

МЕРКИ ЗА ОГРАНИЧАВАНЕ НА КОРОЗИЯТА НА МЕТАЛНИ ТРЪБИ В ПРЕЧИСТВАТЕЛНА СТАНЦИЯ ЗА ИНФИЛТРАТНИ ВОДИ

Петя Генчева¹, Теодора Христова²

¹ Минно-геоложки университет „Св. Ив. Рилски“, София 1700, Студентски град, p.gench@gmail.com

² Минно-геоложки университет „Св. Ив. Рилски“, София 1700, Студентски град, teodora@mgu.com

РЕЗЮМЕ. Изследвана е корозия на стоманени тръби, работещи в пречиствателна станция за инфилтратни води на територията на ОП „СТОЛИЧНО ПРЕДПРИЯТИЕ ЗА ТРЕТИРАНЕ НА ОТПАДЪЦИ“ район Садина. Определени са основните корозионно-действащи агенти, чрез проведения химичен анализ и рН на инфилтратните води. На база на инспекция на съоръженията и анализ на повърхността на стоманените детайли може да се приеме, че преобладава обща корозия (съгласно типа на разрушение) и електрохимична корозия с кислородна деполяризация (съгласно механизма на корозия). Предложени са мерки за ограничаване на корозията, съобразени с условията на експлоатацията им. Проучени са методите за мониторинг на състоянието на металните съоръжения и на средствата за защитата. Получените резултати и предоставената научно-приложна информация ще подпомогнат превенцията на корозионните процеси и ще ограничат преждевременното излизане от експлоатация на апаратурата, ще допринесат за намаляване на престойте при аварии и предотвратяване на финансови загуби.

Ключови думи: стоманени тръби, корозия, мониторинг за борба с корозията.

MEASURES TO REDUCE CORROSION OF METAL PIPE TREATMENT PLANTS INFILTRATED WATERS

Petya Gencheva¹, Teodora Hristova²

¹ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, p.gench@gmail.com

² University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, teodora@mgu.com

ABSTRACT. Studied corrosion of steel pipes operating in purification station for infiltrated water in the „Municipal enterprise for waste treatment“. Defined are the major corrosive agents, by conducted by chemical analysis and pH. Based on the inspection of equipment and surface analysis of steel parts can be assumed that the predominant uniform corrosion (according to the type of destruction) and electrochemical corrosion with oxygen depolarization (according to the mechanism of corrosion). Proposed methods to limit corrosion, comply with conditions of their operation. Proposed methods for monitoring of metal, equipment and protection. Results from scientific practical information will help prevent processes of corrosion and reduce untimely damage to the equipment will help reduce downtime in emergencies and prevent financial losses.

Keywords: steel pipe, corrosion monitoring to combat corrosion.

Увод

Корозионното разрушение при металите е следствие на деструктивни изменения на структурата на метала под въздействие на агресивни среди. Агресивната среда взаимодейства с материалите и ги разрушава в резултат на физични, химични и физико-химични процеси. С развитието на промишления потенциал и увеличаване на масата на използваните в света метали нарастват и загубите от корозия. Темповете на увеличаване на корозионните загуби във всички страни обаче започнаха да изпреварват темповете на нарастване на металния фонд. Така например в САЩ общите загуби от корозия за 20 години (от 1955 до 1975) са се увеличили 7-8 пъти, докато производството на стомана за същия период е нараснало само с около 20%. Подобно е положението и в другите промишлено развити страни. На първо място това се обяснява с измененията в самата структура на металния фонд. През последните 30 - 40 години особено силно се развиха такива металоёмки промишлени отрасли като

химическата, нефтохимическата, целулозно-хартиената, нефтодобивната и газодобивната промишленост, цветната и черната металургия, топло- и атомната енергетика, авиацията, ракетостроенето и др., за които са характерни силно агресивни среди, високи температури, налягания и скорости на потоците, т.е. фактори, способстващи за развитието на корозионните процеси. За тези отрасли корозионната устойчивост на конструкционните материали определя до голяма степен надеждността и срока за експлоатация на технологичното оборудване и гарантира непрекъснат производствен процес. Така например в химическата промишленост корозията е причина за около 60% от случаите на преждевременно излизане на оборудване от строя, а относителният дял на корозионните загуби в този отрасъл е около 3 пъти по-висок от средния за цялото национално стопанство. Освен това корозията на металите при естествени условия, където се експлоатира по-голямата част от металния фонд, става все по-интензивна поради нарастващото замърсяване на атмосферата, почвата и водите с корозионноактивни

вещества и промишлени отпадъци. Не на последно място причина за увеличаване на абсолютната стойност на корозионните загуби са и растящите цени на металите, което е свързано с поскъпването на суровините и енергията в световен мащаб.

