

HARASZTI FERENC VILLAMOS KAPCSOLATOK galvánkorróziójának vizsgálata hőkamerával

Témavezető: Prof. Dr. habil. Bitay Enikő

BIZTONSÁGTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

Budapest, 2023. május 30.

Szigorlati/komplex vizsga bizottság:

Elnök: Prof. Em. Dr. Berek Lajos Tagok: Dr. habil. Kovács Tünde Dr. habil. Simon Ákos

Nyilvános védés teljes bizottsága:

Elnök: Prof. Em. Dr. Berek Lajos Titkár: Dr. Őszi Arnold Tagok: Dr. habil. Horváth Sándor Dr. habil. Simon Ákos Dr. Pinke Péter

Bírálók: Dr. habil. Szunyogh Gábor Dr. habil. Kovács Tünde

Nyilvános védés időpontja:

2023.

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETI	ÉS	8
A kutatás	i téma időszerűsége	8
A vizsgál	t probléma aktualitása	9
Célkitűzé	sek	10
A téma k	utatásának hipotézisei	13
1 ERED	MÉNYEK A KORRÓZIÓ ÉS GALVÁNKORRÓZIÓ KUTATÁS	
TERÜLETI	ÉN	13
1.1 A	korróziós folyamatok áttekintése	13
1.1.1	Korróziós jelenségek	13
1.1.2	Kémiai korrózió	14
1.1.3	Oldódásos korrózió	15
1.1.4	Elektrokémiai korrózió	15
1.2 Ko	prróziós elváltozások megjelenési formái	18
1.2.1	Egyenletes korrózió	18
1.2.2	Lyukkorrózió	18
1.2.3	Kristályközi korrózió	18
1.2.4	Korróziós kifáradás	19
1.2.5	Különleges korrózió	20
1.2.6	Galvánkorrózió	20
1.3 Ko	prrózió mérhetősége, mérési módszerek	27
1.3.1	Graviometria módszer	27
1.3.2	Ellenállásmérés alapú vizsgálat	28
1.3.3	A szakítószilárdság és a nyúlás csökkenésének vizsgálata	29
2 TERM	OGRÁFIA ÉS ALKALMAZÁSA A KORRÓZIÓS VIZSGÁLATOKB	AN.
		31

	2.1	A termográfia alapjai	31
	2.2	Az infravörös sugárzás mérési elve és lehetőségei	. 32
	2.3	Hőkamera alkalmazási lehetősége	. 34
	2.4	Hőkamera használata a gyakorlatban	.35
	2.5	A mérést befolyásoló tényezők	.36
	2.6	A hőkamera hullámhossztartományának szerepe a sugárzás mérésében	. 38
	2.7	Mérési útszakasz jellemzői	. 38
	Össze	foglalás	. 39
3	AV	VILLAMOS KÖTŐELEMEK GALVÁNKORRÓZIÓJÁNAK	
L	ABOR	ATÓRIUMI VIZSGÁLATA	. 40
	3.1	Kísérleti paraméterek meghatározása	. 40
	3.2 során	Főbb szempontok kialakítása villamos kötőelemek galvánkorróziós vizsgála	ta .41
	3 3 A	galvánkorrózió hatása a villamos kötőelemek legfontosabb üzemi jellemzőire	e
			.42
	3.3	Villamos ellenállás változása az idő függvényében	. 44
	3.3	.1 Mérés 1. azonos katód-anód arány (acél-réz)	. 44
	3.3	.2 Mérés 2. eltérő (5:1) katód anód arány	. 48
	3.3	.3 Mérés 3. különböző (5:1) katód-anód arány (alumínium-réz)	50
	3.3	.4 Mérések eredményei	. 52
	3.4	A felületi érdesség változása az idő függvényében	. 54
	3.5	Kötési nyomaték változása	. 57
	3.6	Villamos ellenállás változása a hőmérséklet függvényében	. 58
	Össze	gzés	. 62
4	VII	LLAMOS KÖTŐELEMEK GALVÁNKORRÓZIÓJÁNAK TERMOGRÁFIA	ΑI
V	IZSGÅ	ÁLATA	. 64
	4.1	Készülékkel szemben támasztott követelmények	. 64
	4.2	Hőmérséklet-különbség változása a villamos ellenállás függvényében	, 66

4.2	2.1 Mérés 1. azonos katód-anód arány (acél-réz)	66
4.2	2.2 Mérés 2. különböző (5:1) katód-anód arány (acél-réz)	67
4.2	2.3 Mérés 3. különböző (5:1) katód-anód arány (alumínium-réz)	69
Ös	szegzés	71
4.3	A hőmérséklet különbség változása az idő függvényében	72
4.3	3.1 Mérés 1. azonos katód-anód arány (acél-réz)	72
4.3	3.2 Mérés 2. különböző katód-anód arány (acél-réz)	74
4.3	3.3 Mérés 3. különböző katód-anód arány (alumínium-réz)	76
Ös	szegzés	78
4.4	Hőmérséklet különbség változása az áramerősség függvényében	80
4.4	4.1 Mérés 1. azonos katód-anód arány (acél-réz)	80
Össze	efoglalás	82
5 GA	ALVÁNKORRÓZIÓ KINETIKÁJÁNAK MEGHATÁROZÁSA	
TÖMEO	GVESZTESÉG ÉS FÉMION BEOLDÓDÁS ALAPJÁN	83
5.1	A rozsdásodás elvi következményei, Pilling-Bedworth-arány (RPB)	84
5.2	Tömegveszteség mérése a hőmérséklet függvényében korrozív közegben	86
5.2	2.1 Mérés	87
Össze	efoglalás	90
5.3	A korrózió követése a beoldódott ionok mennyisége alapján a hőmérséklet	
függv	vényében	91
5.3	3.1 Mérés azonos katód-anód arány	92
Ös	szefoglalás	97
6 FE	ELÜLETI MORFOLÓGIAI VIZSGÁLATOK	99
6.1	Vizsgálatok pásztázó elektronmikroszkóppal	99
6.2	A felületi morfológia vizsgálata atomi erőmikroszkóppal	. 101
Össze	efoglalás	. 104
ÖSSZE	GZETT KÖVETKEZTETÉSEK	. 105
ÚJ TUĽ	DOMÁNYOS EREDMÉNYEK	. 108

