На базата на направеното изследване са разработени електроди за подводно заваряване, чиито параметри не отстъпват на известните марки електроди за заваряване под вода.

ГЛАВА 5. ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА ТЕМПЕРАТУРАТА ВЪРХУ СВОЙСТВАТА НА ЗАВАРЪЧНОТО СЪЕДИНЕНИЕ ПРИ ЕПЗ НА МЕТАЛИ.

В глава 5 са представени експериментални-статистически изследвания на влиянието на температурата върху свойствата на заваръчното съединение при ЕПЗ на метали. Разработен е математически модел на топлинното поле за разпределение на температурата в заваръчния детайл и чрез разработена програма са изчислени параметрите (температурното поле). Експериментално са получени данни за структурата, механичните свойства и е построена

термокинетичната диаграма на разпадане на аустенита за условията на подводно заваряване. На базата на пресмятане на температурата, термичните цикли и скоростта на охлаждане можем да получим структурата и механичните свойства за която и да е точка на термично влияние.

Извършено е изследване на температурата, термическия цикъл и скоростта на охлаждане при подводно заваряване, изследвано е влиянието на температурата върху свойствата на заваръчното съединение при ЕПЗ на метали и въпроса за влиянието на хидростатичното налягане (дълбочината) чрез експериментално изследване на 16 броя ЕПЗ (електрода) при МПЗ. Разработен е нов метод и приспособления за подводно електродъгово заваряване на металите, който намира приложение в заваръчното производство, корабоплаването, ремонта на кораби, морското строителство и при заваряване на подводни съоръжения или отстраняване на аварии.

§5.1. Изследване на влиянието на температурата върху свойствата на заваръчното съединение при ЕПЗ на металите.

5.1.1. Разработване на модел на топлинното поле на разпределение на температурата в заварявания детайл .

Интерес в практиката на заваръчното производство представлява определяне на температурните в зоната на заваръчната вана т.н. на разстояния съизмерими с размерите на източника на топлина. В по-голямата част от скучайте при определяне на температурата в напречното сечение, което в последствие се преразпределя в съответствие на закона на Фурие. Такава схема на решение на температурната задача удовлетворява изследователя за случаите когато не се интересува от разпределение на температурите в заваръчната вана.

В случаите когато трябва да определяме механичните качества на шева и химическите реакции в заваръчната вана такава схема е непригодна. В тези случай трябва да използваме схемата на обмен на топлинната енергия между източника на топлина и метала, което предмет на настоящата работа (Глава 5). Разработен е математически модел на дъгата, който дава възможност да се определят температурите в която и да е точка на пространството, чрез решение задачата за топлообмен между дъгата и метала (заварявания детайл).

Температурното поле в тялото се описва с диференциалното уравнение [246]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - Q \right) = 0 \quad (5.1)$$

Граничните условия (вж.табл. 5.1.) [245, 246]:

- от I род за неизвестната функция T :

$$T = T_\beta \quad (5.2)$$

- от II род за топлинният поток:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z + q = 0 \quad (5.3)$$

- от III род за конвективния и радиационен топлообмен:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z = -\alpha (T - T_a) \quad (5.4)$$

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z = -\alpha_r (T - T_a)^4 \quad (5.4a)$$

- от IV род:

$$-\lambda_1 (T) \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n_1} = -\lambda_2 (T) \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n_2} \quad (5.5)$$

Уравнение (5.1) при изпълнение на граничните и начални условия определя еднозначно задачата. Крайното решение е възможно да се получи чрез вариационната формулировка на задачата. Уравнение (5.1) е еквивалентно на изискването за минимизиране на функционала [246]:

$$\chi = \int_V \left\{ \frac{1}{2} \left[k_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + k_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] - \left(Q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \right) T \right\} dV + \int_S \left(qT + \frac{1}{2} \alpha_r T^2 \right) dS \quad (5.6)$$

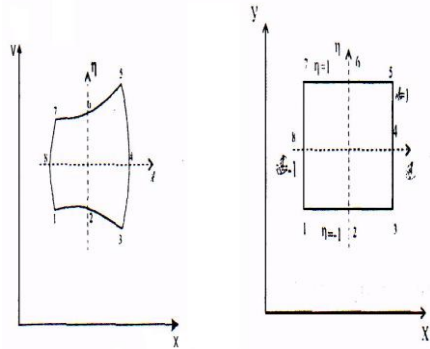
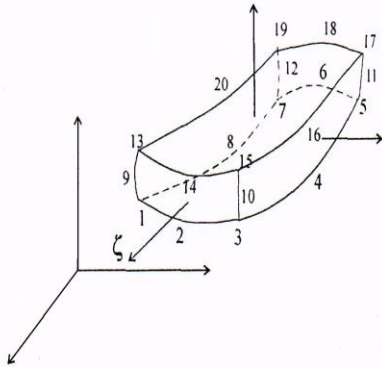
Температурната задача се решава с изопараметрични елементи от Серендипово семейство от втори ред. При изопараметричните елементи се интерполират не само търсените функции, но и координатите. В случая се използват локалните координати ξ , η и ζ с изменение в интервала (-1, 1). Със смяната на променливите се променя вида на системата диференциални уравнения. В матричен запис има вида [246]:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (5.13)$$

5.1.1.1. Характеристики на двумерната и тримерна задача (модел) при МПЗ.

В цел зависимост от решаваната задача се използва двумерен или тримерен модел и при гранични допускания табл.5.1. [245,246].

Табл. 5.1 - Характеристики и гранични допускания при решаване на двумерната и тримерната задача

Характеристика	Двумерна задача	Тримерна задача
Вид на модела и координатна система	 <p>фиг.5.1 - Осем възлов изопараметричен елемент</p>	 <p>фиг.5.2 - Двадесет възлов изопараметричен елемент</p>

<p>Система уравнения</p>	$ \begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(-\xi-\eta-1), \\ N_2 &= \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1-\eta), \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(\xi-\eta-1), \\ N_4 &= \frac{1}{2}(1+\xi)(1-\eta^2), \\ N_5 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1), \\ N_6 &= \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta), \\ N_7 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(-\xi+\eta-1), \\ N_8 &= \frac{1}{2}(1-\xi)(1-\eta^2) \end{aligned} $ <p style="text-align: right;">(5.18)</p>	$ \begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)(-\xi-\eta-\zeta-2), \\ N_2 &= \frac{1}{4}(1-\xi^2)(1-\eta)(1-\zeta), \\ N_3 &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta)(\xi-\eta-\zeta-2), \\ N_4 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta^2)(1-\zeta), \\ N_5 &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta)(\xi+\eta-\zeta-2), \\ N_6 &= \frac{1}{4}(1-\xi^2)(1+\eta)(1-\zeta), \\ N_7 &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta)(-\xi+\eta-\zeta-2), \\ N_8 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta^2)(1-\zeta), \\ N_9 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta^2), \\ N_{10} &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta^2), \\ N_{11} &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta^2), \\ N_{12} &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta^2), \\ N_{13} &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta)(-\xi-\eta+\zeta-2), \\ N_{14} &= \frac{1}{4}(1-\xi^2)(1-\eta)(1+\zeta), \\ N_{15} &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta)(\xi-\eta+\zeta-2), \\ N_{16} &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta^2)(1+\zeta), \\ N_{17} &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1+\zeta)(\xi+\eta+\zeta-2), \\ N_{18} &= \frac{1}{4}(1-\xi^2)(1+\eta)(1+\zeta), \\ N_{19} &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta)(-\xi+\eta+\zeta-2), \\ N_{20} &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta^2)(1+\zeta) \end{aligned} $ <p style="text-align: right;">(5.19)</p>
<p>Гранични допускания при решаване на задачата по определяне температурното поле: - заваръчен шев (1),(2):</p> <p>шев и околния материал (3), (4):</p>	<p>1) Отчита се подаването на топлина в шева, зависимостите на стойностите на коефициентите на топлопроводност и специфичен топлинен капацитет. Тъй като това прави задачата нелинейна, то стойностите във всеки момент се определят в зависимост от значенията на температурата в края на предходният времеви интервал за интегриране на диференциалните уравнения [246];</p> <p>2) В програмата се предвижда въвеждането стойностите на всички коефициенти в равномерна мрежа от стойности на T определена от ползвателя, а също в различни точки на прекъсване [246];</p> <p>3) Приемаме, че шева се заварява мигновено (с много голяма скорост). На базата на известното количество (предварително) въведена в шева топлина, неговият обем, специфичен топлинен капацитет и специфична маса се определя средната температура в шева, като техните начални стойности до тези</p>	<p>1) Приема се, че елементите които формират шева в началният момент при заваряване са без материал;</p> <p>2) За зоната на дъгата при процеса на заваряване и формирането на елементите на шева се приема, че то става постъпково. Въвеждат се временни гранични елементи (двумерен изопараметричен), който отчитат взаимодействието между дъгата като източник на топлина и материала на шева на елементи [246].</p>

	<p>във всеки момент в процеса на изстиване на шева;</p> <p>4) В цел числено решение на топлинната задача при конвенционалния теплообмен между шева и околният материал се въвежда и програмира специален изопараметричен граничен елемент [246], по кривата линия на границата, с възли съвпадащи с възлите на равнинния елемент. Отчитайки възможността от наличие и на лъчев теплообмен, то за тези елементи при численото интегриране в трите интеграционни точки във всеки момент от времето на преминаване на топлинния източник се определя (проверява) дали точката е в петното на дъговия източник.</p> <p>Температурата на съответната точка на дъговия източника се определя по формулата [246]:</p> $T_r = T_1 + T_0 \left(1 - \frac{r}{\delta}\right)^p \left(1 + \frac{pr}{\delta}\right)$ <p>(5.20)</p> <p>където параметрите T_1, T_0, p и δ се въвеждат от ползвателя програмно.</p>	
--	---	--

5.1.2. Изследване на влиянието на температурното поле на параметрите на шева и около шевна зона при МПЗ.