Обект на изследване

Обект на разглеждане са стоманени тръби на територията на пречиствателна станция за инфилтратни води при ОП „СТОЛИЧНО ПРЕДПРИЯТИЕ ЗА ТРЕТИРАНЕ НА ОТПАДЪЦИ“ в местността „Садина“. Причините за корозия са различни: корозионно действащите агенти на средата, време/температурните разлики вследствие смяна на сезоните, атмосферата с богато съдържание на йони действащи агресивно на повърхностите слоеве на металните детайли. Съоръженията работещи на територията на пречиствателната станция са изложени на въздействието на среда с богато съдържание на азот амониев ($\text{NH}_4\text{-N}$), органичен въглерод, сулфати, хлорид и кислород, което в съчетание с наличие на деполяризатори от въздуха създава условия за ускоряване на процесите окисление и възникване на оксидна покривка със слаби защитни свойства. В статията са предложени мерки за намаляване на корозионните разрушения и контрол на състоянието на тръбопровода въз основа на анализ на възможните корозионни поражения. По протежението си тръбопроводът преминава и през инфилтратните води и в пространства на водосборните басейни.

Видове корозионни поражения

В процеса на пречистването на инфилтратна в пречиствателната станция стоманените тръби и метални детайли работещи в близост или в пряк контакт с инфилтратните води са подложени на обща корозия следствие на корозионно действащи агенти в кондензирана фаза от водни пари, кислород и променливи климатични условия. На фигура 1 са представени метални детайли, чиято повърхност е силно засегната от корозия. Резултат от едногодишно действие на агресивната среда е намаляване на дебелината на стената на тръбите с 1 мм.



Фиг. 1. Метални детайли обхваната от обща корозия

Състав на средата

Химичния анализ на инфилтратна (Таблица 1) показва съдържание на хлорни йони, което е в достатъчна концентрация, че да разруши пасивирация слой. В случая хлорът влиза в реакция със стоманата, образувайки междинен железен хлорид (FeCl_2). На тези места, стоманата се активира като силен анод, а близко разположената все още пасивна повърхност формира катод. Хидролизата на железния хлорид произвежда солна киселина (HCl) и резултатът е корозия под формата на локализирано надупчване. След поява на вдлъбнатина в стоманата, киселата среда поддържа активността, подпомага по-нататъшната корозия и увеличава дълбочината им. В местата със заварки е възможно да настъпи стрес корозия.

Таблица 1.

Състава на инфилтратна обработван в пречиствателна станция ОП "Столично предприятие за третиране на отпадъци" местността „Садина“.

Наименование на показателя	Единица на величината	Резултати от изпитването
1. Азот амониев ($\text{NH}_4\text{-N}$)	mg/dm^3	233
2. Азот нитратен ($\text{NO}_3\text{-N}$)	mg/dm^3	0.16
3. Азот нитритен ($\text{NO}_2\text{-N}$)	mg/dm^3	< 0.02
4. Арсен	mg/dm^3	0.031
5. Барий	mg/dm^3	0.25
6. Желязо	mg/dm^3	0.86
7. Живак	mg/dm^3	<0.50
8. Кадмий	mg/dm^3	<0.0010
9. Мед	mg/dm^3	0.38
10. Молибден	mg/dm^3	<0.0050
11. Никел	mg/dm^3	0.077
12. Общ органичен въглерод (ТОС)	mg/dm^3	264
13. Олово	mg/dm^3	0.018
14. Селен	mg/dm^3	<0.010
15. Сулфати	mg/dm^3	114.2
16. Флуориди	mg/dm^3	0.59
17. Фосфати	mg/dm^3	6.3
18. Хлориди	mg/dm^3	863
19. Хром	mg/dm^3	0.17
20. Цинк	mg/dm^3	0.078

Характерно за хром-никелови стомани във води, съдържащи хлорни йони, е транс-кристално локално разрушаване, като корозионната пукнатина се разпространява през самите метални зърна. Това може да доведе до напречно „скъсване“ на тръбата. Допълнителен агресивен фактор в процеса на пречистване на инфилтратните води е приложеното бактериално пречистване, което предполага и възникването на биологична корозия. Предвид образуването на ръжда във вътрешната повърхност на покъсен етап от експлоатационния период ще има ерозия, инициирана от движението на корозирали частици във флуида.