AJÁ	NLÁSOK	111
IRO	DALOMJEGYZÉK	112
7	RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉK	121
8	ÁBRA JEGYZÉK	123
9	TÁBLÁZAT JEGYZÉK	126
FÜC	GGELÉK	128
1.	Hőkamera	128
2.	Felszíni vizsgálatok, atomi erőmikroszkóp	130
3.	Az alkalmazott pásztázó elektron mikroszkóp (SEM)	131
4.	A vizsgált felszínek sztereomikroszkópos felvételei	132
5.	A tömegveszteség és az ion beoldódás mérés mintái	133
6.	Réz saru – bevonatos acélcsavar minta hőképe	134
KÖS	SZÖNETNYILVÁNÍTÁS	136

Nyilatkozat a munka önállóságáról, irodalmi források megfelelő módon történt idézéséről

Alulírott, Haraszti Ferenc kijelentem, hogy a Villamos kapcsolatok galvánkorróziójának vizsgálata hőkamerával című, benyújtott doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2023. 05. 30.

(aláírás)

BEVEZETÉS

A felsőoktatásban eltöltött szakmai pályafutásom jelentős részében laboratóriumi mérések, kísérletek összeállításával, tanításával foglalkoztam. Ezek az órák felölelték a fizika. kémia. villamosságtan, környezetvédelem, energiagazdálkodás, biztonságtechnika, korróziós gyakorlatok, elméleti előadások témakörét. Az Antenna Hungária Zrt. alkalmazásában eltöltött évek során alkalmam volt tüzetesen megvizsgálni a villamos kapcsolatok, kontaktusok minőségét. Felkeltette érdeklődésemet e kontaktusok befolyásoló szerepe a digitális technika adatátvitele során. A téma iránti figyelmemet fokozta ezen villamos kapcsolatok különböző környezetben történő használata és a környezeti hatások miatt bekövetkező tönkremenetele. A laboratóriumban és a terepen is tapasztaltam, mennyire komplex problémakezelés szükséges a helyes, közel maximális eredmény eléréséhez. A korrózió, különböző gyártási eljárások, bevonatrendszerek, használati körülmények (környezeti tényezők) mind-mind befolyásolják a villamos kötések (kapcsolatok) megfelelő funkcionalitását, biztonságát.

Doktori kutatásaim célja a villamos kontaktusok korróziófolyamatának tudományos vizsgálata, különös tekintettel a korrózióvédelemre, és a korrózió okozta káros felmelegedésekre. A villamosiparban az ebből eredő teljesítmény csökkenés, rossz, hibás, korrodált villamos kapcsolatok hányada is nagy. Célom olyan vizsgálati módszerek bevezetése, melyek lehetővé teszik e hibák időben való felismerését, csökkentve a balesetveszélyes helyzetek kialakulását és az ebből kialakuló veszteségek mértékét.

Célom továbbá megvizsgálni a főbb villamos kötőelemek korrózió okozta fizikai elváltozásait, különböző paramétereit, összefüggéseit. Következtetéseket tenni ezen változók alapján a korróziósebesség alakulására. Mindezt egy ma már rohamosan terjedő diagnosztikai berendezés segítségével, a hőkamerával.

A kutatási téma időszerűsége

Mióta az ember fémeszközöket használ, azóta küzd a korrózió okozta problémákkal. Számos katasztrófa okaként jelöli meg az irodalom a galvánkorróziót, mely okozhatja hidak, repülőgépek, fémszerkezetek károsodását, értékcsökkenését, tönkremenetelét. [1, 2]. Igaz ez a megállapítás a szénacéloktól a nemesfémekig. Elektródpotenciáljuk szerint nemesfémeket és közönséges fémeket különböztetünk meg. Bár e folyamatok elleni védekezés az elmúlt évtizedekben nagyságrendi és minőségi változáson ment keresztül, az egyre nagyobb számban gyártott fémszerkezetek és berendezések megkövetelik a tudományág állandó kutatását és fejlesztését, a minél kisebb korróziós veszteségek eléréséhez. Egyes becslések szerint a világ acéltermelésének 20 százaléka végzi rozsdaként pályafutását. Ez világviszonylatban óriási kár, ha lefordítjuk a számok nyelvére: sok milliárd amerikai dollárról van szó. (Pontos számot lehetetlenség mondani globális és rendszeres felmérések nélkül. A korrózió, mint kémiai reakció pontos jellemzése nehéz feladat.) Kijelenthetjük: ahány korróziós folyamat létezik, szinte annyi vizsgálati módszer is. A korrózióállóság tekintetében még a nemesfémek sem tökéletesek. E jelenség megközelítése egy komplex feladat.

A vizsgált probléma aktualitása

Az iparban, új diagnosztikai módszerként alkalmazott termográfia segít az egyes korrózió okozta károk feltárásában. Ez a hőmérsékletmérésen alapuló, egyre szélesebb körben alkalmazott eljárás, általános és specifikus eseteket is kielégít. Ma már az ipar és az élet számos területén létjogosultságot nyert. Használják a rendfenntartó erők, orvosok, objektumvédő szakemberek, tűzoltók, környezetvédelmi hatóságok, épületfelügyelet, bányászat stb. Felsorolni is nehéz alkalmazhatóságának lehetőségeit. Egyre jobban terjed az ipar különböző ágazataiban: alkalmazzák gyártó- és folyamatfelügyeletre, villamos és mechanikus gépek állapotának ellenőrzésére, diagnosztizálására. A termográfia alkalmas karbantartási feladatok, élettartam vizsgálatok elvégzésére is. Doktori témámban a villamosipar és a háztartások villamosenergia-ellátásának egy markáns szeletét vizsgáltam meg, amely az áramátvitelhez használt különböző villamos kötések korróziós folyamatok által kialakult hőmérséklet változásait elemzi termográfiás módszerrel. A kötéstechnikában használt, különböző anyagú alkatrészek nem megfelelő körülmények között korróziós változásokat indíthatnak el. Az un. galvánkorróziós jelenségek nem csak a kötés szilárdságát ronthatják, hanem áramátviteli problémákat is okozhatnak. A korróziós termékek az alkatrészek felületén átmenetiellenállás-növekedést indukálnak, ami nagy energiaveszteségeket eredményez. Túl ezeken a veszteségeken, kritikus értékre növekedhet a kötés hőmérséklete is, ami már biztonságtechnikai problémákat vet fel.