Разработеният теоретическия модел в 5.1.1. дава възможност за програмно изчисляване на параметрите на температурното поле на процеса на подводно заваряване под вода. На базата на теоретичен модел на инж. Дойчин Ников [246] е разработена програмата за изчисляване на температурното поле при МПЗ съвместно с доц. д-р Л. Ковачев от Технически Университет-Варна [246], като изчисленията са извършени при условията посочени в таблица 5.2.

Табл. 5.2 - Условия при които са извършени изчисленията (суша и вода)

Условия на изчисления	Заваряване на суша	Заваряване под вода
- размер на пластини и материал	В x L x δ=200 x 200 x 12 mm	В x L x δ=200 x 200 x 12 mm
- гранични условия	от III род	от III род
- коефициент на топлоотдаване	20 W/(m ² k), въздух	5944 W/(m ² k), вода
- температура на околна среда	20°C	15°C
- мощност на топлинния източник	36М W/m (7020 MW/m ³)	36М W/m (7020 MW/m ³)
- скорост на заваряване	8,0 m/h, електрод α=60°	8,0 m/h, електрод α=60°
- заваряване	с два шева нанесени последователно	с два шева нанесени последователно
- коефициент на топлопроводимост	0,025 W/(mk), въздух 62,8 W/(mk), стомана	0,588 W/(mk), вода 15°C 62,8 W/(mk), стомана
- плътност	1,29 kg/m ³ , въздух	1000 W/(mk), вода

На фиг.5.3 в дисертацията е показано получените по изчислителен път чрез разработената програма - термическите цикли в шева от момента на заваряването на първия шев и на вторият шев през определени интервали от време [245,246].

На фиг. 5.4. (вж. Приложение 20) е показани време-температурните криви и скоростите на изменение на температурата за различни точки от заваръчния шев при заваряване под вода, а на фиг. 5.5 (вж. Приложение 21) за заваряване на въздух.

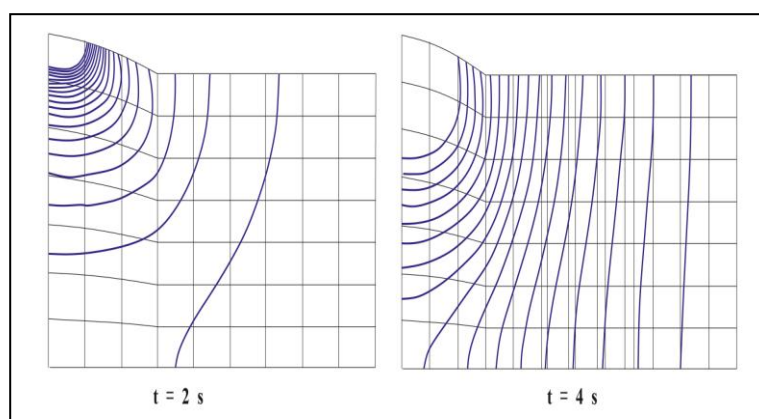
На базата на разработеният теоретичен модел от инж. Дойчин Ников в 5.1.1 [246] и с помощта на разработената програмата по този модел, се дава възможност да се пресмятат [246]: температурите, скоростите на изменение на температурите в определен участък от време и средните скорости на изменение на температурата в определен отрязък от време.

Направеното сравнение на експерименталните и изчислените температури с разработената програма показва, че несъвпадението в участъка на термичния цикъл:

- над температури 850°C е най-голямо (10-11%)[246].
- но в интервала 850-500°C е 1-3% за различните участъци на интервала [246]
- отчитайки, че несъвпадението при изчислените средните скорости на изменение на температурата в интервала 850-500°C е в рамките на само 1- 2%.

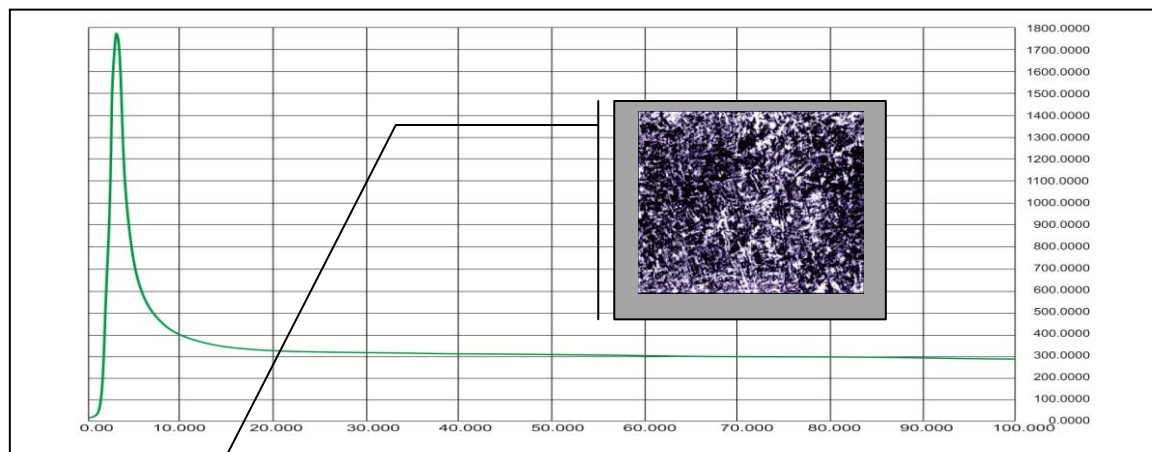
5.1.3. Изследване на влиянието на температурното поле върху свойствата на заваръчния шев и около шевна зона при МПЗ.

На базата на модела разработен от инж. Дойчин Ников [246] (вж.5.1.1) за разпределение на топлината при заваряване под вода, можем да получим температурните диаграми в заваръчната вана и детайла при различни времена (фиг.5.6) от началото на процеса на заваряване.

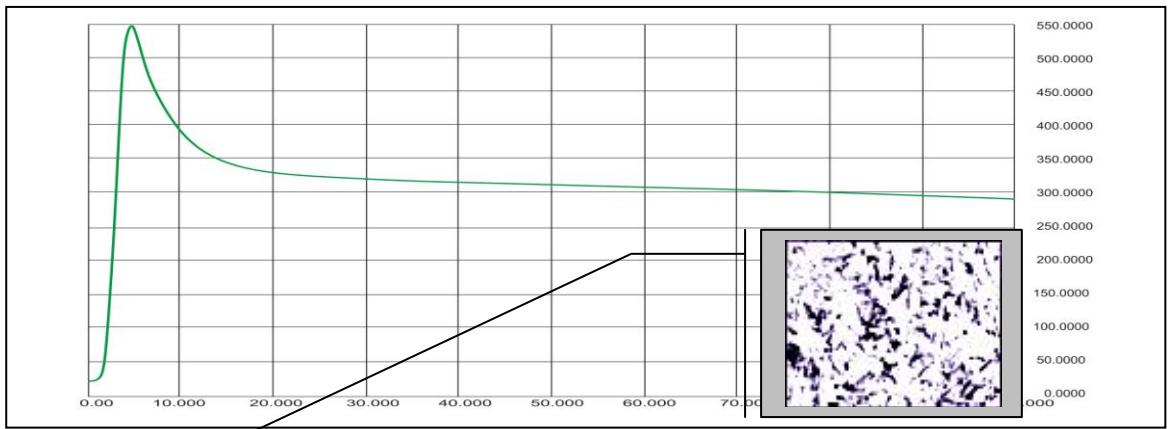


Фиг.5.6 - Температурни диаграми в заваръчната вана и детайла при $t = 2$ и 4 s от началото на заваръчния процес

Модела също позволява да се получат термичните цикли на всяка точка от заварявания метал и скоростите на охлаждане в интересувания ни диапазон от температури (фиг. 5.7 и фиг. 5.8)[246].

