



СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

Дипломна работа за придобиване на
образователно-квалификационна степен
„Бакалавър“

на

Михаил Николов Рибегин

фак. № 30242

специалност „Ядрена техника и ядрена енергетика“

**Тема: Приложение на капиларния метод за контрол
на метала на съоръжения в АЕЦ**

Научен ръководител:

доц. д-р Йонка Иванова

София, септември 2022

Съдържание	
Въведение	3
Цел и задачи на дипломната работа`	5
1. Капилярен метод (РТ) за безразрушителен контрол	6
• Общи сведения	6
• Предимства и недостатъци	6
• Видове капилярни методи	7
• Приложение на капилярните методи в атомната енергетика	7
• Видове несъвършенства /дефекти/ при заваряване чрез стопяване на металите	
2. Физични основи на капилярния контрол	10
• Свойства на течности. Омокряне	10
• Повърхностно напрежение	11
• Адхезия и кохезия	12
• Капилярни явления. Капилярно налягане	13
• Разтваряне	15
• Диспергиране и емулгиране	15
• Дифузия. Дифузионно пропиване	15
• Хидродинамика на запълване на проходен капиляр	16
• Запълване с течност на непроходен капиляр	17
• Хидродинамика на пенетранта при проявяване на нецялостности	18
• Цветови и яркостен контраст	19
• Луминесценция	19
• Класификация на капилярните методи	20
3. Технологии и процедури за капилярен контрол	21
• Основни операции при капилярен контрол	21
• Материали за капилярен контрол	23
• Оценка на качеството на материалите чрез сравнителни и контролни образци по БДС EN ISO 3254-3	25
• Оценка на резултатите от капилярния контрол.	27
4. Провеждане на капилярен контрол в АЕЦ	28
5. Заключение	30
Използвана литература	31

Въведение

Методите за безразрушително изпитване се използват при контрола на качеството на материали и съоръжения и гарантират надеждността, безопасността и дълготрайността на съоръженията и тяхната безаварийна работа, като не разрушават контролираните материали.

Основните изисквания към методите за контрол са:

- възможност за прилагане на контрол без разрушаване на всички етапи на производството, при монтаж, по време на експлоатация и при ремонт ;
- съгласуваността на времето, прекарано за контрол, с времето на другото технологично оборудване;
- висока надеждност на резултатите от контрола;
- възможността за механизация и автоматизация.
- способността да се контролира качеството на продуктите според зададени параметри и да се откриват различни отклонения и дефекти в изделията.

Под отклонение се разбира всяко недопустимо нарушаване на свойствата на материалите или изделията. Под дефект се разбира всяко недопустимо отклонение, което нарушава изпълнението на потребителските свойства на изделието . Дефектите могат да бъдат поправими или непоправими, когато водят до прекратяване на използването на изделието.

Основните области на приложение на методите за безразрушителен контрол (БК) са откриване на дефекти и несъвършенства на съоръжения в атомната енергетика, летателни апарати, подводници и надводни кораби, космически кораби и др.); дефектоскопия на части и устройства за дългосрочна експлоатация (пристанищни съоръжения, мостове, кранове, атомни електроцентрали, котли, изкуствени земни спътници); непрекъснато откриване на дефекти на особено критични възли и устройства (котли на атомни, топло и електроцентрали), мониторинг на подземни работи; провеждане на изследвания върху структурата на материалите и дефектите на продуктите с цел подобряване на технологиите.

Цел и задачи на дипломната работа

Целта на настоящата дипломна работа е запознаване с физичните основи на капиларния метод за безразрушителен контрол (РТ) и неговите възможности за откриване на нецялостности и приложенията му при контрол на метала на съоръженията в АЕЦ.

За изпълнение на целта е поставена следната задача:

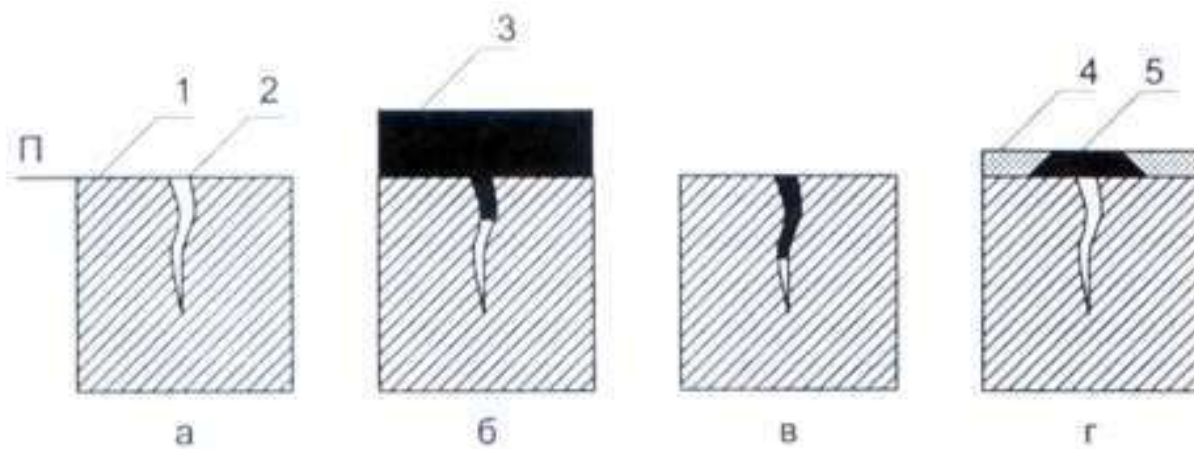
Проучване и подготовка на литературен обзор върху капиларния метод и приложението му за контрол на метала на съоръжения в АЕЦ.

1. Капилярен метод за безразрушителен контрол

- **Общи сведения**

Капилярният безразрушителен контрол (с проникващи течности) се основава на проникване на специални проникващи течности в повърхностни нецялостности, проявяване и следващо регистриране на индикаторната следа. Методът позволява да се открият невидими или слабо видими от човешкото око дефекти и може да се използва както при метални, така и при неметални материали.

Методът включва: почистване повърхността на контролирания обект; подсушаване; нанасяне на пенетранта; изчакване проникващата течност да проникне в нецялостностите; премахване на пенетранта от повърхността; нанасяне на проявител; измерване на индикаторната следа. Капилярният метод за безразрушителен контрол може да се използва в лабораторни и полеви условия, в широк диапазон от температури. Методът се използва за откриване на дефекти на пукнатини, прегъвания, порестост, заваръчни шевове, тръбопроводи, отливки и др.



фиг. 1 [5,7]

На фигура 1 е представена последователността от операции при капилярния контрол след почистване и изсушаване. 1–контролирания обект, 2–дефекта, 3–пенетранта, 5–проявител.

- **Предимства и недостатъци**

Предимствата на капилярните методи за БК се основават на възможността им за

използването им в полеви условия при различни температури на околната среда; висока чувствителност към повърхностни дефекти; евтини консумативи; прилагане при контрол на херметичността.