Az ipar számos területén alkalmazott berendezések, gépek üzemi hőmérséklete, egyes részeinek hőeloszlása nagyon fontos jellemző. E berendezések fő alkatrésze vagy tartozéka lehet mindenféle villamos vezető, továbbítórendszer (transzformátor, vezetősín, áramellátó rendszer). Ezek a működéshez szükséges és optimális hőmérséklettől való bármilyen irányú– akár kismértékű eltérése nagy jelentőséggel bír a diagnosztizáló szakember számára. A hőmérséklet-változás megfelelő módon történő mérésével időben

tájékozódhatunk a működés közben kialakult hibákról, gyártás során elkövetett technológiai hiányosságokról, a működtetés során bekövetkezett környezeti hatásokról. A rosszul kiválasztott anyagminőség, nem kellően felmért fizikai, kémiai, anyagszerkezeti és különféle mechanikai hatások jelentősen hozzájárulnak vagy hozzájárulhatnak a villamos energia (áram, feszültség) csökkenéséhez, elvesztéséhez vagy a jelátvitelben bekövetkezett torzulásokhoz. Ma, amikor a környezeti szakemberek döntő többsége elismeri a globális felmelegedés hatásait, nem mindegy milyen energiafelhasználással működnek berendezéseink, gyártósoraink, háztartási eszközeink. Egyre kevesebb veszteséget engedhetünk meg magunknak nem csak a felhasznált erőforrások terén, de modern világunkban elengedhetetlen követelménnyé vált a biztonság és az egészségvédelem legmagasabb szinten történő működtetése is.

Az évszázadok óta működtetett ipari folyamatok korábban nem tették lehetővé azok hőanalízisét. Az elmúlt évtizedek is csak a kontakthőmérséklet- mérésre hagyatkozhattak. Ellenőrzési folyamatnál és balesetvédelmi szempontból csak nagy kockázattal vagy sehogy sem lehetett megmérni egy működő gép, villamos kontaktus hőterhelését. Le kellett állítani a működtetést vagy gyártási folyamatot, ami komoly veszteségeket generál ezekben az iparágakban. A hőkamerák rohamos elterjedésével egy új diagnosztikai módszer született. Segítségével és a megfelelő szaktudás birtokában jelentősen felgyorsult az egységnyi idő alatt megvizsgálható gépek, energiaátalakító rendszerek, villamosipari alkatrészek átvizsgálása. Nem szükséges továbbá az ipari vagy háztartási folyamatot megszakítani. Precíz és pontos képet kaphatunk az általunk vizsgált berendezés vagy eszköz működés közbeni állapotáról, ami nagymértékben segít a helyes működtetés feltérképezésében. A mérést végző ember szempontjából pedig a legfontosabb az új diagnosztikai módszer biztonsága. Nem kell veszélyes, áramjárta helyeket megközelíteni, nem kell forgó, mozgó, fröcskölő helyek közvetlen közelébe menni kockáztatva a testi épséget, biztonságot. Disszertációmban a hőkamerás mérési módszert mutatom be a korróziós folyamatok vizsgálata során.

Célkitűzések

A doktori értekezésem célja egy modern, könnyen kivitelezhető diagnosztikai módszer kidolgozása a galvánkorrózió vizsgálatára (különös tekintettel a korszerű termográfiás módszerek alkalmazására), és olyan összefüggések feltárása, melyek matematikai kapcsolatot adnak a galvánkorrózió és az áramjárta villamos kötőelemek hőmérsékletváltozása között. Ezzel lehetővé válik a rendellenes hőmérsékleti eloszlás mihamarabbi megfigyelése, hiszen, az ideális üzemi hőmérséklettől való eltérés detektálása, pontos, precíz meghatározása még idejében megvéd a nagy anyagi veszteségek kialakulásától.

Kutatásaimat átgondolt tervezés alapján szisztematikusan hajtottam végre az alábbiak szerint:

- ✓ Egyetemi oktató lévén hozzáférhettem a magyar és külföldi fellelhető tudományos közlemények és hivatkozásai csaknem teljes tárházához, régeikhez és újakhoz egyaránt, melyek érdemi információkkal szolgáltak a téma minél alaposabb megismeréséhez. Kihasználtam jelen korunk nagy sebességű információs "sztrádáját" az internetet, melyet ma már szinte bárhonnan és bármikor igénybe lehet venni.
- ✓ Kutatásaim fontos helyszíne volt a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen található Országos Műszaki Információs Központ és Könyvtár (OMIKK), ahol minden mai és korábbi szakirodalom fellelhető a választott kutatási témámban.
- ✓ Sokat segített a kidolgozandó témakörben a Magyar Szabványügyi Testület közelben található boltja, ahol szabványok, kapcsolódó anyagok és katalógusok segítették munkámat.
- ✓ Laborgyakorlatokat vezető munkatársként rendelkezésemre állt egy jól felszerelt fizika-kémia laboratórium a majdnem mindig megfelelő mérési eszközökkel, berendezésekkel. A hiányzó műszereket a gyakorlati életben eltöltött több évtized alatt szerzett tapasztalatok alapján megépítettem vagy kölcsönbe kaptam.
- ✓ Az Eötvös Loránd Kutató Hálózat laboratóriumába Telegdi Judit professzor támogatásával jutottam, ahol az ő vezetésével és segítségével a mai, modern, nélkülözhetetlen technikák és mérési módszerek alkalmazásával végezhettem kutatásaimat.
- ✓ Termográfiás méréseimet "terepen" is kiviteleztem, melyre igen nagy hangsúlyt fektettem. Az MVM Zrt. erőműveiben, a BKK hév vonalain, különböző gyárakban és üzemekben méréseket végeztem és kiértékeltem.

A kutatás folyamatát az 1. ábra szemlélteti. A kutatási periódust 2022. 08. 30-án lezártam.