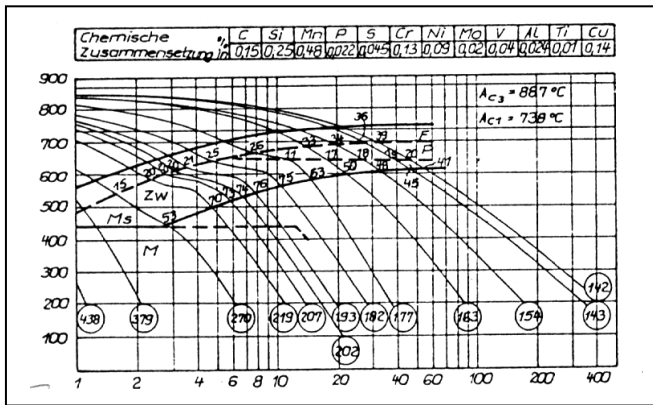


Фиг.5.7 - Температурни цикли в точка 46 от заваръчната вана и детайла, $V_{\text{охл}} (850 \div 500)^\circ\text{C} = 134^\circ\text{C}$

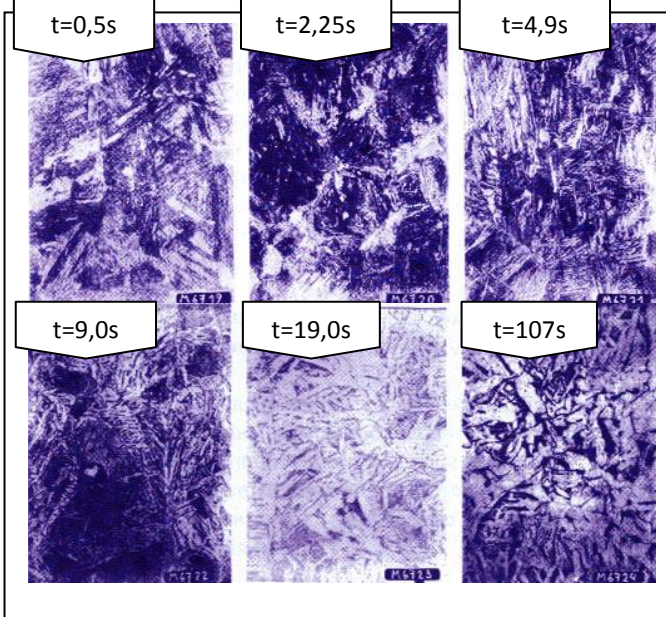


Фиг.5.8 - Температурни цикли в точка 101 от заваръчната вана и детайла, $V_{охл} (550 \div 300)^\circ\text{C} = 3,3^\circ\text{C}$

Определяне на структурата и механични характеристики в зоната на термично влияние (ЗТВ) в условия на заваряване под вода са осъществени на специално разработена уредба в Ростокския университет (University of Rostock, <https://www.uni-rostock.de>) [246].



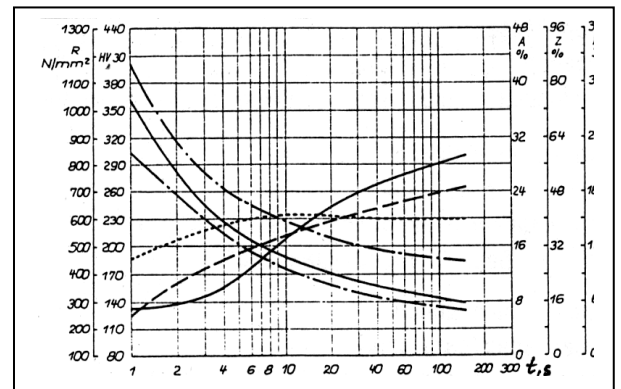
Фиг.5.9 Термокинетична диаграма при МПЗ.



Фиг.5.10. Структурни изменения в заваръчния шев при различни скорости на охлаждане

Построена е термокинетична диаграма (вж. фиг.5.9) на разпадането на аустенита при условията на подводно заваряване на базата на извършените изследвания [246]:

◇ термични, ◇ дилатометрични и ◇ металографски, направени върху образци стомана - Ст 3 по БДС EN 10025:2005.



Фиг.5.10.a. Механични характеристики при различни скорости на охлаждане

Разработения модел за пресмятане на температурата дава възможност да определи структурата и механичните качества на метала фиг.5.10.a, като се използват фиг.5.7, 5.8, 5.9 и 5.10 получени от експерименталните данни [246].

При направените сравнителни изследвания при заваряване под вода и данните получени по изчислителен път показват добра сходимост на резултатите (под 3%), което доказва практическата приложимост на модела (вж.5.1.1.) на инж.Дойчин Ников [246], а също и на разработената програма за анализиране на заваръчния процес, структурата и механичните качества на метала при МПЗ.

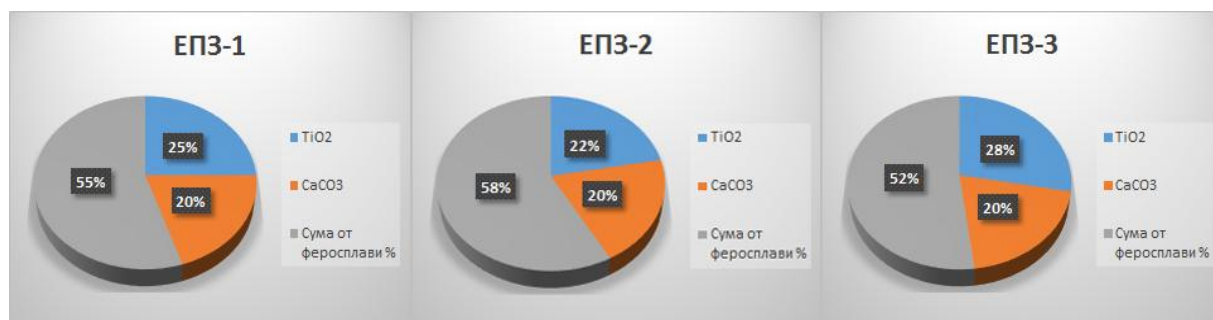
5.2. Изследване на влиянието на хидростатичното налягане на параметрите на процеса на заваряване и заваръчните съединение при МПЗ.

Въпроса за влиянието на хидростатичното налягане (дълбочината) върху параметрите на процеса на заваряване и заваръчните съединения при МПЗ представлява съществен интерес за изследователите свързано с ремонта на скъпо струващи инженерни съоръжения под вода. Повишаване на налягането на околната среда оказва съществено влияние на физическите и химическите процеси, протичащи при топенето и кристализацията на заварявания метал.

В цел да се уточни влиянието на дълбочината върху технологичните параметри на електродите бе извършено изследване на четири марки електроди с различен състав на обмзката три разработени електрода с участието на автора, и един за сравнение Грикон 98 (Grikon 98) производство Messer Griesheim GmbH (Германия) в барокамерен комплекс (вж.фиг.5.18 и фиг.5.20) при условията посочени в табл.5.4 [195]. Данните за шихтов състав на обмзката на електродите са дадени на табл. 5.3 и фиг.5.11.

Таблица.5.3 – Шихтов състав на електродите ЕПЗ при МПЗ

Марка	TiO ₂ %	CaCO ₃ %	Сума от феросплави %
ЕПЗ-1 (ЕПЗ 13)	25	20	55
ЕПЗ-2 (ЕПЗ 13В)	22	20	58
ЕПЗ-3 (ЕПЗ 23)	28	20	52
Грикон 98	Рутилови - базичен тип		



Фиг.5.11 – Състав на обмзка на електродите ЕПЗ за МПЗ

Табл. 5.4 - Условия при които са извършени изследванията в барокамерен комплекс [195] (вж.фиг. 5.18 и 5.20)

Условия на експеримента	„мокро” заваряване (барокамерен комплекс 0,1÷1,0 МРа)
- работна среда	сладка вода при T=10÷11°C
- температура на въздуха в камерта	T= 15÷18°C
- дълбочина на потапяне на образците	h=0,3 mm
- положение на заваряване	РЕ (Долно)
- заваръчен ток	I = =190÷205 А
- диаметър на електродите	d=4 mm, електрод наклон α=60°
- образци стомана	съответстват на пробата за заваряемост по ISO/DIS 2560 и са от стомана 09Г2 по БДС EN ISO 4880/89

	с дебелина $\delta=13$ mm (Вж. стр.69 - Забележка)
- система за запис	PICO ADC-2123 в процеса на заваряване се записват тока и напрежението с помощта на X-Y рекордер и периодично в рамките на 1 сек временните значения, десет секунди след началото на процеса и трикратното повторение през 5 сек.

В таблица 5.5 са посочени някои от основните резултати от експерименталното изпитание на електродите ЕПЗ 1÷3 и Грикон 98 [195] в барокамерен комплекс (вж.фиг.5.18 и фиг.5.20) и специализирана апаратура - заваръчен източник (вж.фиг.5.19).