Недостатъците се изразяват в : трудоемкост, ръчен труд, ограничен по отношение на грапавостта на изследваните обекти, невъзможност за автоматизация при оценка на индикаторната следа, възможност за откриване само на повърхностни дефекти.

- **Видове капилярни методи**

Видовете и методите за безразрушително изпитване се класифицират според следните критерии: взаимодействието на физически полета или вещества с контролирания обект; първични информативни параметри; методи за получаване на първична информация; начини за представяне на крайната информация. В зависимост от принципа на работа, капилярните методи за безразрушителен контрол се разделят на:

–Цветен метод: регистрира се цветен контраст на индикаторна следа при видима светлина.

–Луминесцентен метод: с регистриране на контраста на флуоресцираща индикация при ултравиолетова светлина.

–Метод на филтриращите се суспензии: с използване на индикаторна суспензия и образуване на индикаторна следа от филтрираните частици на дисперсната фаза на пенетранта в областта на нецялостността (при порести материали).

–Капилярен– електростатичен: регистриране на индикаторна следа, образувана от натрупване на електрически заредени частици при наличие на дефект в неелектропроводими материали.

–Капилярен– магнитопрахов метод: регистриране на индикаторна следа, образувана от проникващи вещества съдържащи феромагнитен прах при контрол на феромагнитни материали.

–Капилярен– радиационен: чрез регистрация на йонизиращо излъчване от пенетранта, проникнал в пукнатини.

- **Приложение на капилярните методи в атомната енергетика**

В атомната енергетика са установени норми и правила за наблюдение на състоянието на основния метал, заварените съединения и наплавките на оборудването,

тръбопроводите и други елементи на атомни електроцентрали [1-3].

В зависимост от степента на влияние върху безопасността на АЕЦ, оборудването и тръбопроводите на системата, от която са неразделна част, се разделят на групи А, В и С [1].

Група А включва оборудването и тръбопроводи, при които се нарушава работата на горивните елементи, аварии по време на експлоатацията на системите за безопасност, както и корпуса на реактора под налягане.

Група В включва оборудване и тръбопроводи, чието разрушаване води до невъзстановимо изтичане на охлаждащата течност, осигуряваща охлаждане на активната зона на реактора, и/или изисква въвеждането на системи за безопасност, както и оборудване и тръбопроводи на системи на АЕЦ с работещи реактори с бързи неутрони в контакт с течен метален охлаждащ агент.

Група С включва:

1) оборудване и тръбопроводи, които не са включени в групи А и В, чието разрушаване води до изтичане на охлаждащата течност, която осигурява охлаждане на активната зона на реактора;

2) оборудване и тръбопроводи, чието разрушаване води до повреда на един от каналите на системата за сигурност;

3) оборудване и тръбопроводи, чието унищожаване води до отделяне на високо- или средно активни радиоактивни среди.

Състоянието на метала на оборудването и тръбопроводите по време на производство и монтаж се следи и извършва с цел откриване на нецялостности и дефекти в основния метал и заварените съединения чрез методите за безразрушителен контрол (визуален, капиларен, магнитопрахов, ултразвуков, вихротоков, радиационен и др.) [1].

Безразрушително изпитване се извършва и по време на експлоатация, като правилата за прилагането му са регламентирани в държавни правила и норми [2].

Заварените съединения на оборудването и тръбопроводите на атомни електроцентрали с водни реактори, заварените съединения се класифицират в следните категории:

- а) I категория - заварени съединения на съоръжения и тръбопроводи от група А;
- б) II категория - заварени съединения на съоръжения и тръбопроводи от група В,

работещи в контакт с радиоактивна охлаждаща течност;

в) III категория - заварени съединения на съоръжения и тръбопроводи от група Б, които не работят в контакт с радиоактивен топлоносител, както и заварени съединения на оборудване и тръбопроводи от група С.

За откриване на повърхностни нецялостности на метала и заварените съединения се използва капиларен метод за контрол.

- **Видове несъвършенства /дефекти/ при заваряване чрез стопяване на металите**

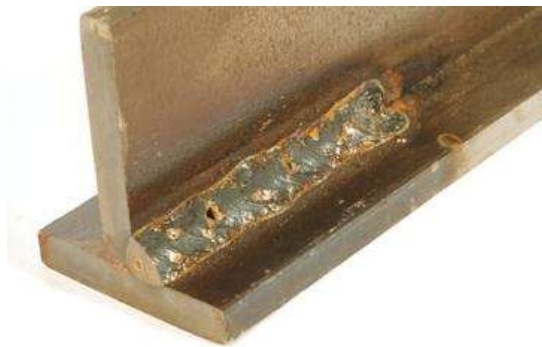
Дефект при заваряване, е всеки недостатък който компрометира производствения ресурс на изделието. Несъвършенствата се класифицират съгласно международния стандарт при заваряване ISO 6520-1.

Видовете нецялостности, които се откриват с капиларния контрол са повърхностни пори и пукнатини, непровар и др.



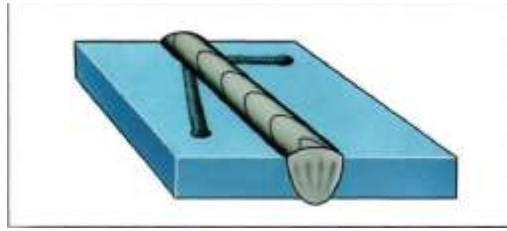
На фиг. 2 е показана пукнатина в заваръчен шев – вследствие на охлаждане или механично натоварване.

фиг. 2 [11]



На фиг. 3 е дадена повърхностна пора – разрушаване на повърхността на заваръчния шев, заради образуването на газов джоб.

фиг. 3 [10]



Фиг.4 [7]

Място на запалване на дъгата– увреждане на основния метал вследствие на запалване на дъгата (фиг.4) .

Капилярният метод се използва и за откриване на дефекти, възникващи по време на съхранение и експлоатация (напукване поради вътрешни напрежения, механични повреди, химическа или атмосферна корозия, пукнатини от уморен тип и др).

Корозионната умора е процес на разрушаване, при излагане на металите на химична или електрохимична корозия и циклично натоварване, тя възниква в парогенериращите тръби на барабанните котли, от комбинирания ефект на корозивна среда и редуващо се механично напрежение. При процеса на корозиране на метала се образуват ями, които служат като концентратори на напрежение.