1. ábra A kutatás folyamata (szerző)

A téma kutatásának hipotézisei

1. Hipotézis

Feltehető, hogy a nagy pontosságú ellenállásmérés alkalmas a galvánkorrózió kinetikájának jellemzésére villamos kötőelemek esetén.

2. Hipotézis

Feltehető, hogy a termokamerás hőmérsékletmérés megfelelő eszköze lehet a kontaktkorrózió által okozott melegedés meghatározására.

3. Hipotézis

Feltehető, hogy kapcsolat van a villamos kötőelemek (csavarok és csavaranyák közötti) meghúzási nyomatéka és az átmenetiellenállás, illetve a melegedés között.

4. Hipotézis

Feltehető, hogy a galvánkorrózió során képződött, az elektrolitban feloldódott (az alkatrészek tömegveszteségét okozó) korróziós termékek ion beoldódása függvény kapcsolattal jellemezhető.

1 EREDMÉNYEK A KORRÓZIÓ ÉS GALVÁNKORRÓZIÓ KUTATÁS TERÜLETÉN

1.1 A korróziós folyamatok áttekintése

1.1.1 Korróziós jelenségek

Korrózióról beszélünk valamilyen szerkezeti anyag (fém, műanyag, beton, szerves anyagok stb.) felületéről a környezeti kölcsönhatás hatására kiinduló, a felhasználó számára kedvezőtlen elváltozást okozó jelenségek esetén. Eszerint a korróziós jelenségek definiálása ma már kiterjed a nemfémes anyagokra is. Ez az átalakulás fizikai, kémiai és elektrokémiai folyamatok révén megy végbe. Az elváltozás lehet szerkezeti, tömegveszteséggel járó, villamos paraméterek megváltozásával járó és esztétikai jellegű is. A korrózió alapjában véve a korróziós érzékenységtől függő, korróziós hatások eredményeként végbemenő folyamat és mindig negatív szabadentalpia-változással jár. Ezt a szerkezeti anyag felhasználók számára káros folyamatot teljesen nem lehet megszüntetni, csak a sebességét csökkenteni [3, 4, 5]. A korróziós jelenségek felosztása napjainkban három nagy területre oszlik:

- 1. kémiai korrózió [5, 6],
- 2. oldódásos korrózió [5],
- 3. elektrokémiai korrózió [5, 6].

Ez utóbbi a legjellemzőbb az ipari gyakorlatban.

1.1.2 Kémiai korrózió

A kémiai korrózió mindig nagy hőmérsékleten jön létre. A tisztán kémiai korrózió szükséges feltétele még valamilyen fém és a fémet körülvevő nagyon száraz gázhalmazállapotú környezet. Elektrolit jelenléte nem szükséges. Legjellemzőbbek az úgynevezett agresszív gázok, melyek a kémiai korrózió kialakulását segítik: oxigén, kéndioxid, klór, ammónia. Ha a gáz halmazállapotú környezet minimális folyadékot vesz fel (pl. vízgőz), a kémiai korrózió azonnal elektrokémiai korrózióvá alakul. Az elektrokémiai korrózió létrejötte (sebessége) általában nagyobb a kémiai korrózióénál. A vízmentes klórgáznak az acél korróziós szempontból szobahőmérsékleten ellenáll, de már minimális vízmennyiség hatására súlyos korróziós károkat szenved. Az ilyen típusú elváltozás esetén a szerkezeti elemből fémionok (Me⁺) és elektronok (e⁻) lépnek ki. A közöttük mérhető d távolság elenyésző. Atomi távolságban maradnak, amely a következő összefüggéssel jellemezhető: d \leq 1 Å. Ez a távolság molekuláris távolságot jelent, tehát mindkét részecske ugyanabba a termékbe épül be. A kémiai korrózió legjellemzőbb példája a vas revésedése (2. ábra) (wüsztit FeO, magnetit Fe₃O₄, hematit Fe₂O₃) [5 - 8].



2. ábra Kémiai korrózió [3]

A kémiai korrózió korróziósterméke a fém felületén jelenik meg, nemfémes jellegű és a következő rétegekből áll [9] (1), (2), (3):

$$Me + \frac{1}{2}Br_2 = MeBr \quad fémbromid \tag{1}$$

$$Me + \frac{1}{2} S_2 = MeS \quad f\acute{e}mszulfid$$
(2)

$$Me + \frac{1}{2}O_2 = MeO \quad fémoxid \tag{3}$$

Az oxidáció nagy hőmérsékleten játszódik le. Kémiai korrózióhoz sorolhatjuk a szénacélok hevítés közben bekövetkező revésedési folyamatát.

1.1.3 Oldódásos korrózió

Részben kémiai, részben elektrokémiai korrózió. Átmeneti korróziónak is hívhatjuk a két folyamat keveredése miatt. Nincsenek az elektrokémiai korrózióra jellemző helyi elemek, elektródok, határozott irányú elektron áramlás, de meghatározott helyen lépnek ki a fém és elektron részecskék az anyagból. Csak fémek oldódását soroljuk ide lúgokban és savakban, ezt a folyamatot a 3. ábra mutatja be [3, 5].



3. ábra Oldódásos korrózió (szerző)

1.1.4 Elektrokémiai korrózió

A korróziós folyamatok azon eseteiben, amikor a fémion és az elektron térbelileg elkülönülve lép ki a szerkezeti anyagból, ($d \ge 4$ Å) helyi elemek létrejöttével, illetve ezek áramtermelő tulajdonságával kell számolni, melyeknek méretei is különbözhetnek (μ m² – cm² – m²) egymástól.

Ahhoz, hogy elektrokémiai korrózió jöjjön létre az alábbi feltételek valamelyikének teljesülnie kell [10–12]:

- ✓ azonos fém, ugyanazon elektrolit más és más koncentrációjú zónáival érintkezik konstans hőmérsékleten,
- ✓ két különböző anyagminőségű fém homogén koncentrációjú elektrolit oldattal érintkezik,
- ✓ azonos fémek ugyanazon minőségű és koncentrációjú elektrolitokkal érintkeznek eltérő elektrolit hőmérsékletek mellett.