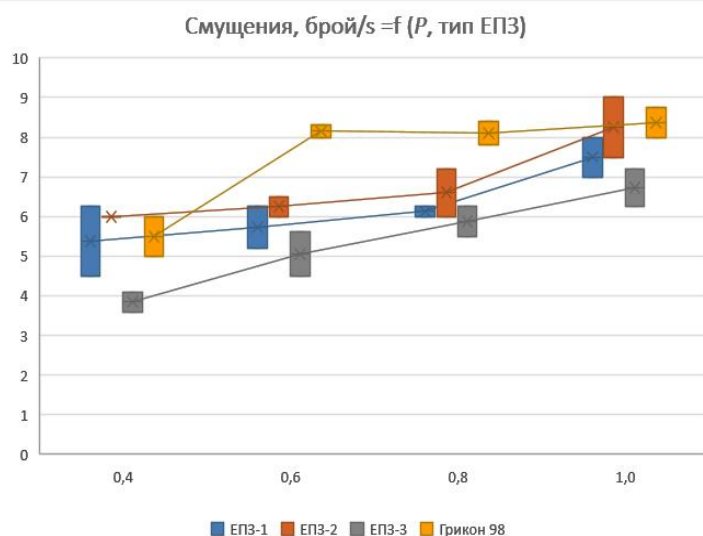
Таблица.5.5 - Експериментално получени данни от изпитанието на електродите ЕПЗ при МПЗ. [195]

№	ЕПЗ №	P МПа	Лин.енерг kJ/m	бр. смущения за сек	α_n g/Ah	α_{CT} g/Ah	R %	HV _{0,1} навар.метал	HV _{0,1} ЗТВ
1	1	0,4	3,25	4,5÷6,25	7,11	7,82	90,9	220÷249	319÷351
2	1	0,6	3,36	5,2÷6,25	7,56	8,23	91,8	216÷241	331÷347
3	1	0,8	3,59	6÷6,25	7,16	8,42	85,0	231÷240	328÷351
4	1	1,0	3,07	7÷8	7,39	8,39	88,0	236÷249	363÷378
5	2	0,4	3,58	6	6,78	7,91	85,7	220÷249	322÷346
6	2	0,6	3,94	6÷6,5	7,18	7,90	90,9	217÷237	328÷357
7	2	0,8	4,14	6÷7,2	7,79	8,4	92,7	231÷257	343÷358
8	2	1,0	3,64	7,5÷9	8,44	8,46	93,8	236÷263	349÷378
9	3	0,4	3,23	3,6÷4,1	7,04	7,99	88,1	201÷236	309÷342
10	3	0,6	3,31	4,5÷5,6	6,93	7,84	88,3	218÷231	311÷336
11	3	0,8	3,77	5,5÷6,25	6,77	8,37	89,1	213÷237	323÷351
12	3	1,0	3,47	6,25÷7,2	7,43	8,21	90,5	206÷236	306÷346
13	98	0,4	3,28	5÷6	7,11	8,17	89,9	203÷236	319÷336
14	98	0,6	3,37	8÷8,3	6,97	8,29	88,9	223÷239	331÷347
15	98	0,8	3,84	7,8÷8,4	7,82	7,99	90,3	230÷241	311÷338
16	98	1,0	3,35	8÷8,75	7,01	8,14	90,1	203÷236	336÷349

При обработката на резултатите от експериментите се определят: относителната дефектност (пукнатини), коефициента на стопяване – α_{cm} , коефициента на наваряване - α_n , рандемана - R%, анализират се данните от записите, определят се числата на смущенията в дъгата (спектрален анализ).

На база анализирани на експерименталните данни [195], се констатира следното:

- 1) Заваръчната дъга гори стабилно при всички изследвани ЕПЗ в целият диапазон на налягането (0,4÷1,0 МПа). С повишаване на налягането се наблюдава нарастване на честотата (броя) на смущенията в дъгата на всички изследвани ЕПЗ (т.н. стабилността на горене на дъгата се влошава), също нараства напрежението на дъгата [195] породено от увеличаване на дължината на дъгата (вж. фиг.5.12).

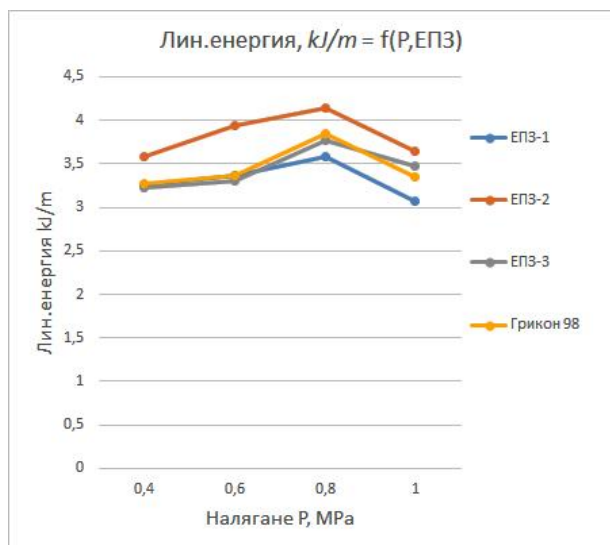


С повишаване на налягането се наблюдава нарастване на честотата (броя) на смущенията в дъгата на всички изследвани ЕПЗ (т.н. стабилността на горене на дъгата се влошава), също нараства напрежението на дъгата [195] породено от увеличаване на дължината на дъгата (вж. фиг.5.12).

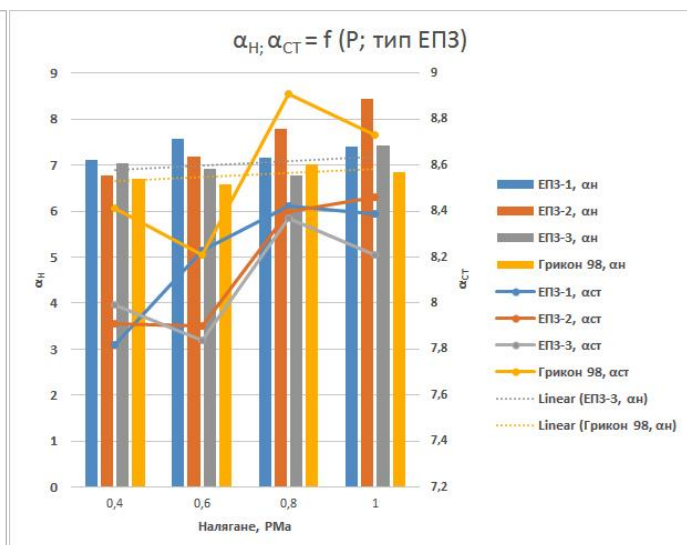
- 2) Електродите ЕПЗ-1 (ЕПЗ 13), ЕПЗ-2 (ЕПЗ 13В) и ЕПЗ-3 (ЕПЗ 23) разработени от автора при направените експерименти в имитационни условия в барокамерен комплекс показват значително по стабилно горене на дъгата в сравнение с Грикон 98 (Grikon 98) производство Messer Griesheim GmbH (Германия) [195].

Фиг.5.12 – Броя на смущенията за секунда за изследваните ЕПЗ при МПЗ във функция на нарастване на налягането (дълбочината).

Като броя смущенията в секунда при ЕПЗ 1,2 и 3 са средно с 25-40% в по-нисък обем (вж. фиг. 5.12) от тези измерени експериментално при Грикон 98 за целият диапазон на наляганя 0,4÷1,0 МПа.



Фиг.5.13 – Линейната енергия за изследваните ЕПЗ при МПЗ във функция на увеличаване на налягането.



Фиг.5.14 – Изменението α_H и α_{CT} във функция на нарастването на налягането (дълбочината) при различен тип ЕПЗ.

От направените изследвания може да се направят следните важни извода:

1) Експериментално е потвърдено, че при заваръчния процес на „мокро“ подводно заваряване с обмазани електроди (ЕПЗ) стабилността на горене на дъгата се влошава с повишаване на налягането (дълбочината). С повишаване на налягането нараства честотата на смущенията в дъгата, същевременно нараства и напрежението на дъгата породено от увеличаване на дължината на дъгата.

2) Електродите ЕПЗ-1 (ЕПЗ 13), ЕПЗ-2 (ЕПЗ 13В) и ЕПЗ-3 (ЕПЗ 23) разработени от автора са напълно конкурентни по параметри на вносните ЕПЗ. При направените сравнителни експерименти в имитационни условия в барокамерен комплекс, българските ЕПЗ показват значително по стабилно горене на дъгата в сравнение с Грикон 98 (Grikon 98) производство Messer Griesheim GmbH (Германия). Броя на смущенията в секунда при ЕПЗ-1, -2 и -3 са средно с 25-40% в по-нисък обем от тези измерени експериментално при Грикон 98 за целият диапазон на наляганя 0,4÷1,0 МПа.