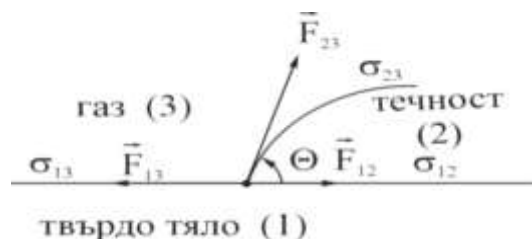
2. Физични основи на капиларния контрол

• Свойства на течности. Омокряне

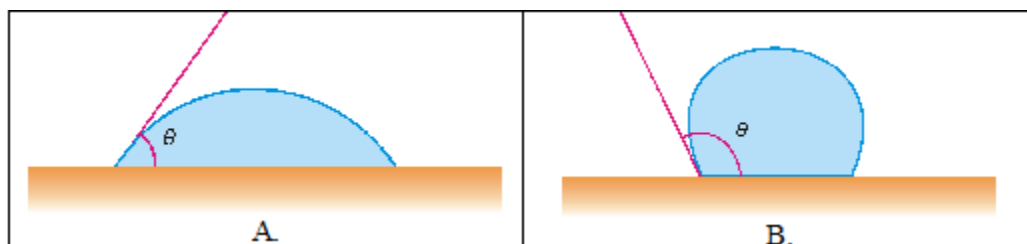
Прилагането на капиларния безразрушителен контрол е свързано с трите вида агрегатно състояние на веществото: твърдо, течно и газообразно. При явлението мокрене молекулите на течност докосват повърхността на твърдо тяло или на друга течност.

Взаимодействието на течности с твърди тела се разделя на два основни вида: мокреци и не мокреци.

Под мокрене се разбира междумолекулно привличане на трифазната граница (твърда – течна – газ), което се проявява като разтичане на течността по повърхността на твърдото тяло (фиг. 5). Капка от немокреца течност поставена върху повърхността на обекта не се разтича и запазва сферичната си форма. Силите в обема на течността са по-големи отколкото на граничната повърхност.



Фиг. 5 а [6]



Фиг. 5 б [14]

Всяка гранична повърхност има потенциална енергия и се характеризира с коефициент на повърхностно напрежение. За да се намира системата в механично равновесие, сумата от потенциалната енергия на граничните повърхности и гравитационната потенциална енергия на течността трябва да е минимална.

На фигура 5 е изобразено взаимодействието на капка течност с твърдо тяло.

Величините на повърхностното напрежение са $\sigma_{тг}$ (течност – газ) = σ_{23} , $\sigma_{твтг}$ (твърдо тяло – газ) = σ_{13} и $\sigma_{ттвт}$ (течност – твърдо тяло) = σ_{12} . Показани са и действащите сили в разгледаните случаи, ъгълът θ се нарича ъгъл на омокряне.

Условието за равновесието на капката върху повърхностите се записва с уравнение (1). За действащите сили на повърхностно напрежение в граничната точка може да се запишат зависимостите [5,6,7,8]:

$$\sigma_{твтг} = \sigma_{твтг} + \sigma_{тг} \cos \theta \quad [5,6,7,8] \quad (1)$$

където

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{твтг} - \sigma_{твтг}}{\sigma_{тг}} \quad [5,6,7,8] \quad (2)$$

Условието за равновесия на трите фази в зависимост от $\cos \theta$ е в интервала [0,1] е:

$$\frac{\sigma_{твтг} - \sigma_{твтг}}{\sigma_{тг}} \leq 1 \quad [5,6,7,8] \quad (3)$$

На /Фиг.5 б/ А– при $\theta < 90^0$ течността се нарича мокреща.

Пълно мокрене. Ъгълът на мокрене θ е равен на 0 / Фиг. 5б В/. Течността се разстила в много тънък слой. Равновесие между газ и твърдо тяло не съществува. Образуват се три последователни слоя твърдо тяло-течност-газ .

Непълно мокрене: Ако θ е в интервала $[0, \pi/2]$. Адхезионните сили преобладават над кохезионните.

В–при ъгли на мокрене по–големи от 90^0 , течността се нарича немокреща.

С повишаване на температурата се намалява коефициента на повърхностно напрежение, което подобрява мокрещето. Ъгълът, при който се получава добро омокряне е 0-10 градуса [6].

- **Повърхностно напрежение**

Повърхностното напрежение е мярка за вътрешните междумолекулни сили в течността – кохезионните сили. Тя е основна характеристика на пенетранта при капиларния контрол [6].

Повърхностното напрежение σ се определя като силата, която действа на единица дължина от разделящата граница [5,6,7,8] :

$$\sigma = F / l \text{ [N/m]} \quad (4)$$

Повърхностното напрежение може да се определя и като работата ΔA , необходима за образуването на повърхност ΔS от границата на разделяне [5,6,7,8]:

$$\sigma = \frac{\Delta A}{\Delta S} [\text{J/m}^2] \quad (5)$$

Методите за определянето му са делят на статични и динамични. Към първата група се отнасят методите на капилярно издигане, методът на Вилхелм, метод на висящата или летящата капка, а към втората група – метод на ДюНюи (откъсване на пластина, пръстен) методът на максималното налягане в мехур, на осцилираща струя, на въртяща се капка, на капилярни вълни и др. [5,6,7,8].

Причините за лошо омокряне са:

- ◆ Течността има голямо повърхностно напрежение (спрямо въздуха) и голяма кохезия. Образува капки на повърхността течност-твърдо тяло.

- ◆ Повърхността на твърдото тяло е в лошо състояние, замърсена, ръждива, омаслена, което влошава адхезията на течността към нея.

- ◆ Околният газ има голяма склонност към адсорбция, например агресивен, токсичен или корозионно действащ газ.

При капилярния контрол имат значение адхезионните явления на границата течност-твърдо тяло (пенетрант-повърхността на обекта за контрол) и твърдо тяло-твърдо тяло (замърсител във вида на твърдо тяло- контролирано изделие) [5,6,7,8].

- **Адхезия и кохезия**

Понятията са непосредствено свързани с омокрянето. Кохезията се измерва с работата, необходима за разрушаването на стълб с единица напречна повърхност от изследвания материал [5,7,8].

Адхезията е обвързана с работата за разрушаване на единица площ от междуфазовата граница на материалите, които са в контакт. При отстраняване на замърсители е необходимо да се намали адхезията, което се постига чрез използване на повърхностно активни вещества (ПАВ). Те се адсорбират на повърхностите на контролирания обект и на замърсяванията и се разтварят във вода.

Веществата, които разтваряйки се в течност повишават коефициента на повърхностно напрежение се наричат повърхностно пасивни.

Един пенетрант трябва да има добра омокряща способност, за да може да покрие цялата проверявана повърхност. Важно е да се почисти добре повърхността на твърдото тяло и да се избере подходящ пенетрант.

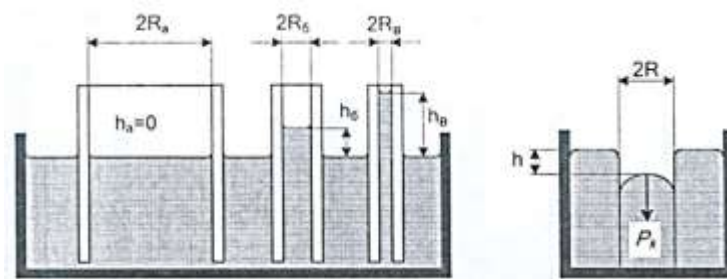
Маслата и органичните разтворители притежават сравнително малки кохезионни сили и са склонни към образуването на филм. Гликолят и др. алкохоли притежават висока адхезивна способност и добра кохезия. Подходящ ъгъл на омокряне се получава при добавяне на повърхностно активни вещества.