A fémion és az elektron különböző termékbe lokalizálódik (4).

$$Me^{n+} + ne^{-} + viz \rightarrow Me^{n+}aq + ne^{-} + viz$$
(4)

A fémion- és az elektronkilépés közötti távolság egyre nagyobb lesz, ez pedig a fém oldódását, ebből következően korróziós tönkremenetelét elősegíti és felgyorsítja. Az esetek többségében H-fejlődéses és O-fogyasztásos mechanizmust tudunk megkülönböztetni (4. ábra):

A H-fejlődés folyamata például horganyzott vas esetében a következő (5):

$$Zn + 2H^{+} = Zn^{2+} + H^{2}$$
(5)



4. ábra Hidrogénfejlődés folyamata [9]

O-fogyasztásos korrózió alapegyenlete a vas rozsdásodása (koncentrációs elem) (5. ábra)

Anódos folyamat (6):

$$Fe \to Fe^{2+} + 2e^{-} \tag{6}$$

Mivel a vas felületére kondenzálódott víz semleges, a katódos folyamat (7):

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \tag{7}$$



5. ábra Elektrokémiai korrózió (szerző)

Az elektronok fémes érintkezésen keresztül érkeznek az anódos helyről a katódos helyre.

Az elektrokémiai reakció (8):

$$2Fe + 2H_2O + O_2 \rightarrow 2Fe^{2+} + 4OH^- \rightarrow 2Fe(OH)_2$$
(8)

A vas(II)-hidroxid oldhatatlan fázisként kiválik az oldatból. Ez a vegyület azonban nem stabil, és a levegő oxigénje segítségével 3 vegyértékű vassá oxidálódik, amelynek vizes változata a rozsda (9):

$$2Fe(OH)_2 + H_2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3$$
(9)

Elektrokémiai korrózió kialakulásának gyakorlati feltételei összegezve tehát a következők:

 ✓ Alakuljon ki legalább két különböző villamos potenciálú hely, és álljanak egymással fémes összeköttetésben:

A különböző potenciálú hely jelenthet két vagy több egymástól eltérő anyagminőségű fémet. Ez az eltérés ugyanazon fém különböző rácsszerkezetét is jelentheti valamilyen mechanikai beavatkozás hatására (kovácsolás, hajlítás, húzás). Más potenciál alakulhat ki azonos fémek eltérő ötvözésénél is.

 ✓ A már létrejött fémes összeköttetésben más-más potenciálú helyek meghatározott vezetőképességű elektrolit oldaton keresztül is legyenek összeköttetésben.

Ez a feltétel biztosítja, hogy töltést hordozó és átadó ionok legyenek az elektrolitban, mely általában különféle sók, savak vagy lúgok vizes oldata, vagy maga a víz.

✓ A villamos összeköttetésben lévő elektrolit tartalmazzon elektronfelvevő anyagot.
 A fém oldódásakor keletkező szabadelektronokat az oldott oxigén, a klór és a hidrogén ion képes felvenni. A gyakorlatban ezeket az anyagokat depolarizátornak nevezzük.

1) a víz oldott oxigénjének redukciója (10), (11)

$$O_2 + 4 H^+ + 4 e^- \rightarrow 2 H_2O$$
 (10)

$$O_2 + 2 H_2O + 4 e^- \rightarrow 4 OH^-$$
(11)

2) a víz szabad klórtartalmának redukciója (12)

$$C1_2 + 2 e^- \rightarrow 2 Cl^- \tag{12}$$

3) a víz savtartalmából adódó hidrogénion redukciója (13)

$$2 H_3O + + 2 e^- \rightarrow 2H_2 + H_2O$$
 (13)

A két (vagy több) különböző villamos potenciálú hely közül mindig a negatívabb viselkedik anódosan, itt oxidáció játszódik le, a fém ekkor ionosan oldódik.

Anódfolyamat egyedül csak akkor megy végbe, ha létezik mellette egyidőben egy katódfolyamat [10–12].

1.2 Korróziós elváltozások megjelenési formái

A korrózió megjelenése szerint számos formát különböztetünk meg.

1.2.1 Egyenletes korrózió

Az egyenletes korrózió egy igen jól nyomon követhető, a felületen egyenletesen megjelenő anyagveszteséget okozó károsodási forma. Mivel szemmel látható, így a károsodás mértéke követhető, ezért nem tekinthető a legveszélyesebb korróziós típusnak. Mértéke tömeg-, vastagság- vagy térfogatváltozás mérésével jól meghatározható [3, 5].

1.2.2 Lyukkorrózió

Lyukkorrózió előfordulása igen sokrétű. A szakirodalom ide sorolja a makroszkópikus lyukak képződését fémek felületén vagy a felületen a passzív védőréteg helyi károsodását. Jellemzőjük, hogy a fém oldódása nem egyenletes. Mindig valamilyen egyértelműen definiálható hatás miatt alakul ki. Meghatározása nehézkes, egyidejűleg több mérési módszer alkalmazása szükséges [13].

1.2.3 Kristályközi korrózió

Kristályközi korrózió igen veszélyes korrózió típus, mely katasztrófák okozója lehet. Az ausztenites korrózióálló acélok bizonyos típusainál jellemzően megfigyelhető. Oka a szemcsehatárok mentén kiváló króm-karbid (Cr₂₃C₆), melynek környezetében a króm mennyisége lecsökken elveszítve ezzel a korrózióállóságot. Ez az anyagon belül a szemcsehatárokra koncentrálódik, aminek az a következménye, hogy a korróziós jelenség is a szemcsehatáron mutatkozik meg. A kiválás mértéke, nagyban függ a fém széntartalmától, és rendkívüli mértékben rontja az ausztenites acél szilárdsági mutatóit. A hidegalakított acélok esetén ez a jelenség fokozottabban jelentkezik. A 6. ábra a hűlési sebesség hatását mutatja Cr-Ni ötvözésű acélok esetén a korrózióállóságára. Levegő hűtés esetén (1100 °C-ról hűtve) hosszabb idő áll rendelkezésre a kritikus hőmérsékleti tartományban a kiválások képződésére. A gyors (víz-) hűtés lecsökkenti azt az időtartamot, amíg a kiválások létrejöhetnek, ezáltal csökkenti a korróziós érzékenység kialakulását. Abban az esetben, ha az alkatrész nem csak korrozív közegnek, de egyben húzó igénybevételnek is kitett, a korrózió fokozottabban lép fel. Mérése eltér a fent említettektől. Többnyire a megváltozott szilárdsági és elektromos tulajdonságok meghatározásán alapul [14–17].