3) Експерименталните данни от сравнителните изпитания на ЕПЗ-1, ЕПЗ-2 и ЕПЗ-3 показват, че броя на смущенията се увеличават реципрочно с намаляването на съдържанието на TiO_2 и увеличаване на съдържанието на Fe (при $CaCO_3 = const$) в шихтовия състав на ЕПЗ. Електродите ЕПЗ-3 (ЕПЗ 23) с най-голямо съдържание на TiO_2 ($TiO_2 = 28\%$) показват най-добра стабилност на горене под вода за целият диапазон на наляганя 0,4÷1,0 МПа.

4) При всички изследва електроди ЕПЗ без изключение, се забелязва аномално повишение на величината на линейната енергия с увеличаване на налягането до 0.8 МПа, като при продължаването на увеличаване на налягането до 1,0 МПа се отчита спад на величината на линейната енергия до и под стойности измерени при 0,4 МПа.

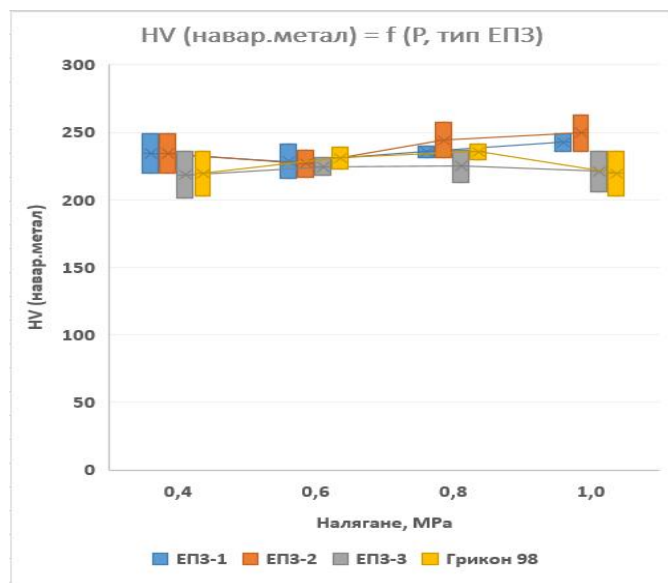
5) При всички изследвани електроди ЕПЗ без изключение се отчита увеличаване на коефициента на наваряване - α_H и коефициента на стопяване - α_{CT} с увеличаване на налягането (дълбочината).

6) Експерименталните данни от сравнителните изпитания на ЕПЗ-1, ЕПЗ-3, и при Грикон 98 показват, че има незначително леко изменение на рандемана с нарастването на налягането (дълбочината), в изключение на ЕПЗ-2 (ЕПЗ 13В) където е констатира леко нейно покачване.

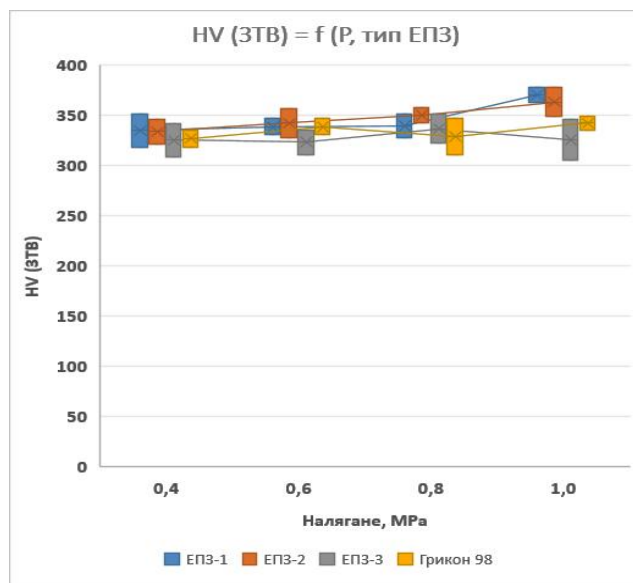
7) Изменението на микротвърдота на наварения метал в заваръчния шев $HV_{(H.M.)}$ не е еднозначно обвързана с увеличаване на налягането (дълбочината) при МПЗ. Микротвърдота

$HV_{(H.M.)}$ нараства при ЕПЗ-1 и ЕПЗ-2 с увеличаване на налягането (дълбочината), докато при ЕПЗ-3 и Грикон 98 то се колебае незначително в граници $HV_{(H.M.)} = 201 \div 241$ с увеличаване на налягането (дълбочината).

8) Констатирано е, че независимо от дълбочината на заваряването характерът на структурата и дефектите в наварения метал не се променя за всички изследвани ЕПЗ при МПЗ.



Фиг.5.16 – Изменението на $HV_{(H.M.)}$ във функция на нарастването на налягането (дълбочината) при различен тип ЕПЗ.



Фиг.5.17 – Изменението на $HV_{(ЗТВ)}$ във функция на нарастването на налягането (дълбочината) при различен тип ЕПЗ.

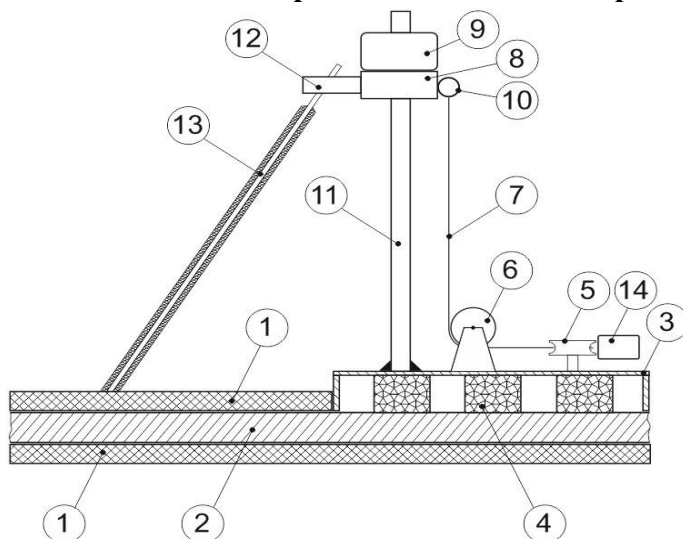
9) Изменението на микротвърдosta в зоната на термично влияние $HV_{(ЗТВ)}$ не е еднозначно обвързана с увеличаване на налягането (дълбочината) при МПЗ. Микротвърдosta в $HV_{(ЗТВ)}$ леко нараства при ЕПЗ-1 и ЕПЗ-2 с увеличаване на налягането (дълбочината), докато при ЕПЗ-3 и Грикон 98 то се колебае незначително в граници $HV_{(ЗТВ)} = 306 \div 351$ с увеличаване на налягането (дълбочината).

5.3. Разработване на нов метод и приспособления за подводно електродъгово заваряване на металите.

Практическата обосновка на недостатъците в съществуващите методи и приспособения, поражда необходимостта от разработване на нов метод и приспособление за подводно електродъгово заваряване.

Разработеното приспособление се отнася до метод за електродъгово заваряване на металите, който намира приложение в заваръчното производство, корабоплаването, ремонта на кораби, морското строителство и при заваръчни операции на подводни съоръжения.

Фиг. 5.21. Схема на приспособление за заваряване (МПЗ)



1. Армирано стъкло;
2. Корпус на конструкцията (детайл)
3. Корпус на приспособлението;
4. Постоянни магнити;
5. Горизонтална ролка;
6. Вертикална ролка;
7. Стоманено въже;
8. Правоъгълна Тежест
9. Тежест;
10. Халка за закрепване на въжето;
11. Стойка;
12. Захват за електрода;
13. Електрод с покритие;
14. Тежест.

5.3.1. Авторски претенции

1. Метод за електроудгово заваряване на металите, при който заваръчната дъга гори в междинната между двете ленти от армирано стъкло, електрода се закрепва в захвата на електрода на приспособлението, характеризиращо се с това, че в междината се екстродира смес от Fe_3O_4 , алуминий и течно стъкло, в някои случаи в сместа може да се поставят легиращи елементи, ъгълът на наклона на електрода е рамките на 60-30 градуса, което регулира скоростта на заваряване, процеса на заваряване е механизирен.

2. Приспособление за заваряване, състоящо се от стойка, хват за електрода, правоъгълната тежест, характеризиращо се с това, че има допълнителна тежест, пръстен, стоманено въже, две водещи ролки и тежест.

5.4. Изводи на глава 5:

1. Разработен е теоретичен модел на топлинното поле в тримерното пространство при заваряване под вода.

2. На базата на теоретичния модел описан в §5.1 е разработена програма за изчисляване на параметрите на температурното поле. Изследвано е температурата, термичният цикъл, скоростта на охлаждане при подводно заваряване и се определени получаваните структури на заваръчното съединение.

3. Решението на задачата на топлинния модел в направена с метода на крайните елементи (МКЕ).