За провеждане на капиларен контрол и разпознаване на индикациите при капиларен контрол е важно максимално възможно количество пенетрант да проникне в нарушенията на повърхността на материала и след това при проявяването да бъде изтеглено обратно на повърхността. Количеството проникнала течност зависи не само от омокрянето на вътрешните стени на пукнатината, но и от кохезионните сили в пенетранта. Необходимо е пенетрантните течности да имат добро омокряне и подходящо повърхностно напрежение.

- **Капиларни явления. Капиларно налягане**

Проникващата способност на течности в тесни капилари пукнатини се описва с капиларния ефект [5-7]. Капиларни се наричат явленията, които са предизвикани от влиянието на повърхностното напрежение (т.е. молекулните въздействия) върху равновесието и движението на свободните повърхности на течностите, както и на границата течност-твърдо тяло.

Капиларът е тръба с малък диаметър (0.1 mm) . Ако потопим капилари с различни диаметри с единия край в течност, то течността навлиза толкова по-високо в тях, колкото е по-малък диаметъра им.



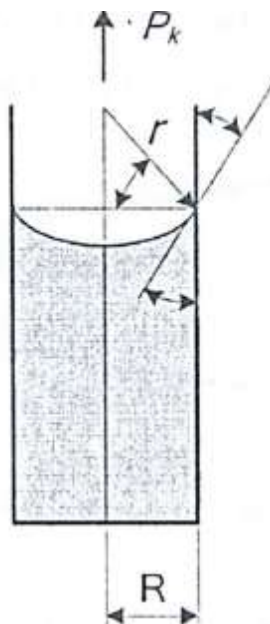
Фиг. 6 [7]

На Фиг. 6 е показано влияние на радиуса на капилара на височината на изкачване/понижаване на течностите, h_a , h_0 , h_b – височина на капиларно повишаване на нивото, R_a , R_0 , R_b – вътрешни радиуси на капиларните тръбички, а – мокреци течности, б – немокреци течности. [5,7]

На фиг. 7 е показан капиляр със радиус R потопен в съд с мокреща течност. Капилярното налягане P_k е равно на отношението на действащата механична сила, отнесена към площта на капиляра. Капилярното налягане се представя със зависимостта на Лаплас:

$$P_k = \frac{2\sigma \cos Q}{R} \quad [5,6,7,8] \quad (6)$$

Капилярно налягане е разликата между налягането от две страни на изкривената повърхност на фазовата граница течност – газ или между две течности, които се намират в капиляра.



Фиг. 7 [7]

Капилярното налягане, от което зависи запълването на пукнатините с индикаторна капилярна течност, зависи от омокрянето на стените на дефекта, от повърхностното налягане на течността и от широчината на пукнатината.

Омокрящите течности могат да запълват тесни кухини с произволна форма при условие, че размерите им са толкова малки, че се образуват повърхност с непрекъсната кривина – менискус. По този начин под действието на капилярните сили става запълването на пукнатини или други дефекти от проникващата течност. Въздухът в кухините частично се изтласка или разтваря в течността.

Капилярното налягане е по-голямо, колкото е по-добро омокрянето, по-ниско повърхностното налягане на течността и колкото е по-малка широчината на пукнатината [5,6].

- **Разтваряне**

Разтварянето представлява сложно физико-химично явление, при което молекулите на разтваряното вещество се разпределят между молекулите на разтворителя. Разтварянето е пълно (неограничено) с образуване на еднороден стабилен разтвор или непълно (ограничено) с образуване на утайки на веществото, което се разтваря. Интензифициране на процеса на разтваряне на течности се постига при по-високи температури, при силно диспергиране на частиците на разтваряното вещество, при използване на химически еднородни вещества, при вибрационни и ултразвукови въздействия.

- **Диспергиране и емулгиране**

Диспергирането представлява самопроизволно или под външно въздействие издребняване на твърди и течни тела в течност, при което рязко се повишава междуфазовата повърхност. Този процес е характерен при предварително почистване на контролираната повърхност от твърдотелни прахообразни замърсители.

Интензифицирането на процеса се постига при използване на повърхностно активни вещества, вибрации, активно движение на миещата течност, ултразвукови трептения.

Емулгирането представлява процес на диспергиране на една течност в друга. За стабилизиране на емулсиите се използват емулгатори (течни, прахообразни). Емулгирането е основен технологичен процес при отстраняване на маслени замърсители от контролираната повърхност, както и при междинно почистване на неводосъдържащи пенетранти. При емулгирането се образуват водосмиваеми разтвори, лесно отстраними с водна струя. При използването на емулгатори се постига по-малко измиване на пенетранта от нецялостността и повишена чувствителност на контрола.

- **Дифузия. Дифузионно пропиване**

Дифузията играе важна роля при запълване на едностранно открит капиляр. В края на нецялостността, под действие на капилярното налягане, се събира определено количество газ под налягане. За сметка на дифузията, част от този сгъстен въздух,

вследствие на разликата в наляганията в дъното и в устието на нецялостността, дифундира и се постига допълнително запълване на обема с пенетрант. Този процес се нарича дифузионно пропиване [5,7].

Дифузионните процеси се наблюдават и при използване на проявители на основата на суспензии или бои и лакове. Отначало протича взаимна дифузия на пенетранта в течната фаза на проявителя. След изсъхване на проявителя, пенетрантът, поради капилярното налягане, прониква във вече формираната пориста структура.

В механизма на проявяването съществена роля играят сорбционните процеси. При проявяването извлечената от кухината индикаторна течност трябва да се разпростространи в проявителя над дефекта, като образува индикаторна следа, по-голяма по размери от дефекта.

Скоростта на сорбционните процеси зависи от скоростта на дифузия на проникващата течност в слоя проявител, а количеството на дифундиращото вещество m , преминало през площадката F за време $\Delta\tau$ се изразява чрез закона на Фик [5,8]:

$$dm = D \frac{c_1 - c_2}{l} dF \cdot d\tau \quad [5,7,8] \quad (7)$$

D -коефициент на дифузия, c_1 и c_2 са концентрациите на проникващите течности в двата слоя проявител, които се намират на разстояние l един от друг.

- **Хидродинамика на запълване на проходен капиляр**

Обект на капилярния контрол са проходни и непроходни нецялостности с излаз на повърхността. Проходните нецялостности са обект на контрола на херметичност. Запълването на нецялостностите с пенетрант и извличането му се подчиняват на различни закони [5,7].