6. ábra Cr-Ni acélok korróziós érzékenységi tartománya [14]

1.2.4 Korróziós kifáradás

A korróziós kifáradás periodikus mechanikai igénybevétel (fluktuáló húzó-, és nyomófeszültség) által okozott károsodás során jöhet létre. Nagyobb igénybevétel hatására az anyagban hajszálepedések keletkeznek, és eltörik. Ha ehhez az

igénybevételhez korrózió jelensége is párosul, akkor a kifáradási határ kisebb lesz [18-21].

1.2.5 Különleges korrózió

Ritkán előforduló korróziós elváltozások tartoznak ide, mint például a felhólyagosodás, hidrogénridegség, lemezes korrózió, filiform korrózió, mikrobiológiai korrózió [22–24]. A különleges korróziókhoz sorolható esetek száma igen jelentős, de a kutatásom szempontjából nem releváns és a terjedelmi korlátok sem teszik lehetővé a részletesebb ismertetést.

1.2.6 Galvánkorrózió

A galvánkorrózió kialakulásának elméleti háttere

Két vagy több fém egymással való fémes érintkezése elektrolit jelenlétében galvánkorróziós hatást vált ki, mely tisztán az elektrokémiai korróziós elváltozások közé sorolható. A kevésbé nemes fém az, amelyikből korróziótermék képződik, és ez oldódhat. Az oldódás sebességét befolyásolja a két fém potenciál sorban betöltött helye. Minél nagyobb ez a különbség a fémek között, annál nagyobb a fém korrózióra való hajlama. A normálpotenciál pozitívabb irányba való eltolódása növeli a korrózióállóságot [25]. A fémek hidrogénhez hasonlított normál potenciálsora a 7. ábra szerinti.

Fémek	V	
Magnézium	-2,34	
Alumínium	-1,67	
Cink	-0,76	
Króm	-0,56	
Vas	-0,44	
Nikkel	-0,23	
Ón	-0,14	
Ólom	-0,12	
Hidrogén	0,0	
Réz	+0,34	
Szén	+0,74	
Ezüst	+0,80	
Platina	+1,36	
Arany	+1,5	

7. ábra Normál potenciálsor (szerző)

A fent említett körülmények csak a galvánkorrózió kialakulására adnak lehetőséget [26–28]. A gyakorlati kialakulást azonban számos más tényező befolyásolhatja. Ennek megítélésére segítséget nyújthat a potenciálsor (7. ábra), de ez nem minden esetben elégséges. Megváltozhatnak a potenciálviszonyok is, ez esetben bizonyos felületi rétegeknél az egyenáram irányító hatása zavarja meg a 7. ábra szerint elvárható potenciál viszonyokat. Például egy közönséges szénacél tengely bronz anyával szerelve galvánkorróziót eredményez a tengelyben. Másik példa, ha ugyanezt a tengelyt ellátjuk króm tartalmú bevonattal a vele érintkező automata acél anya anyaga fog korrodálódni, mert a tengely elektródpotenciálja pozitívabb lesz így megvédi a bevonat. A galvánkorrózió sebességét az alábbi összefüggés szerint jellemezhetjük (14) [14, 29]:

$$\frac{galvánkorrózió}{idő} = \frac{M}{96500_n} \cdot \frac{\varepsilon_K - \varepsilon_A}{R_k - R_b}$$
(14)

ahol:

- M-anyagmennyiség (mol)
- n oldódó fémion vegyértéke
- $\varepsilon_{\rm K}$ a nemesebb fém elektródpotenciálja (hidrogénelektróddal szemben)
- ϵ_A- oldatba menő fém elektród
potenciálja (hidrogénelektróddal szemben)
- *R*_k külső ellenállás
- R_b belső ellenállás

Jó hatásfokú, fémes kontaktus esetén R_k értéke elhanyagolható a belső ellenállással szemben (R_b). Ebben az esetben a korróziósebesség sebesség mindig a fémek közé került elektrolit oldat fajlagos vezetőképességétől függ.

Uzemek, csarnokok vagy szabadtéri üzemi területek levegőjének relatív páratartalma tehát döntően befolyásolja a korrózió sebességét és kialakulását. Nedvesebb talajban mindig jelentősebb az elektrokémiai korrózió, mint szárazabban. Tengervíz a benne található Cl₂ molekula vezetőképessége miatt mindig jelentős korróziós károkat tud okozni. A fenti összefüggés alapján megállapíthatjuk: $\varepsilon_K - \varepsilon_A$ különbség csak elméleti jellegű. Az adott körülmények hatására alakul ki a valódi, mérhető potenciálkülönbség, ami aztán döntően befolyásolja a korrózió nagyságát [30, 31]. Csak a légmentes kapcsolat állíthatja le a korróziós folyamatokat a vezetőképesség megszűnése miatt. Tipikus galvánelem működést láthatunk a 8. ábrán [32, 33]. A réz a potenciálsorban elfoglalt helye alapján nem lép reakcióba a vízgőzzel, sósavval esetleg más jó vezetőképességgel rendelkező összetevővel terhelt levegőben. A cink felülete változik a folyamat során kilépő Zn⁺⁺ miatt, és ennek következtében nagyobb hely alakul ki a hidrogén redukálására (8.ábra). Ez a hidrogénfejlődés beindulását elősegíti. A redukció felgyorsulás elektron hiányt okoz a cinkben, megnövelve az anódos folyamat reakciósebességét, és ez fokozott cinkion-távozással jár.



8. ábra Cinkből és rézből álló korróziós galvánelem működésének elve [10]

Galvánkorrózió gyakorlati kialakulásának főbb területei

A villamos- és energiaipar nélkülözhetetlen elemei, alkatrészei a villamos kötések. Ezek általában két vagy több elemből álló kapcsolatok, melyek feladata az áramvezetés és a mechanikai szilárdság biztosítása. Ezen kötések anyagukat tekintve többfélék lehetnek. Legtöbbször rezet, acélt, alumíniumot, ezüstöt és ezeknek a különböző ötvözeteit használják fel. Legjellemzőbb villamos kötőelemek és alkatrészek a 9. ábrán láthatóak.