Влияние на рН на средата

При електрохимичната корозия рН на средата е съществен външен фактор. Влиянието на рН върху скоростта на корозия на желязото се определя от характера на деполяриращия процес и от химичната устойчивост на образуваните корозионни продукти. В неокислителни киселини корозията на желязото се извършва почти изцяло с водородна деполяризация при кинетичен контрол на процеса, докато в неутрални разтвори тя протича с кислородна деполяризация и в повечето случаи се контролира от дифузията на кислорода към металната повърхност. Средната стойност на рН за едногодишен период (Таблица 2) на инфилтратни води третирани в пречиствателната станция е рН 7,9, а на смесен поток инфилтратни води е със средна стойност е рН 7,73.

Таблица 2.

Стойности на рН за инфилтратни води от депо „Садината“ и смесен поток.

Дата	Инфилтрат депо	Смесен поток
април 2014 г.	8,43	5,75
юни 2014 г.	7,95	7,96
юли 2014 г.	8,06	7,63
август 2014 г.	7,27	7,49
септември 2014 г.	8,16	8,47
октомври 2014 г.	7,94	8,43
ноември 2014 г.	8,28	7,24
декември 2014 г.	7,48	8,38
януари 2015 г.	8,15	7,76
февруари 2015 г.	8,21	8,23

В слабокисели и неутрални водни разтвори се образуват покривки от неразтворими вторични продукти на корозията (сложни хидратирани окиси - т. нар. "ръжда"), но със слаби защитни свойства. Разнородната инфилтратна смес, наличието на променлива киселинност и сезонни климатични промени затрудняват в голяма степен еднозначното решаване на проблема с корозията на металните съоръжения, работещи на територията на пречиствателната станция.

Разлика в концентрациите на деполяризатора или пасиватора

При наличие на неравномерен по дебелина слой електролит, върху металната повърхност се образува галваничен елемент на диференциална аерация. Участъкът, където концентрацията на кислород (респ. аерацията) е по-голяма се превръща в катод. Участъкът, до който достъпът на кислород е ограничен, става анод.

Мерки за защита

Съществуват различни мерки за борба с корозията, чиято цел е намаляването на риска от корозия до приемливо ниво. Мерките за защита от корозия, които могат да се приложат на територията на пречиствателната станция за инфилтратни води са: обработка на средата чрез използването на инхибитори,

въвеждане на метод за непрекъсната инспекция, избор на устойчиви метални сплави, нанасяне на защитно покритие.

Инхибитор

Обработката на корозионната среда с цел намаляване на нейното агресивно действие върху металите е получила голямо разпространение в промишлеността като метод за защита от корозия. Понижаване на корозионната агресивност на средата при електрохимична корозия може да се постигне посредством намаляване на съдържанието на деполяризатора и въвеждане на инхибитори на корозията (инхибиторна защита).

Други мерки за ограничаване на процеса на корозия чрез промяната на средата може да се постигне и при понижаване на температурата и концентрацията на агресивни йони в средата. Инхибиторната защита е целесъобразна при ограничен обем. За условията на пречиствателната станция, се обработват води с променлива обем и концентрация, поради тази причина поставянето на инхибитори не се препоръчва. Трябва да се отбележи, че за електролити с присъствие на хлорни йони има разработени инхибитори, но те не са подходящи за среди с бактериално пречистване. За избор на подходящ инхибитор, който не би повлиял на нитрифициращите бактерии предварително би трябвало да премине през лабораторни изпитвания.

Подбор на подходящ материал

Изборът на устойчив конструкционен материал изисква установяване на причините за корозия на металите, определяне характера на корозионната среда, вид на деполяризацията, оценяване влиянието на основните вътрешни и външни фактори на корозията. Прилагането на тези мерки е подходящо при ремонт или поставянето на нови тръби. Подходящи стомани за среда, съдържаща $\text{NH}_4\text{-N}$ и органични вещества, са със съдържание на легиращи елементи Cr, Si, Ni и Mo или така известните хром-никелови стомани или хром-никелови-молибденови стомани. Молибденът предотвратява петнистата корозия и тази в заварките. За избягване на образуване на петна е необходимо ниско съдържание на Cu. Важен компонент в легираната стомана е силицият, който способства образуването на стабилна кристална решетка, особено при метали работещи при високи температури. Металните съоръжения на територията на пречиствателната станция се експлоатират при нормални температурни условия, което не изисква висока концентрация на силициеви йони.