В този случай капилярът има изход към двете повърхности на обекта и запълването му може да бъде двустранно. Зависимостта на дълбочината на проникване l на пенетранта в капиляра от времето t се представя със зависимостта [5]:

$$l^2 = \frac{R\sigma c}{2\eta} t \quad [5,7,] \quad (8)$$

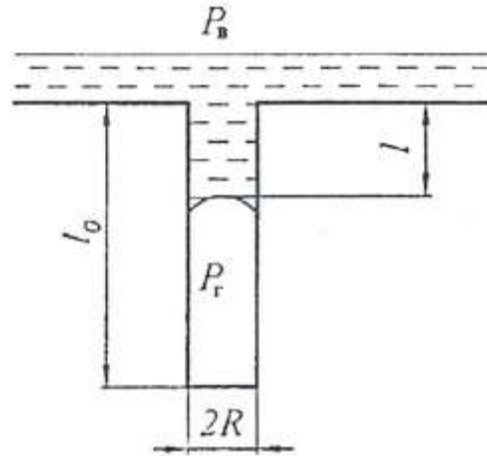
където η е динамичния вискозитет, σ – повърхностно напрежение, θ – ъгъл на мокрене, R – радиус на капиляра.

В случая на капиляр с разстояние H между успоредните му стени [7]

$$l^2 = \frac{H\sigma\cos}{3\eta}t \quad [7] \quad (9)$$

- **Запълване с течност на непроходен капиляр**

Запълване на непроходен капиляр с течност е представено – Тук R е радиуса на капиляра, P_r налягането на газа в дъното на капиляра, l_0 – дълбочина на капиляра, l – текуща дълбочина на проникване, P_b – налягане на повърхността на изделието, създадено от пенетранта.



Фиг. 8 [7]

Процесът на запълване на капиляра протича на два етапа. Отначало, под действие на капилярното налягане, пенетрантът бързо постъпва в капиляра до достигане на дълбочина l . Тук процесът практически спира поради компенсиране на налягането от пенетранта от налягането на компресирания въздух в дъното на капиляра. На втория етап запълването на капиляра протича чрез дифузия, като въздухът постепенно се разтваря в пенетранта и излиза от капиляра. Част от останалия въздух в капиляра спомага за протичане на процеса на проявяване при формиране на индикаторни следи.

Максималната дълбочина на запълване на цилиндричен капиляр l се пресмята по зависимостта [7]

$$l = l_0 \frac{P_k}{P_k + P_a} \quad [7] \quad (10)$$

Където P_k е капилярното налягане, P_a е атмосферното налягане, l_0 е дълбочината на капиляра. За цилиндричен капиляр с радиус R скоростта на запълване на капиляра v_{cp} се определя от [5,7,8]:

$$v_{cp} = \frac{dl}{dt} = \frac{R^2}{8\eta} \left(\frac{2\sigma \cos \theta}{R} - \frac{P_a l}{l-l_0} \right) \quad [5,7] \quad (11)$$

Времето t за запълване на капиляра на зададена относителна дълбочина $\varepsilon = l/l_0$ се пресмята по зависимостта [7]

$$t = \frac{4nl_0^2\Psi}{R\sigma \cos \theta} \left[\frac{\varepsilon^2}{2} - (1 - \Psi) \left(\varepsilon + \ln \frac{\Psi - \varepsilon}{\Psi} \right) \right] \quad [5,7] \quad (12)$$

$$\Psi = \frac{p_k}{P_a + p_k} \quad [5,7] \quad (13)$$

За капиляр с успоредни стени, на разстояние H една от друга, средната скорост, максималната дълбочина и времето за проникване се пресмятат по зависимостите за средната скорост на проникване [7]

$$v_{cp} = \frac{H^2}{12\eta l} \left(\frac{2\sigma \cos \theta}{H} - \frac{P_a l}{l_0 - l} \right) \quad [7] \quad (14)$$

за максималната дълбочина на проникване [8]

$$l_{\infty} = \frac{25 \cos \theta}{p_k + P_a} \quad [7] \quad (15)$$

за времето за достигане на зададена относителна дълбочина $\varepsilon = l/l_0$

$$t = \frac{G\mu l_0^2\Psi}{H\delta \cos \theta} \left[\frac{\varepsilon^2}{2} - (1 - \Psi) \left(\varepsilon + \Psi \ln \frac{\Psi - \varepsilon}{\Psi} \right) \right] \quad [7] \quad (16)$$

При използване на вода и пенетрант запълването на капиляра до $\varepsilon < 0.9$ се осъществява за 1 s. В практиката продължителността на проникването е от порядъка на 10 ÷ 60 min, в зависимост от материала и пенетранта, формата на капиляра, качеството на повърхността на стените. Забавянето е свързано с протичане на дифузионни процеси на разтваряне на компресиран газ в пенетранта.

- **Хидродинамика на пенетранта при проявяване на нецялостности**

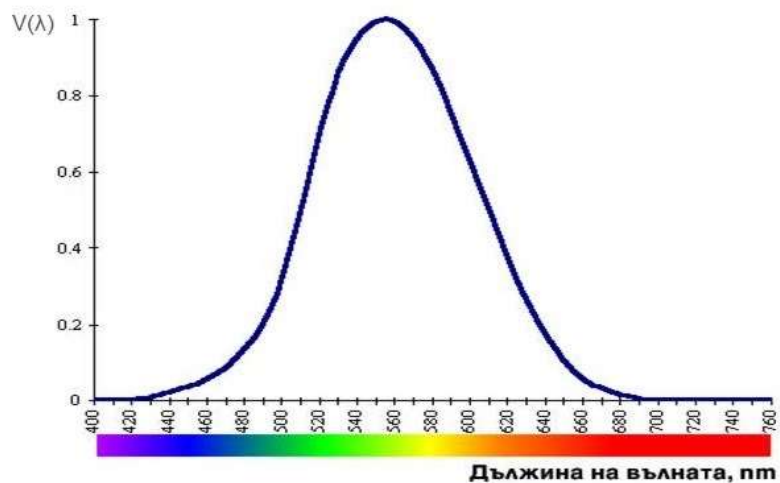
Целта на процеса на проявяване е чрез нанасяне на тънък слой проявител да се извлече пенетрантът, който е останал в нецялостността след междинно почистване. При използване на проявител на основата на прахови частици извличането се реализира на два етапа. При първия етап се наблюдава капилярно проникване на пенетранта в проявителя. Този процес е краткотраен и протича под действие на капилярното налягане в порестия слой на проявителя [7,8].

- **Цветови и яркостен контраст**

Цветовият контраст е свързан с особеностите на човешкото око да регистрира цветни, тъмни или флуоресциращи индикации на светлия фон на проявителя.

Чувствителността на зрението по отношение на излъчването на различни дължини на вълните не е еднаква. При нормално осветяване има най-голяма стойност при жълто-зелената светлина с дължина на вълната 550 nm, условия, които се реализират при луминесцентен капилярен контрол [6].

Регистрирането на индикаторните е в пряка зависимост от остротата на зрението, адаптацията на зрението (повече от 60 мин), цвета и яркостта на обекта и фона, размерите на обекта, особеностите на окото, яркостта на източника на светлина.



Фиг. 9 Относителна спектрална чувствителност на зрението [12]

- **Луминесценция**

Под луминесценция се разбира способността на някои вещества да излъчват светлина с дължина на вълната в определен спектрален диапазон с интензивност, по-голяма от тази на инфрачервеното излъчване и с продължителност над 10^{-10} s при поглъщане на енергия [8]. При поглъщане на енергията атомите се възбуждат и преминавайки във основно състояние, те излъчват електромагнитни вълни във видимата част на спектъра.