9. ábra Villamos kötőelemek (szerző)

Gazdasági és/vagy műszaki megfontolásokból adódóan többnyire két különböző fém kerül szoros kapcsolatba egymással. Ezek a környezet és az áramerősség hatására, de főként a fémek elektródpotenciáljának különbözősége miatt galvánkorróziós hatásnak vannak kitéve (10. ábra). A különböző fémek eltérő elektródpotenciál-értékei miatt ugyanis a kötőelemek helyi galvánelemként kezdenek el működni. A negatívabb fém ilyenkor korrodálódik, és felületén korróziós folyamatok indulnak meg. Ez károsan befolyásolja az áramátvitelt a megnövekedett átmenetiellenállás miatt. Jelentősen romlik a kötés szilárdsága a korrodálódott fém mennyiségének vesztesége miatt [34].



10. ábra Különböző fémek galvánkorróziós károsodásai (szerző)

A kialakuló korróziótermék (oxidréteg) akadályozza a tiszta fémes érintkezési felületet. Általában agresszív vegyszerek (savak, lúgok), elektrolitok vagy korrózió szempontjából releváns mikroorganizmusok jelenléte, valamint a különböző fémek közös jelenléte okozhatja a korróziót [35].

A fémek anódos folyamat során elektronvesztéssel oldódhatnak (15):

$$Me \leftrightarrow Me^{n+} + ne^{-}$$
 (15)

ahol Me a szilárd fémet, Meⁿ⁺ az oldott fémiont, n pedig az elektronok töltésátadási számát jelöli nedves környezetben. Ismert, hogy a korróziós folyamat során külső elektronpolarizáció nélkül energetikai/hőmérsékleti változások mennek végbe. A szabad elektronok katódos folyamatban fogynak el (oxidálódnak) (16):

$$Ox + ne^- \leftrightarrow red.$$
 (16)

A két reakció párhuzamosan megy végbe [36, 37].

A fémek elektromos potenciáljai eltérőek, amit vezetőképes közegek (párás levegő, nedvesség, víz, sós víz) jelenlétében lehet számszerűsíteni. Különböző fémek

kombinálása előtt fontos ismerni az elektród potenciáljaikat. A fémek közötti kapcsolatot lehetővé tevő elektrolit jelenlétében meg kell határozni az elektród potenciálok alapján a galvánkorrózió lehetőségét. Az elektronok átadása egyik fémből a másikba elektromos áramot eredményez, és annak a fémnek a gyorsított korrózióját okozza, amelyik elektronokat veszít, míg a másik, amelyik elektronokat kap, megmarad.

A galvánelemekhez szükség van egy anódra (nagyobb negatív elektromos potenciálú fém, itt halmozódnak fel az elektronok, a korrózió felgyorsul), egy katódra (kisebb negatív elektromos potenciálú rendelkező fém, itt fogynak el az elektronok, a fém védve van a korróziótól), és egy elektrolit általi elektromos kapcsolatra, amely az elektronokat az anódról a katódra továbbítja [37].

Ha mindezek a feltételek egyszerre vannak jelen, a kevésbé nemes anód gyorsított ütemben fogy. Az elektromospotenciál-különbségek és az elektrolit agresszivitása a fő tényezők, amelyek meghatározzák a korrózió sebességét. Az áram, amely a kevésbé nemes fémből a nemesebb fémbe áramlik, a kevésbé nemes fém oxidációját okozza. A galvanikus korrózió a fém oldódását okozza, és az érintkezési zónára korlátozódik.



11. ábra Villamos kapcsolószekrény (szerző)

A galvánkorrózió elkerülése vagy csökkentése érdekében szem előtt kell tartani a fémek megfelelő kombinációjának kiválasztását. Horganyzott acél és réz kötőelemek, amelyeket általában az átviteli és elosztó távvezetékekben használnak. Két gyakorlati alkalmazási példa látható a 11. ábrán. A képeken villamos szekrény normál és hőképe látható normál üzemi hőmérsékleten. Változatlanul elterjedt napjainkban a fűtés-, és szereléstechnikai megoldások között az alumínium-réz, vas-réz, vas-alumínium fémpár használata a különböző ipari és háztartási alkalmazásokban. Az elérni kívánt szilárdság, hőtechnikai és gazdasági paraméterek megkövetelik a fent említett anyagok használatát. Azonban ugyanúgy, mint a villamos kötőelemek esetén, itt is galvánkorróziós hatás alakulhat ki a megfelelő környezeti összetevők hatására [37, 38].

A fűtéstechnika gyakorlati anyagai között a réz és a vas valamilyen ötvözetét találjuk. Közelebbről megvizsgálva a cellareakciókat, az alábbi összefüggésekkel írhatjuk le a folyamatot (17), (18) [14]:

$$Cu^{2+} + 2e^{-} = Cu = +0,34 V E^{0}$$
 (17)

$$Fe^{2+} + 2e^{-} = Fe^{-} - 0,44 V E^{0}$$
 (18)

Az elektródpotenciálsor szerint a vas a negatívabb fém, tehát az oxidációs folyamat rá lesz jellemző, ami korróziótermék képződését jelenti. Az anódos folyamat azonban nem nélkülözheti a vele egy időben kialakuló katódos folyamatot, tehát az oxidáció mellett redukció is végbemegy. A levegő relatív páratartalma (elektrolit film réteg), aminek segítségével indul és marad fenn a galvánkorrózió nem tartalmaz rézionokat, így azok a reakció során felszabaduló elektronokat nem tudják felvenni. A vízmolekulában lévő hidrogén ionok (disszociált állapot) azonban igen, elérve a katódos folyamat létrejöttét. Ez alapján akár a réz is oldatba mehetne, de mindig a legnagyobb potenciál különbség irányába indul meg a korróziós folyamat. A vizsgált esetben ez az oldott oxigén és a vas különbségét jelenti, ezért az anódos folyamat a negatívabb vas felületén fog kialakulni (19), (20), (21), (22) [39, 40].

$$E^0 = 0.81 \text{ V}$$
 $O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4 \text{ OH}^-$ (19)

$$E^0 = -0.41 \text{ V} \quad 2H^+ + 2e^- = H_2$$
 (20)

$$E^0 = 0,34 \text{ V} \quad Cu2^+ + 2e^- = Cu$$
 (21)

$$E^0 = -0.44 \text{ V} \quad \text{Fe}2^+ + 2e^- = \text{Fe}$$
 (22)

A folyamatot a 12. ábra illusztrálja.