4. Експериментално са получени резултати за термичните, дилатометричните, металографските и механичните свойства и са построени термо-кинетичната крива на разпадане на аустенита и зависимостта между механическите свойства и скоростта на охлаждане под вода.

5. Разработената методика дава възможност да получим данни за термични, структурни и механични свойства за която и да е точка на зоната на термично влияние в шева под вода.

6. Разработен е нов метод и приспособления за заваряване с електроди под вода, което дава възможност да се механизира метода на заваряване.

6. ОБЩИ ИЗВОДИ:

1. Анализирани са факторите, влияещи на процеса на подводно заваряване с електроди. Анализирани са влиянията на режима на заваряването, шихтовия състав на електрода, химическите елементи, водорода, средствата за защита на заваръчния шев и тяхното влияние върху качеството на заваръчното съединение под вода.

2. Разработена е методология за изследване и избор на главните оценяващо-регулативни технологични характеристики на процеса на заваряване под вода с електроди и свойствата на заваряваните съединения и техните измерители, които се определят главно от изискванията за експлоатационна пригодност на заваръчното съединение.

3. Разработена е методика за избор на главните управляващи променливи при изследването на заваръчния процес под вода и тяхното влияние върху свойствата на заваръчното съединение.

4. Разработена е методика за избор на план на експеримента, схема на експериментите и експериментална уредба, схема на измерванията и тяхната регистрация като са прецизирани всички условия за отстраняване на неточностите при избора на пробни тела и измервателни характеристики.

5. Разработена е методика за определяне на дефектите в заваръчното съединение като са използвани рекомендациите на стандартите и литературни данни. В някои случаи са въведени изисквания превишаващи тези на стандартите.

6. Разработена е методика и са определени параметрите за оценяване на устойчивостта на горене на дъгата (УГД) под вода.

7. Изследвани са значимите зависимости между двойните променливи. Особеност при анализирани на зависимостите между изследваните величини чрез коефициентите на Спирмен е значимостта. Изследвани са устойчивостта на горене на дъгата – k_S , количеството на микродефектите - N , количеството на неметалните включвания в навареният метал - D_S , количеството на микропорите – D_P , устойчивостта на метала срещу кристализационните пукнатини – P_{cr} , количеството топлина за разтопяване на 1 кг метал - q_L , и за наваряване - q_r ,

коэффициентите на стопяване - α_L и на наваряване - α_r , и тяхната зависимост от компонентите на шихтата на покритието на електрода.

8. Изследвана е взаимовръзката между шихтовия състав на покритието на електрода, елементите на химическия състав на наварения метал C%, Mn%, Si%, [H] ml/100g Me, технологичните параметри на заваръчния процес, дълбочината на заваряване и заварените под вода съединения, и техните механични качества.

9. Изследванията показват, че технологичната якост на заварените съединения P_{cr} изпълнени при МПЗ се определя от съдържанието на $x_2; x_4; x_5$ ($CaCO_3$; Fe прах; FeMn) в покритието на ЕПЗ. Главно значение за повишаване на P_{cr} имат Fe прах и FeMn в концентрации, съответно до 40% (*Fe прах*) и до 9,8% (*FeMn*). Значение за подобряването на P_{er} има и увеличаването на концентрацията на $CaCO_3$ в покритието на ЕПЗ.

10. Изследванията показват, че съществува косвена зависимост между P_{cz} и УГД - k_s , определена от отрицателното влияние на микродефектите в метала на шева D_s и P_p . Следователно P_{er} зависи от k_s и концентрацията на x_3 и x_4 , които определят k_s ($x_3 = CaF_2$; $x_4 = Fe$ прах). Едновременното нарастване съдържанието на метална фаза в покритието x_4 (*Fe прах*) и намаляване на концентрациите на CaF_2 в покритието, увеличават k_s , намаляват се D_s и D_p , а с това нараства технологичната якост на наварения метал, представена чрез устойчивостта му срещу кристализационни пукнатини - P_{cr} . Концентрациите на Fe прах в покритието трябва да има максимални значения до 40% и минимални - не по-малко от 24 – 25%. Концентрациите на CaF_2 в покритието трябва да са минимални. Тези стойности са в граници, определени от условието за минимална концентрация на дифузионно подвижен водород в наварения метал [H]. Това условие изисква компромисно решение по отношение на УГД - k_s , която е свързана в обратнопропорционална зависимост с концентрацията на [H] (вж. Приложение 6):

Концентрацията на CaF_2 в покритието трябва да е не повече от 4÷4,5%.

11. Направените изследвания показват, че механичните свойства се определят от шихтовия състав на покритието от концентрацията на x_2 ($CaCO_3$) и x_5 (*FeMn*). Най-силно влияние на тази зависимост оказва *FeMn*, с чието нарастване, A_v - ударната жилавост намалява. Компромисното решение на обратнопропорционалната зависимост между A_v ; P_{cr} ; [H], определящо структурно-водородното състояние на метала и шихтовия състав на покритието изисква съдържанието на *FeMn* в покритието да бъде 4 ÷ 6 % .

Изследванията показват, че е най-подходящ е рутилово-базичен тип на покритието на ЕПЗ на МПЗ при спазено условие:

$$A = \frac{x_1}{x_2} \left(\frac{TiO_2}{CaCO_3} \right) = 1,25 \div 1,30 \text{ и съдържание на } CaF_2 \text{ в покритието - } 4 \div 4,5\%.$$

12. Използваният корелационен анализ за разкриване на зависимостите между изследваните величини позволява определяне на тенденция за подобряване свойствата на заварените съединения, получени при МПЗ. Освен това този анализ позволява с достатъчна достоверност (вж.гл.2) да се определят конкретните мероприятия за регулиране (изменение) на всяко едно от изследваните свойства, чрез разкритите взаимовръзки, посредством шихтовия състав на покритието.

13. Експериментално-статистически е изследвано влиянието на шихтата на електродите при ръчно електродъгово заваряване под вода върху устойчивостта и качеството на заваръчната дъга, в резултат на което са получени регресионните уравнения.

14. Оптимизирани са параметрите на регресионния модел като се използват програма за оптимизация, която реализира метода на въртящите се координати (Метод на Розенброк) за итерационно търсене на оптимума на произволна аналитично зададена функция F и са получени стойности на компонентите в оптимални точки.

15. Изследвано е влиянието на параметрите на състава на шихтата на електродите върху качеството на шева с помощта на металографски анализ на заваръчните съединения при МПЗ.

16. Разработен е теоретичен модел на топлинното поле в тримерното пространство при заваряване под вода.

Експериментално са получени резултати за термичните, дилатометричните, металографските и механичните свойства и са построени термо-кинетичната крива на разпадане на аустенита и зависимостта между механическите свойства и скоростта на охлаждане под вода.

Разработената методика дава възможност да се получат данни за термични, структурни и механични свойства, за която и да е точка на зоната на термично влияние в шева под вода.

17. Разработен е метод и приспособления за заваряване с електроди под вода, което дава възможност да се механизира процеса на заваряване.

7. ПРИНОСИ:

I. Научни приноси:

1. Разработен е теоретичен модел на топлинното поле в триизмерно пространство от дъгата към заваръчните детайли като се използва метода на крайните елементи и е разработена програма за изчисляване на параметрите на температурното поле. Изследвани са температурата, термичният цикъл и скоростта на охлаждане при подводно заваряване и са получени структурите в заваръчното съединение.

2. Разработена е методология за изследване и избор на главните оценяващи-регулативни технологични характеристики на процеса на заваряване под вода с електроди, свойствата на заваряваните съединения и техните измерители, които се определят главно от изискванията за експлоатационната пригодност на заваръчните съединения.

3. Новост представлява разработената методика за избор на главните управляващи променливи при изследване на заваръчния процес под вода и тяхното влияние върху свойствата на заваръчното съединение.

II. Научно приложни приноси:

1. Изследвани са факторите, влияещи на процеса на подводно заваряване с електроди. Анализирани са влиянието на режима на заваряване, шихтовият състав на електрода, химическите елементи, водорода, и средствата за защита на заваръчния шев и тяхното влияние на качеството на заваръчното съединение и голяма част от които представляват новост и са получени за първи път.

2. Разработена е нова методика за избор на плана на експеримента, схемата на експеримента, експерименталната уредба, схемата на измерванията на параметрите и тяхната регистрация като са прецизирани всички условия за отстраняване на неточности при избора на пробни тела и измерваните характеристики.

3. Разработена е нова методика за определяне на дефектите в заваръчното съединение като са използвани рекомендациите на стандартите и литературни данни. В някои случаи са въведени изисквания превишаващи тези на стандартите.