За намаляване или прекратяване на интеркристална, стрес корозия и ефектът от т.нар. приплъзване се препоръчва изработването на металните детайли да бъде от сплав, легирана с азот (N), като по начина на производство се различават високо и ниско легирани стомани. Легирането може да се извърши в течно или в твърдо агрегатно състояние. Използваните за целта инсталации и методи са: индукционна пещ, електрическа пещ, аргонно-кислородна декарборизация (AOD), газ от прочистване от разтопен метал, електрошлаково претопяване под налягане, дъгошлаково топене, дъгоплазмено топене и топене под високо налягане с HIP Balachandran

(2004). Тези манипулации се извършват в производствени условия и водят до заздравяване на структурата на кристалната решетка, с което се намалява скоростта на стареене на стоманата при условие, че азотът е в достатъчна концентрация. С нарастващото използване на високо-N неръждаеми стомани, ефектите от азотната корозия са били обект на много интензивни изследвания. Резултати от изследванията на много от учените са нееднозначни и стигат и до противоположни изводи. Така например е установено, че устойчивостта на корозия на стоманата намалява след като N (азот) надвишава определено ниво. Проучване на Speidel (1991) предполага, че корозионният потенциал се увеличава линейно с азотното съдържание. От друга страна е изследвано, че в такива стомани при влияние на амониева среда се образуват NO_2 и NO_3 , които действат като инхибитори. В крайна сметка за разглеждания тръбопровод е обобщено, че отрицателно заредени азотни йони не бива да се прибавят в оксидния слой на стоманата, при наличие в контактна среда на Cl^- и други вредни йони, защото започват процеси на репасивация. Последното изследване доказва, че за условията в пречиствателната станция е подходяща азот-легирана стомана, а не оксидно покритие със съдържание на азот.

Освен вида на легиращите елементи е важно да се отбележи и фазата, в която те са разположени. За дуплексни стомани като аустенит и ферит, за условия на амониева среда, е подходяща S фаза, получена чрез легиране с азот. Азотирането трябва да се извършва при ниски температури чрез плазмено азотиране, магнетронно разпръскване K. Loa (2009) или плазмено потапяне за йонна имплантация, защото при температури над 500°C се получават нитриди на хрома. Това ще повиши износостойчивостта и ще намали корозионната устойчивост. Фазата на S може да се образува само ако Fe, Cr и Ni присъстват, без да е необходима аустенитна микроструктурата тип FCC. При тази фаза стоманата има добра износостойчивост, съпротивление на корозия и твърдост. Последното свойство е важно поради вероятността от ерозия.

Премахането на примеси (P и S) е ефективен начин за повишаване на устойчивостта и избягване от други проблеми като интеркристална корозия и крехкост на метала. Въпреки, че P може да бъде от полза при някои обстоятелства, например повишаване на корозионната устойчивост чрез образуването на фосфати, които улесняват пасивацията. В разглеждания пример средствата за предотвратяване на разпространение на интеркристалните пукнатини, известно като „пълзене“ е легиране с итрий, с В и Се, като последните увеличават устойчивостта срещу кавитация.

Предполага се, че има риск от микробиологично индуцирана корозия (MIC), която причинява образуване на язви или разтваряне на ферита и аустенита в структурата на стоманата F. Kajiya (1997). Следва да се отбележи, че с високите нива на N, неръждаемите стомани са склонни към MIC, особено в присъствието на нитрифициращите бактерии K. Loa и сътрудници (1991). Добавянето на Si и Ag придават антибактериално

свойство, но това важи в по-голяма степен за инсталации, работещи при пречистване на питейна вода.

Въз основа на направения анализ за необходимите легиращи елементи в стоманата могат да се препоръчат следните марки стомана 10X14G14H4T, 10X14AG15, 07X13AG20, които са заместители на стомани тип X18H10T в среди с относително слаба агресивност.

Обработка на повърхността

Освен легиране на наноструктуриране, за намаляването на образуване на биофилм, при експерименти е доказано, че ефективни методи за обработка на повърхността на стоманите са пясъкоструене плюс термично окисление.