Пенетрантите са сами луминофори или в течната основа на пенетранта се разтваря луминофор. Чрез луминесцентния РТ се постига увеличаване на контраста при визуално

наблюдение. Светлината е с жълто-зелен цвят с максимално излъчване в диапазон на дължина на вълната от 500 до 600 μm , с максимум при 365 μm [6,7].

Изискванията за осветеност при луминесцентен контрол са представени в БДС EN ISO 3059.

Явлението, когато в случаите се прекратява луминесценцията, след окончателното прекратяване на възбуждането на атомите, се нарича флуоресценция. Явлението, при което се запазва луминесценцията след прекратяване на възбуждането на атомите, се нарича фосфоресценция. Възбудената луминесценцията под действие на светлина се нарича фотолуминесценция, под действие на електрическо поле – електролуминесценция, под действие на химически възбудители – хемилуминесценция.

- **Класификация на капилярните методи (РТ)**

В зависимост от проникващите течности (пенетранти) и проявяващите вещества **капилярните** методи могат да се класифицират както следва:

1. Луминесцентен метод – при него се регистрира луминесцираща индикаторна течност в UV- светлина;
2. Цветен метод – регистрира се цветен контраст при видима светлина;
3. Яркостен (ахроматичен метод) – с регистрация на ахроматична индикаторна следа във спектъра на видимата светлина;

Тези методи са добили най-голяма популярност в практиката, поради простотата си и невисока цена на контрола.

За капилярния контрол е необходим източник на видима или ултравиолетова светлина (при луминесцентен контрол). При работа на открито може да се използва слънчева светлина. При необходимост се използва изкуствена светлина. При капилярнен цветен контрол осветеността е в границите на 500-1000 lx. Тези стойности се отнасят за нормирано разстояние от 400 mm [6] .

При флуоресцентните методи се използва ултравиолетова светлина с дължина на вълната 315-380 nm тя се нарича UV-A светлина. Интензивността на светлината в мястото на разполагане на обекта на контрол е в границите 5-20 W/m².

3. Технологии и процедури за капиларен контрол

Капиларният контрол се изпълнява по одобрена писмена процедура/технология съгласно нормативния документ БДС EN ISO 3452-1.

- Основните операции при РТ са:
 - Предварително почистване на обекта

Замърсители, като ръжда, масло, смазка, боя и др. трябва да се отстранят, ако е необходимо чрез механични или химични методи. Почистената повърхност трябва да е голяма, за да се предотврати влиянието от зони, съседни на изпитваната повърхнина.

Замърсителите могат да се отстранят чрез полиране, шлифване, струйна обработка с вода под високо налягане и т.н.

Процесът на почистване завършва с изсушаване на изделието и довеждането му до температури $10 \div 40^{\circ} \text{C}$, както са условията за прилагане на РТ, съгласно БДС EN ISO 3452-1.

Предварителната подготовка за контрола включва, също така:

- подготовка на материалите, които ще се използват, съгласно БДС EN ISO 3452-1
- подготовка на уреди за провеждане на контрола и проверка на съответствието им с изискванията, като на проверка подлежат лампи с изкуствена бяла или с ултравиолетова светлина, устройства за нанасяне на проявителя чрез, поливни устройства съгласно БДС EN ISO 3452-2,
- подготовка за работа, когато контролът се провежда в лаборатория, в която са изпълнени условията за осветеност, вентилация, средства за измиване, осветление и др.
 - Запълване на нецялостностите с пенетрант

Основно се използва капиларен метод, който осигурява самопроизволно запълване на нецялостностите с пенетрант чрез напръскване, потапяне, пулверизиране с използване на инертни газове и др.

При запълването на нецялостностите, трябва температурата на контролирания обект да бъде в границите $10 \div 50^{\circ}\text{C}$, в случаите когато се използват материали, които са по изискванията на БДС EN ISO 3452-2. Когато се работи при по-високи или при по-ниски температури се спазват изискванията на производителя и изискванията по БДС EN ISO 3452-5 и БДС EN ISO 3452-6.

Продължителността на запълване на нецялостностите обикновено е в границите от 5 до 60 min и зависи от материала на изделието, свойствата на пенетранта, очакваните размери и грапавостта на нецялостността.

- Отстраняване на проникващата течност

Извършва се веднага след момента на окончателното проникване на пенетранта, преди нанасяне на проявителя, чрез измиване – снемане на пенетранта механично, почистване със специален състав, почистване със салфетка, с или без използване на миешки средства, вода или разтворители и др.

При използване на водосмиваеми пенетранти, обикновено, обектът се измива с вода (с температура по-малка от 30°C) и се изсушават при температура над 70°C.

Отстраняването на излишния пенетрант се извършва по начините, представени по-долу:

- за флуоресциращи течности се наблюдава с UV-A светлина при интензитет на светлината не по-малко от 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ и видима светлина в затъмнена стая не повече от 20 lx.

- при цветни пенетранти се наблюдава остатъци от пенетранта върху бели салфетки.

Процесът на отстраняване на пенетранта от обекта завършва с изсушаване, с изключение на случаите когато при проявяване се използват проявители на водна основа.

Препоръчва се подсушаването да се реализира по следните начини:

- избърсване с чист, сух, немъхест плат,
- изсушаване при температура на околната среда,
- изсушаване при повишена температура,
- чрез въздушна циркулация.

Температурата на обекта за контрол след изсушаването не трябва да превишава 50°C [7] .

- Нанасяне на проявителя

В зависимост от типа на проявителя (суспензия, прах) се използват следните методи:

- пулверизиране

- електроразпрашаване
- чрез създаване на въздушен облак от сух проявител в специални камери
- потапяне в праха на проявителя
- обливане
- посипване и др.

Дебелината на слоя проявител да не надвишава 100 μm . Продължителността на процеса на проявяване е от 15÷60 min. съгласно БДС EN ISO 3452-1. Препоръчителни времена за проникване и проявяване са представени на таблица 1.

Таблица 1 [6,7]

Материали	Изделия	Вид дефект	Време за проникване, min	Време за проявяване, min
Стомана, алуминиеви сплави, месинг, бронз	Заварки, отливки	пукнатини	10÷15	15÷20
пластмаси		пукнатини	5÷70	10÷30
Керамични изделия		Пори, пукнатини	5÷15	5÷10

Материали за РТ

Материалите, използвани при реализация на РТ са: материали, използвани при почистване на обекта за контрол, материали за междинно почистване (включително и емулгатори), проявители, материали за окончателно почистване на остатъците от РТ, материали за консервиране на обекта.

На таблица 2 е показана класификация на материали за РТ.