4. Новост представляват изследванията на значимите зависимости между двойните променливи. Особеност при анализирани зависимости между изследваните величини чрез коефициентите на Спирмен е значимостта. Изследвани са устойчивостта на горене на дъгата – k_S , количеството на микродефектите – N , количеството на неметалните включвания в навареният метал – D_S , количеството на микропорите – D_P , устойчивостта на метала срещу кристализационните пукнатини – P_{cr} , количеството топлина за разтопяване на 1 кг метал – q_L , и за наваряване – q_r , коефициентите на стопяване – α_L и на наваряване – α_r , и тяхната зависимост от компонентите на шихтата на покритието на електрода.

5. Изследвана е взаимовръзката между шихтовия състав на покритието на електрода, елементите на химическия състав на навареният метал C%, Mn%, Si%, [H] ml/100g Me, технологичните параметри на заваръчния процес, дълбочината на заваряване и заварените под вода съединения, и техните механични качества.

6. Получени са нови данни при изследването на технологичната якост на заварените съединения P_{cr} изпълнени при МПЗ се определя от съдържанието на $X_2; X_4; X_5$ ($CaCO_3$; Fe прах; FeMn) в покритието на ЕПЗ. Главно значение за повишаване на P_{cr} имат Fe прах и FeMn в концентрации, съответно до 40% (*Fe прах*) и до 9,8% (*FeMn*). Значение за подобряването на P_{er} има и увеличаването на концентрацията на $CaCO_3$ в покритието на ЕПЗ.

7. За първи път е получено при направените изследвания, че съществува косвена зависимост между P_{ce} и УГД - k_s , определена от отрицателното влияние на микродефектите в метала на шева D_s и P_p . Следователно P_{er} зависи от k_s и концентрацията на X_3 и X_4 , които определят k_s ($x_3 = CaF_2$; $x_4 = Fe$ прах). Едновременното нарастване съдържанието на метална фаза в покритието x_4 (*Fe прах*) и намаляване на концентрациите на CaF_2 в покритието, увеличават k_s , намаляват се D_s и D_p , а с това нараства технологичната якост на наварения метал, представена чрез устойчивостта му срещу кристализационни пукнатини - P_{cr} . Концентрациите на Fe прах в покритието трябва да има максимални значения до 40% и минимални - не по-малко от 24 – 25%. Концентрациите на CaF_2 в покритието трябва да са минимални. Тези стойности са в граници, определени от условието за минимална концентрация на дифузионно подвижен водород в наварения метал $[H]$. Това условие изисква компромисно решение по отношение на УГД - k_s , която е свързана в обратнопропорционална зависимост с концентрацията на $[H]$ (вж. Приложение 6):

Концентрацията на CaF_2 в покритието трябва да е не повече от 4÷4,5%.

8. Направените изследвания показват, че механичните свойства се определят от шихтовия състав на покритието от концентрацията на x_2 ($CaCO_3$) и x_5 (*FeMn*). Най-силно влияние на тази зависимост оказва *FeMn*, с чието нарастване, A_v - ударната жилавост намалява. Компромисното решение на обратнопропорционалната зависимост между A_v ; P_{cr} ; $[H]$, определящо структурно-водородното състояние на метала и шихтовия състав на покритието изисква съдържанието на *FeMn* в покритието да бъде 4 ÷ 6 % .

Изследванията показват, че е най-подходящ е рутилово-базичен тип на покритието на ЕПЗ на МПЗ при спазено условие:

$$A = \frac{x_1}{x_2} \left(\frac{TiO_2}{CaCO_3} \right) = 1,25 \div 1,30 \text{ и съдържание на } CaF_2 \text{ в покритието} - 4 \div 4,5\% .$$

Дадените съотношения на компонентите и тяхното съдържание в покритието на ЕПЗ са получени и се публикуват за първи път.

9. Използваният корелационен анализ за разкриване на зависимостите между изследваните величини позволява определяне на тенденция за подобряване свойствата на заварените съединения, получени при МПЗ. Освен това този анализ позволява с достатъчна достоверност (вж.гл.2) да се определят конкретните мероприятия за регулиране (изменение) на всяко едно от изследваните свойства, чрез разкритите взаимовръзки, посредством шихтовия състав на покритието.

10. Експериментално-статистически е изследвано влиянието на шихтата на електродите при ръчно електродъгово заваряване под вода върху устойчивостта и качеството на заваръчната дъга, в резултат на което са получени регресионните уравнения.

11. Оптимизирани са параметрите на регресионния модел като се използват програма за оптимизация, която реализира метода на въртящите се координати (Метод на Розенброк) за итерационно търсене на оптимума на произволна аналитично зададена функция F и са получени стойности на компонентите в оптимални точки.

12. Изследвано е влиянието на параметрите на състава на шихтата на електродите върху качеството на шева с помощта на металографски анализ на заваръчните съединения при МПЗ.

13. Новост е разработеният модел на топлопренасяне от дъгата към заваръчния метал при заваряване под вода.

Експериментално са получени резултати за термичните, дилатометричните, металографските и механичните свойства и са построени термо-кинетичната крива на разпадане на аустенита и зависимостта между механическите свойства и скоростта на охлаждане под вода.

Разработената методика дава възможност да се получат данни за термични, структурни и механични свойства, за която и да е точка на зоната на термично влияние в шева под вода.

14. Разработен е нов метод и приспособления за заваряване с електроди под вода, което дава възможност да се механизира процеса на заваряване.

III. Приложни приноси:

1. На базата на направеното изследване са разработени електроди за подводно заваряване, чиито параметри не отстъпват на известните марки електроди за заваряване под вода.

2. Изследвано е влиянието на компонентите на покритието върху механичните характеристики и структурата на заваръчното съединение и технологическите свойства на дъгата при заваряване под вода с електроди.

3. На базата на теоретичния модел описан в §5.1 е разработена програма за изчисляване на параметрите на температурното поле, термичният цикъл и скоростта на охлаждане при подводно заваряване. Разработената програма на база нова методика дава възможност да се прогнозира структурите на заваръчното съединение и механични свойства, за която и да е точка на зоната на термично влияние в шева под вода. Проведените паралелни металографски изследвания в зоната на термично влияние и зоната на шева на образци заварени под вода потвърждават високата достоверност на получените данни в цел прогнозиране или по отношение на възможности за оценка на качествата на получаваните заваръчните съединения при подводно заваряване. Разработената методика (и програма) дават възможност да бъдат използвани не само за подводно заваряване, но и за други методи на заваряване.

4. Проведени са паралелни изследвания на електроди производство на различни фирми G98 Германия, Е 6013, ЭПС-АН1, ЕПЗ-23Н, ЕПЗ-12С (ЕПЗ 3.3, ЕПЗ 3.12) и е доказано, че разработените българските електроди не отстъпват по качество на вносните електроди.

5. Определени са основните компоненти и диапазоните им на вариране в ш.с. на покритието на ЕПЗ.

6. Разработени и изследвани са ш.с. на ЕПЗ чрез разработения подход са разкрити зависимостите между ш.с. на покритието, технологичните и механични свойства на заварените съединения и заваръчния процес, и възможността за управляването им чрез компонентите от ш.с.

7. Разработена е и апробирана технология за производство на ЕПЗ в "ЗАВОД ЗА ЕЛЕКТРОДИ" ООД – гр. Ихтиман (приемник на ЗЕ "Ихтиманска комуна" - гр. Ихтиман). Електродите ЕПЗ - 23 Н и ЕПЗ – 12 С за МПЗ се произвеждат по наша поръчка, към момента има произведени – 300 кг налични на склад.

8. Създаденият подход за разработване и изследване на ЕПЗ е апробиран при създаването на ЕПЗ за заваряване на високояки стомани.

9. Изследвано е влиянието на компонентите на покритието върху УГД, механичните свойства и съдържанието на водорода в заваръчното съединение.

10. Като се използва регресионният метод е изследвано влиянието на режима на заваряване, компонентите на покритието и са оптимизирани техните параметри.

11. Разработените електроди са апробиране от Център за професионално обучение към ТУ-Варна с лиценз №200312157, Пристанище Бургас ЕАД, Еко Клийн Технолоджи ЕООД, фирми „Соларис” и „Ремтехнолоджи” ООД (РЕМТЕХСТРОЙ ГРУП) при ликвидация на кораба „Олга” в Пристанище Бургас, и др.

12. Разработените нови ЕПЗ (ЕПЗ- 23Н и ЕПЗ-12С) се използват успешно от години при обучение на курсисти (водолази), множество фирми и структури на Дирекция „Гражданска защита” – гр. София и Национална служба „Борба с организираната престъпност” в Центъра по професионално обучение към Технически университет – Варна.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Дисертационният труд е насочен към изследване на възможностите за регулиране свойствата на заваръчните съединения чрез покритието на електродите при мокро подводно

заваряване. Направените изследвания по отношение на оптимизиране на технологичните, механичните параметри и ш.с. на ЕПЗ на процеса на заваряване под вода, дава възможност в значителна степен да се подобри качеството на шева и постиганите експлоатационните характеристики на заваръчното съединение под вода. Резултатите от това изследване насочено към съвременните тенденции в тази област в развитието на електроди за „мокро“ подводно заваряване - като са разработени са електроди за подводно заваряване, чиито параметри не отстъпват на известните марки електроди за заваряване под вода. Разработен е метод и приспособления за заваряване с електроди под вода, което дава възможност да се механизира процеса на заваряване под вода.