За засилване на антикорозионните свойства на метала може да се приложи предварителна обработка при висока температура или високо налягане, което допринася за стабилност на микрозърнестата структура на стоманата. Нов метод за рафиниране на феритни неръждаеми стомани е диспергиране на оксиди във феритна матрица или валцуване при по-ниски температури. При обработване с пулсиращи магнитни полета, прибавяне на няколко легиращи елемента или създаване на Hall-Petch връзки, стоманата придобива фина структура, което спомага за придобиване на корозионна устойчивост и намаляване на интеркристалната корозия. Подобряват се и механичните характеристики. Способността да се образува оксиден наноструктуриран слой също може да намали значително електрохимичното взаимодействие между субстрата и околната среда.

Друга техника е Laser обеззаразяването на неръждаеми стомани. Чрез него се отстранява повърхностния оксиден слой на неръждаеми стомани P. Psyllaki (2000), намалява се микробното замърсяване и се повишава устойчивостта на повърхността срещу развитие на язви.

Въвеждането на въглерод в структурата на стоманата, без да се получава образуване на карбиди, които понижават корозионната устойчивост. За извършване на тази процедура има различни технологии, но резултат от тях е подобряване на различни механични свойства, повишаване на твърдостта и пластичността, както и удължаване на експлоатационния срок на стоманата. Образуването на пасивиращ слой под въздействието на променлива поляризация между водород и кислород, излагане на UV светлина или електрополиране води до намаляването на развитие на локални разрушения. Като материали се използват аргон, натриев нитрат или фосфат.

Техниките на закаляване трябва да се правят така, че структурата да не се насища с водородни атоми. Те предизвикват трошливост, стрес корозия и имат свойството да „избутват“ от кристалната решетка някои от легиращите елементи или да образуват „мехури“. Тези свойства се нарича сенсбилизация. G. Plaumbo и сътрудници (1990) предотвратяват сенсбилизацията, чрез понижаване на съдържанието на въглерод и карбиди чрез добавянето на Ti, Nb и Ni или никелови сплави. P. Lin и сътрудници (1995) работят с аустенитни неръждаеми стомани чрез термомеханично лъчение, защото утаяването на карбиди, зависи от естеството на границата

на зърното. От проведени изследвания върху AISI316L и AISI304L се установява, че в податливата на ерозия стомана обработена чрез тези методи се намалява интеркристалната корозия D. Wasnik и сътрудници (2002), което е друга алтернатива за обработка на повърхността на метала.

Защитни покрития

Обработката на стоманата включва и образуването на окисни покрития чрез прилагането на различни технологии. При предприемане на мерките за защита е важно да се отбележи, че окисният слой не трябва да има прекомерно голяма дебелина, защото е възможно да се отслои, особено във феритните високотемпературно валцувани структури. Причината е в голямата твърдост на хромовите оксиди.

Средство за подсилване на оксидните покривки е поставянето на изолационни покрития, чиято адхезия се подобрява чрез използване на свързващи вещества. Те се прибавят за защита на връзките, за предотвратяване на натрупването на влага и замърсявания. Служат и като резервоар на инхибитори. Материалите за уплътнение се прилагат за предотвратяване на изтичането на различни флуиди, но също така те намаляват натрупването на влага. Свързващите вещества трябва да са еластични и да позволяват лесен демонтаж на отделните части на съоръжението. За целта се използват различни гуми. Те се втвърдяват достатъчно, за да могат да се боядисат, но остават достатъчно гъвкави, че да не се напукат. Най-често се използват полисулфидни, съдържащи инхибитори, уплътняващи материали. Те са особено ефективни, когато се използват за защита на връзки в съоръжения, работещи във влажни условия и за изолиране на различни метали един от друг.

Предвид факта, че антикорозионната защита е наука от началото на миналия век, непрекъснато се разработват нови покрития, както и методи за поставянето им. Така изолациите от един и същи материал имат различни механични и химични защитни свойства. Като материал за облицовка, подходящ за амониевата среда, се предлага полистирол, стъклопласти, епоксидни полимери, текстолит, силиконови каучуци и други. За избор на подходяща изолация може да се оценят предложените варианти спрямо БДС 15704-83, БДС 15705-83 или други критерии за избор. Такива могат да са класациите на критерии според честотата на възникване на аварии:

1. Съвместимост с катодна защита (когато се отнася за подземна корозия).
2. Наличие и размер на дупки.
3. Дисбондмент, което е отлепянето на изолацията при действие на катодна защита.
4. Образуване на мехури.
5. Адхезия.
6. Кохезия е загуба на сближаване между слоевете на изолация, което е характерно при многослойни изолации и наличие на силна адхезия.
7. Просмукване на вода.
8. Проникването на газове.