Таблица 2 [6,7]

пенетрант	Чистител, гасител	Проявител
луминесцентен	вода	Сух прах–сорбционен
Цветен–контрастен	Емулгатор на органична основа	Проявител на водна основа
Цветен–ахроматичен	разтворител	Суспензия на основа на разтворител
Цветен–филтрираща суспензия	Вода с разтворител	Проявяваща лента
Луминесцентен–филтрираща суспензия	Гасител, разтворим във вода	На основата на водна суспензия

Фирмите, производители на средства за капиларен контрол, предлагат следните материали за предварително почистване, пенетранти, емулгатори за междинно почистване, проявители и др.

Фирмените средства се предлагат във вид на флакони под налягане или в опаковки, в зависимост от потребностите на дефектоскопистите и задължително имат сертификат за чувствителност, който е въз основа на нормативен документ EN 3451-3. Популярни и често използвани материали са на фирми MR CHEMIE, CHEMETALL, Diffuterm, Karl Deutsch, Magnaflux и др. На фиг.10 е показан комплект материали за провеждане на капиларен контрол /почистващо средство, пенетрант, проявител/ от фирма Вуcotest.



Фиг. 10. Комплект материали за провеждане на капиларен контрол /почистващо средство, пенетрант, проявител/ [9]

При необходимост може да се направи подходяща проникваща течност, като всяка от съставките трябва да има подходящи стойности на повърхностно напрежение и вискозитет.

Препоръчва се използването на следните състави на цветни и луминесциращи пенетранти [8]:

- Бензол 95, трансформаторно масло 5, суданова боя 10 g/ l
- Газ 70, трансформаторно масло 30, суданова боя 2 g/l
- Газ 80, терпентин 20, суданова боя 15 g/l
- Газ 20, бензин 30, терпентин 50, суданова боя 5 g/l и др.

Пенетранти луминесциращи:

- Газ 50, бензин 25, трансформаторно масло 25, дефектол 0.03
- Газ 75, масло 15, бензин 10, дефектол 0.2 g/l, емулгатор 0.3 g/l

Като проявители се препоръчва използването на следните рецепти [7,8]:

Проявител Силикагел 150 g/l, вода

Проявител Спирт етилов 50, вода 50, каолин 100 g/l

Проявител Спирт етилов 100, каолин 350 g/l

Проявител Нитроемайл 30, медицински колодий 40, ацетон 30

Проявител Колодий 60, бензол 40, цинково белило 50 g/l

- **Оценка на качеството на материалите за РТ чрез сравнителни и контролни образци по БДС EN ISO 3254-3**

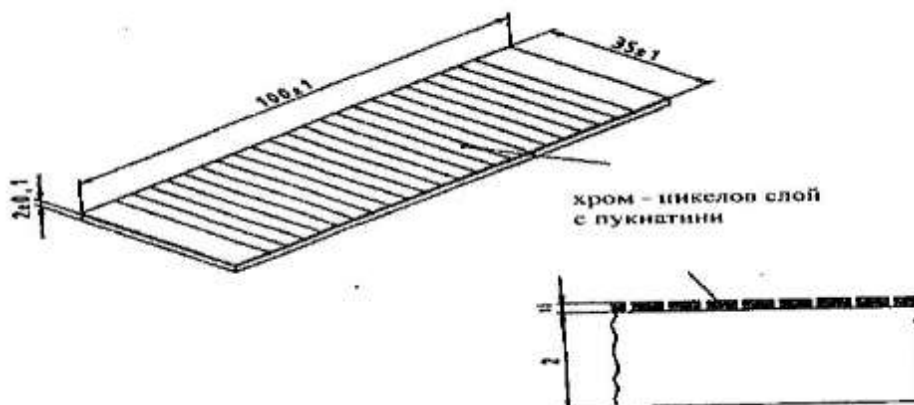
Сравнителен образец 1 (по БДС EN ISO 3254-3), представлява бронзова пластина с размери 100 x 35 x 2 mm с нанесено хром-никелово покритие с инициирани пукнатини при изпитване на опън на пластината. Дълбочината на пукнатините се определя от дебелината на покритието. Поради крехкостта на хромовото покритие могат да бъдат създадени пукнатини чрез изпитание на опън. Дебелината на покритието е от 10, 20, 30 и 50 μm , с разкритие на пукнатините от порядъка на 1/20 от дебелината. При работа трябва да се спазват изискванията [6]:

да не се загрява повече от 100°C

да не се нарушава механически повърхността, където са пукнатините,

да не се пипа с ръце, особено в случаите, когато е нанесен проявител,

да се съхранява след почистване при подходящи условия.



Фиг. 11 [6]

Чувствителността на системите за капиларен контрол (пенетранти, разтворители, емулгатори, проявители) се проследява с контролен образец 1. За системи с флуоресцентен контрол се използват пластини с дълбочина на пукнатините 30µм, 20µм, 10µм и класове на чувствителност клас 1 (нормална), клас 2 (висока), клас 3 (свръхвисока).

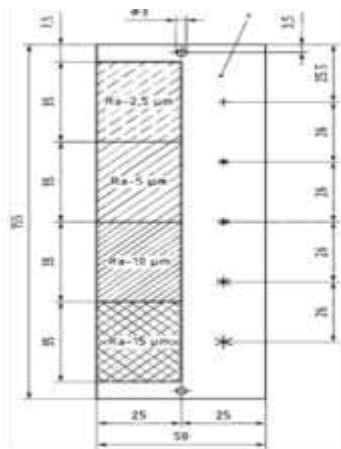
При цветен капиларен контрол класовете на чувствителност са 2: клас 1 (нормална) и клас 2 (висока). Използват се пластини с дълбочина на пукнатините 30 µм и 50µм.

Сравнителен образец 2 (по БДС EN ISO 3254-3)

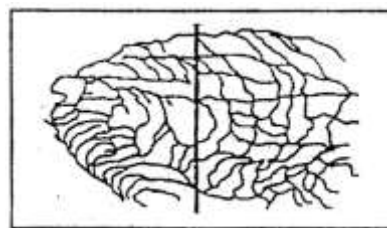
Използва се за периодичен контрол на пенетранти. Това е плочка с размери 155 x 50 x 2.5 mm от стомана X3CrNiMo17-12 с изходна твърдост HV 20 ÷ 150 ± 10.

По дължината му са изработени четири полета с различна грапавост на повърхността Ra = 2.5, 5.0, 10.0, 15.0 µm. Върху втората част е нанесено крехко покритие (дебелина 60 µm ± 3 µm и твърдост HV02 = 500÷600) от никел, върху който е нанесен слой от хром (с дебелина 0.5÷1.5 µm ± 3 µm и твърдост HV03 = 900÷1000). Краината грапавост е Ra = 1.2÷ 2.0 µm. Върху хром-никеловото покритие чрез сферични индентори с различен диаметър и с различна сила са инициирани пет серии от радиални пукнатини с променящи се дълбочини. Смята се, че най-висока чувствителност се постига при използване на материали за капиларен контрол, които позволяват получаване на индикаторни следи от първите четири групи пукнатини.

Получените резултати при използване на сравнителните образци се използват за определяне на класа на чувствителност на използваната група материали за РТ.