9. Публикувани статии по темата на дисертацията.

1. Nikov N., Nikov D., Nikov B., Kovachev L. Study of the interaction between the welding arc and the welding seam properties at underwater welding. MEET/MARIND-2002, Volume V, 07-11 X 2002, Varna с.261-266.

2. Ников Д.Н., Ников Б.Н., Изследване на процеса на заваряване под вода при повишаване на дълбочината, Машиностроителна техника и технологии, 2004 г., ТУ-Варна, Варна, стр.76-79.

3. Ников Н.Я., Ников Д.Н., Изследвания влияния компонентов покрития електрода на процес ручной сварки под водой. Част 1, МНТК, V Международен конгрес „Машиностроителни технологии' 06“, 20 – 23 септември 2006 г., Варна, България

4. Ников Д.Н., Ников Н.Я., Анализ влияния компонентов покрития електрода на процес ручной сварки под водой. Част 2, МНТК, V Международен конгрес „Машиностроителни технологии' 06“, 20 – 23 септември 2006 г., Варна, България.

5. инж. Дойчин Ников, Експериментално изследване на ръчноелектродъгово заваряване под вода на образци от стомана 09г2 –Част I, Международна конференция „Еко Варна“ 2016г.

6. инж. Дойчин Ников, Изследване влиянието на елементите на покритието на електрода върху свойствата на заваръчното съединение при заваряване под вода – Част II, Международна конференция „Еко Варна“ 2016г.

7. инж. Дойчин Ников, Изследване и анализ на метода ръчно електродъгово заваряване на металите под вода, Международна конференция „Еко Варна“ 2017г.

10. Статии на научните трудове, които не са представени за рецензия в дисертацията.

1. Nikov N., Nikov D., Nikov B. Study of the gas atmosphere in the arc at under-water welding. Acta Universitatis Pontica Euxinus. Volume 1, №1, 2002.

2. Ников Н., Дичев П. Ников Д., Ников Б. „Оптимизиране на някои технологични параметри при рязане под вода“, МНФ, ТУ-Варна, том.1,2003, стр.162.

3. Nikov N., Nikov D., Nikov B., Dichev P. Research on the underwater double-arc welding process. Acta Universitatis Pontica Euxinus. Volume III, №2 2004 p.38-41.

4. Nikov N., Nikov D., Nikov B.,Dichev P. Study of arc burning steadiness at underwater welding. Acta Universitatis Pontica Euxinus. Volume III, №2 2004 p.42-46.

5. Ников Н., Ников Д., Ников Б., Дичев П. Полуавтоматично електрокислородно рязане на корабостроителни стомани. НТС МТТ, №2 2004, с.39-41.

6. Ников Н., Ников Д., Ников Б. Разработване и изследване на метод и електрод за подводно заваряване с допълнителна защита. Годишник 5-280, ТУ Варна, 2003 с.184-189.

7. Ников Н., Дичев П., Георгиев К., Ников Д. Оптимизиране на някои технологични параметри при рязане под вода. Морски научен форум, Варна, ВВМУ, 2003.

8. Ников Н., Дичев П., Ников Д., Ников Б. Полуавтоматично електрокислородно рязане на металите под вода. Морски научен форум, Варна, ВВМУ, 2003.

9. Ников Н., Ников Д., Ников Б. и Табаков И. Изследване параметрите на режима на заваряване под вода - Транспорт, екология, устойчиво развитие. ЕКОВАРНА 2002 с.383-390.

10. Ников Н., Ников Д., Ников Б. и Табаков И. Изследване състава на тръбнофлюсовата тел с цел подобряване на качеството на заваръчните шевове при заваряване под вода- Транспорт, екология, устойчиво развитие. ЕКОВАРНА 2002 с.372-377.
11. Ников Н., Ников Д., Ников Б. и Табаков И. Разработване и изследване на нови тръбнофлюсови телове за заваряване под вода - Транспорт, екология, устойчиво развитие. ЕКОВАРНА 2002 .
12. Ников Н., Ников Д., Ников Б. и Табаков И. Изследване на газовата защита при подводно полуавтоматично заваряване - Транспорт, екология, устойчиво развитие. ЕКОВАРНА 2002 с.372-377.
13. Nikov N., Nikov D., Nikov B.,. Study of the stability of a power source/supply-an electric arc-at semi-automatic wet underwater welding. MEET/MARIND'2002, Volume IV, 07-11 X 2002, Varna с.267-271.
14. Ников Н., Дичев Пл., Ников Д., Томов П., "Полуавтоматично електродръгово рязане на корабостроителни стомани", НС, Созопол, 2002 г.
15. доц.Н.Ников, инж.Д.Ников, инж.Б.Ников, доц.док.П.Ковачев, „Изследване на взаимодействието между заваръчната дъга и свойствата на заваръчния шев при подводно заваряване”, годишник ТУ-Варна.
16. Николай Ников, инж. Д.Ников, инж. Б.Ников – ТУ-Варна, катедра ЕТЕТ, „Изследване на процеса на заваряване с тръбно-флюсова тел”, Study of processes of WELDING The trumpet-TEL fluxes, Юбилеен конгрес с международно участие 04-06.10.2013, ТУ-Варна
17. Николай Ников, инж. Д.Ников, инж.Б.Ников, ТУ-Варна, катедра ЕТЕТ, „Методика за експериментално-статистическо изследване на факторите, влияещи на качеството на процеса при заваряване под вода”, METHODS OF EXPERIMENTAL-STATISTICAL STUDY OF FACTORS INFLUENCE THE QUALITY OF UNDERWATER WELDING PROCESS, Юбилеен конгрес с международно участие 04-06.10.2013, ТУ-Варна
18. Николай Ников, инж. Д.Ников, инж.Б.Ников, ТУ-Варна, катедра ЕТЕТ, „Изследване на факторите, влияещи на устойчивостта на горене на дъгата под вода”, STUDY OF FACTORS AFFECTING THE STABILITY OF BURNING UNDERWATER WELDING, Юбилеен конгрес с международно участие 04-06.10.2013, ТУ-Варна
19. Nikov N., Nikov B., Nikov D. Development of a method for plasma underwater welding of metals. Acta Universitatis Pontica Euxinus. Volume III, №1 2004 p.30-34.
20. Ников Н., Ников Д. Изследване на влиянието на компонентите на покритието върху качеството и структурата на заваръчния шев при заваряване под вода., Международна конференция, МЕЕМИ- Варна 2006, с.61
21. проф.Николай Ников, инж. Д.Ников, инж. Б.Ников – ТУ-Варна, катедра ЕТЕТ, „Анализ на методите за подводно рязане на металите”, ANALYSIS OF METHODS FOR UNDERWATER CUTTING METALS, Юбилеен конгрес с международно участие 04-06.10.2013, ТУ-Варна
22. проф.Николай Ников, инж. Д.Ников, инж.Б.Ников – ТУ-Варна, катедра ЕТЕТ, „Анализ на съвременното състояние на методите за подводно рязане”, ANALYSIS OF METHODS FOR UNDERWATER CUTTING METALS, Юбилеен конгрес с международно участие 04-06.10.2013, ТУ-Варна
23. инж.Д.Ников, инж.Б.Ников, инж. Д.Бойчев, „Проблеми при управление на специализирани хранващи източници при въздушно-плазмено рязане и напластяване” ТУ-Варна годишник 2002.
24. инж. Д.Ников, инж. Б.Ников, Ремтехноложи ООД, "Поддръжка и експлоатация на тежка железопътна механизация - Plasser & Matica"-, Железопътен форум – 2006
25. Контров С.И., Тахрилов Х.П., Ников Б.Н., Ников Д.Н., Комплексни теми със ситуационни задачи за държавен изпит за ОКС ”бакалавър” модул “Електротехнологии”, 2002.

DISERTATION TITLE:
“ Examining the process of manual arc welding of metals under water.”
AUTOR: Doychin Nikov

ANNOTATION

Дисертационният труд в обем представлява обобщение и решение на научните проблеми по създаване на теоретично основи и разработка на научно-обосновани металургични и технологични принципи на осигуряване на необходимото качество на заваръчните съединения от ниско въглеродни и нисколегирани стомани (стомана 09Г2 с широко приложение в България, Украйна, Русия и др. страни използвана при строителство на кораби, подводно и надводно оборудване) в условие на заваряване непосредствено под вода. И формиране на принципите и разработка на електроди от ново поколение, основите на технология и практически приложно оборудване, като новост за електродъгово заваряване на елементи на подводни конструкция чрез «мокро» заваряване под вода.