Поради многообразието от изолационни материали и необходимостта те да отговарят на изброените критерии

категоричен избор може да се направи след реално тестване на образци с предложените покрития.

За допълнителна защита на съоръженията с нанесени покрития се използва електрохимическата защита. Поради спецификата на средата, възможността за допира на хора и нарушаване на правилата за безопасност на труда, методът е неприложим Иванов и съавтори (2011).

Инспекция и мониторинг

Независимо от приложените мерки за защита по време на експлоатация е необходимо отговорно провеждане на инспекции за установяване на състоянието на металните съоръжения. Въз основа на направения преглед и невъзможността за прилагането на инхибиторна защита се препоръчва да се следи нивото на корозия. Като вариант за обследване с по-ниска себестойност за измерване на нивото на локалната (стрес) корозия се предлага датчик, работещ на резистивен принцип, изработен от материали съобразени с метала на защитаваната структура и осъществяването на система за дистанционно наблюдение Христова и съавтори (2010). За изследване на степента на корозия може да се приложи и дебелимер работещ на ултразвуков принцип. Използвани в практиката ултразвукови дебелимери са модели 27 MG и 45 MG на фирмата OLYMPUS. Първият дебелимер не предлага запис на данните, докато вторият модел има опции за запис на предходни измервания, чрез допълнителни софтуерни приложения. Въз основа на запазените характеристики според софтуерните приложения могат да бъдат направени анализи за нарастване на корозията във времето и изследване влиянието на отделни фактори върху нейната скорост. Активни корозионни процеси по външната повърхност могат да бъдат инспектирани като се използват измерватели на корозията работещи на принципа на вихровите токове. За измерване на умората на материала и регистрирането на пукнатини на много ранен етап може да се използват пенетранти, магнитни или акустични методи. Последните дават добра корелация между промяната на сигнала и развитието по брой на пукнатините. Ако е необходимо измерване на тяхната дължина и разпространение по-ефективен е магнитният метод. Тези измервания са строго специфични и направени в ранен етап от експлоатационния период позволяват да се променят средствата за защита.

Литература

- Иванов, И. В., П. К. Петров, Г. Ц. Велев, Н. Е. Витков - *Техническа Безопасност - учебник, ИК „Кинг“, София, 2011, ISBN 978-954-9518-66-5;*
- Balachandran G., *High Nitrogen Steels and Stainless Steels— Manufacturing Properties and Applications, Alpha Science International, Pangbourne, UK, 2004, pp. 40–93.*
- Kajiyama F., *Corrosion Engineering* 46 (1997) 377.
- Loab K., Sheka C., Lai J., *Recent developments in stainless steels, Materials Science and Engineering R, 2009, 39 - journal homepage: www.elsevier.com/locate/mser*
- Lin P., Palumbo G., Erb U., Aust K., *Scripta Metallurgica et Materialia* 33 (1995)1387.
- Psyllaki P., Oltra R., *Materials Science and Engineering A* 282 (2000) 145.

Speidel M., in: *Proceedings of the Conference on Stainless Steels 91*, The Iron and Steel Institute of Japan, Chiba, (1991), pp. 25–35.

Христова Т., Христов П., Стефанов Ст., Дистанционна система за следене на корозията на подземни тръбопроводи, списание Минно дело и геология, 2010, брой 1, стр.42-45

Hristova T., Stefanov S., *Electrochemical Research Of Sensor Galvanic Cell*, Universitatea "Constantin Brâncuși" din Târgu-Jiu *Analele Universității/ University's Annals*

<http://www.utgjiu.ro/revista/?page=curent&nr=2010-02>

ISSN 1842-4856

Washnik D.N., Kain V., Samajdar I., Verlinden B., De P.K., *Acta Materialia* 50(2002) 4587.

Plaumbo G., Aust K., *Acta Metallurgica et Materialia* 38 (1990) 2343.

Статията е рецензирана от проф. М. Панайотова и препоръчана за публикуване от кат. „Химия“.