Фиг.12 Сравнителен образец 2 [6]



Фиг.13. Сравнителен образец по ASME V.6

Образецът по ASME V.6 е предназначен за сравнение на индикаторната способност на два набора за капиларен контрол, единият от които е референтен.

Образецът е от дурал, с размери 50 x 80 mm, разделен по средата с прорез. На двете части независимо се нанасят материалите от двете продуктови групи. Пукнатините са разположени върху двете повърхности. Индикаторните следи се различават по характеристиките си – на едната повърхност са по-силно изразени.

Образецът е годен за използване около 20 пъти. След това е необходимо почистване. Препоръчва се да се потопи във вана с бензин или ацетон за поне час или почистване в ултразвукова вана.

Образецът се изработва от дурал, а пукнатините в него се образуват посредством термично въздействие.

- **Оценка на резултатите от капиларния контрол**

Условията за наблюдение на контролирания обект при капиларен контрол са дадени в БДС EN ISO 3452-1 и БДС EN 3059. Наред с визуалното наблюдение, регистриране на индикаторната следа се постига с използване на фотографски, телевизионни и други методи.

В различни нормативни документи се препоръчва използване на различни класификации на индикаторни следи:

- по локализация – единични, групови, разпределени по цялата повърхност,
- по ориентация – надлъжни, напречни или под ъгъл към зададена посока,
- по допустимост – допустими (поправими) и недопустими.

Провеждането на контрола и нивата на приемане на контролираните заваръчни шевове е регламентирано в БДС EN ISO 23277.

Таблица 3 [7]

Видове индикации	Нива на приемане		
	1	2	3
Линейни с дължина l, mm	≤ 2	≤ 4	≤ 8
Нелинейни с основен размер d, mm	< 4	< 2	< 8

В таблица 3 са представени нивата на приемане според БДС EN ISO 3452-1 на заваръчни шевове.

4. Провеждане на капилярнен контрол в АЕЦ

Заварените съединения и основният метал на съоръженията по първи и втори контур на АЕЦ се контролират регулярно, на период от 4 до 6 години. Контролът се провежда с цел своевременно откриване на нецялостности по повърхността на контролирания обект и, съответно, констатиране на тяхното местоположение. Големият брой обекти и ограниченото време за работа в контролираната зона са фактори, които налагат прилаганите методи за капилярнен контрол да са продуктивни и сравнително бързи, да дават информация за състоянието на повърхността на метала [13].

Оборудването и тръбопроводите в АЕЦ са подложени на термодинамично натоварване и за продължаване на тяхната работоспособност се обследва физическо им състояние и се прави оценка на ресурсните им характеристики. За целта се използват данните от регулярния капилярнен контрол на метала и заварените съединения, а също така се назначава допълнителен контрол на полярния кран, на презареждащи машини, на подземни тръбопроводи и др. Контролът е важен за констатиране на наличието или на липсата на дефекти в метала и за определяне на настъпили евентуални изменения – например уякчаване и загуба на пластичност вследствие на радиационно натоварване, ерозионно-корозионно износване, породено от действието на флуида, което зависи от неговия състав и скорост [13].

Всички методи за контрол в АЕЦ “Козлодуй” се провеждат съгласно изискванията на процедури за контрол, разработени от ОКС-ИЦ ДиК, от сертифициран и компетентен персонал и с метрологично осигурени технически средства за контрол съгласно ISO 9712. Резултатите от контрола се оформят в доклади, които се предоставят на другите звена от атомната централа и служат като основание при определянето на обхвата и обема на ремонтните дейности на контролираните съоръжения и за планиране на последващия експлоатационен контрол [13].

Контролът на електродъгово заварени съединения в АЕЦ е регламентиран в документ РБ-090-14 [15].

Препоръчва се капилярният контрол да се извършва в зоната на завареното съединение и около нея :

–зоната на капилярнен контрол е равна на дебелината на заварката, от всяка страна

–при ъглови съединения до 3 mm, от всяка страна

При изработване и ремонт на елементите в АЕЦ са в сила изискванията:

–на оценка подлежат дефекти, при които индикаторната следа е по–голяма от 1mm,

– за тръбопроводите, работещи под налягане по–голямо от 2.2 МРа, по данни от регистрираните индикаторни следи, не се допускат:

пукнатини и нецялостности, при които дължината е 3 пъти по–голяма от ширината; нелинейни нецялостности с размери над 5 mm; 4 или повече нелинейни нецялостности, разположени на една линия с разстояние между тях 1.5 mm; 10 и повече нелинейни нецялостности на площ 40 cm² с минимална дължина на участъка 10 cm [15].

При капилярн контрол на антикорозионно покритие в АЕЦ, след регистриране на индикаторните следи:

–се допускат единични пори и шлакови включвания с размери по–малки от 1.5 mm; до 4 дефекта на участък с размери 10 x 10 cm и не повече от 8 на участък с размери 20 x 20 cm.

– Не се допускат: линейни дефекти с отношение дължина/ширина ≥ 3 ;пукнатини в наплавката и нелинейни кратери.

При ремонт в АЕЦ са в сила следните изисквания, на основата на измерванията на индикаторните следи:

– допуска се наличие на нелинейни следи, при отсъствие на линейни;

– допускат се нелинейни индикаторни следи, с различни размери в зависимост от дебелината на обекта, като за всяка дебелина има и норма за допустимото им количество;

– допускат се единични следи.

Индикаторни следи с размери ≤ 0.6 mm не се отчитат и не се включват в доклада от контрола [15].

Препоръчва се използването на контролни сравнителни образци, препоръчани по [15], които представляват стоманени пластини с изкуствена, единична непроходна пукнатина с ширина, съответстваща на изисквания клас на чувствителност. Използват се два контролни образца (работен и арбитражен). Препоръчват се и образци от стомана 41X13 / ЭИ-962 (1X12Н2ВМФ)/ с размери 110 x 3 mm. По дължина на образца се подготвя заваръчен шев. Образците се огъват до поява на пукнатина в шева.

Чувствителността на РТ контрол се оценява чрез размерите на линейна пукнатина с дължина ≥ 3 mm. Приети са три класа на чувствителност, представени в таблица 4.

таблица 4

Клас на чувствителност	Разкритие на пукнатини, μm
I	< 1.0
II	$1 \div 10$
III	$10 \div 100$

Ако няма специални изисквания в АЕЦ, РТ на изделията се извършва при чувствителност II клас.

4. Заключение

В дипломната работа е подготвен литературен обзор върху капиларния метод за БК за откриване на повърхностни дефекти.

Разгледани са приложенията на капиларния метод за контрола на заварени съединения в АЕЦ.

12. https://edu.uni-sz.bg/book/24.AF_Fizika%20s%20osnovi%20na%20biofizikata-StAtanasova/moit-6.12.html
13. https://energia.elmedia.net/bg/2016-4/editorials/контрол-и-техническа-диагностика-в-аец-козлодуй_01258.html
14. https://edu.uni-sz.bg/book/24.AF_Fizika%20s%20osnovi%20na%20biofizikata-StAtanasova/moit-3.1.html
15. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Капиллярный контроль»