12. ábra Anódos folyamat a vas felületén (szerző)

Az előzetes számítások sem vezetnek azonban mindig eredményre. Ha a reakcióban résztvevő felek, vagy csak akár az egyik, passzivitást mutat, nem jön létre a korróziós folyamat. Zárt rendszernél (pl. fűtési rendszer) csak az oxigén folyamatos utánpótlásával alakul ki folyamatos reakciósebességű galvánkorrózió. Az oldott oxigén elfogytával megáll a folyamat. Az ónnal bevont acél konzervdobozok elektródpotenciálja $E^0 = -0.14$ V. Az ón felületén tartózkodó hidrogéniont viszont csak jelentős túlfeszültség árán, nagy energiabefektetéssel tudnánk onnan leszakítani, ezért természetes körülmények között az oldódás el sem indul. Ide sorolhatjuk a rozsdamentes acélokat is. Az ötvözőanyagként használt króm miatt itt is csak nagymértékű túlfeszültség segítségével tudnánk a hidrogéniont leválasztani, ami után a korróziós folyamat elindulna. Az acél felszínén kialakuló króm-oxidréteg nem engedi az oldott oxigén és a hidrogénion redukcióját. Figyelnünk kell a különböző fémek felületének viszonyára is: minél nagyobb a nemes fém (katód) felülete, annál nagyobb lesz az áramsűrűség az anód (kevésbé nemes fém) felületén és ez egyre nagyobb mértékű korróziót generál. Jó példa erre a cinkkel bevont csavar mellyel nagyméretű acéllemezeket rögzítünk. A korrózió a csavarokat gyorsan tönkre teszi. Ha megfordítjuk a szerelési előírást, vagyis cinkkel galvanizáljuk a lemezt és rozsdamentes acél csavarokat használunk a korróziós hatás jelentősen lecsökken.

1.3 Korrózió mérhetősége, mérési módszerek

Ahhoz, hogy elkerüljük a baleseteket, katasztrófákat és a nagy anyagi veszteségeket, elengedhetetlenül szükséges a korróziós folyamatokat felismernünk és jellemeznünk valamilyen mérőszámmal. A felismeréshez legtöbbször elégséges a fémben történő változást leírnunk. Ezt kvalitatív eljárásnak hívja a korróziós tudomány szakmai nyelvezete. Tulajdonképpen egy egyszerű vizuális megfigyelésről van szó, amely viszont igen jól használható felületi rozsdásodás esetén. Nem alkalmas ugyanakkor kristályhatárok mentén (a fém belsejében) kialakuló állapotok jellemzésére. Ahhoz, hogy következtetni tudjunk a teljes tönkremenetel állapotához, mérhető adatokra van szükségünk. A korróziós szakember feladata mindig egy korróziós mérőszám megalkotása és ez ütközik nehézségekbe. Hiszen a fémek tönkremenetelét számos tényező befolyásolja. Egy kvalitatív (számszerű) mértéket megállapítani igen összetett feladat, és nem is fejezi ki pontosan a folyamat jellegét. Tehát a korróziósérzékenység jellemzéséhez egy úgynevezett korróziósebességet kell megállapítanunk. Sajnos a folyamatok bonyolult sokaságára való tekintettel nem létezik egységesen jellemző mérőszám. A mérések általában csak egy adott, körülhatárolt kérdésre adnak választ. Tudniillik még laboratóriumi körülmények között ugyanolyan feltételekkel és tudományos igényességgel kivitelezett kísérletek sem reprodukálhatók mindig ugyanolyan eredménnyel. Csak bizonyos mérési határok között, hibahatárok megadásával következtethetünk egy-egy folyamat egészére. A természetben vagy ipari körülmények között a befolyásoló tényezők nagy száma – relatív páratartalom, hőmérséklet, pH érték, változó összetételű fémtartalom, különböző igénybevételek miatt ez a feladat még nehezebb. Mégis törekedni kell a minél sokoldalúbb vizsgálatra, hogy megfelelő következtetéseket tudjunk levonni a fém végleges tönkremenetelét illetően [41–43].

1.3.1 Graviometria módszer

A graviometria a legáltalánosabb módszer, amellyel azt vizsgáljuk, hogy a fém mekkora hányada alakult át a korróziós folyamat következtében oxidokká, sókká esetleg fémes vegyületekké. Ilyenkor azt elemezzük, hogy az illető anyag mennyit vesztett a tömegéből (graviometria) [43, 44]. Megadhatjuk ezt a csökkenést g/m²-ben, de önmagában ez még

nem jelent sokat, ha nem időegységre vonatkoztatunk. Az összefüggésbe egy harmadik változót is számításba kell venni az időt. A folyamat sebességétől függően dolgozhatunk $(g/(m^2 \cdot \acute{o}ra))$ vagy $(g/(m^2 \cdot nap))$ vagy $(g/(m^2 \cdot \acute{e}v))$ összefüggésekkel. Ekkor egy számítási módszert kapunk a korrózió kinetikájának leírására. Az iparban azonban a gyártást felügyelő mérnökök elsősorban arra kíváncsiak, hogy az általuk működtetett fém berendezés mennyi ideig használható balesetmentesen. Ezért tehát az előző összefüggést átalakíthatjuk (mm/év) formába is, mely már méretezési alapként szolgálhat. Ezzel egy sokkal használhatóbb dimenziót alkottunk, mellyel már lehet előre látni és tervezni. Viszont nem alkalmazható ez a metódus, ha nem egyenletes korrózióról, hanem a lokális korróziótípusok egyikéről van szó. Ebben az esetben kitüntetett helyeken ugyanis lehetséges a fém teljes tönkremenetele a tömegveszteség viszont alig enged következtetni az egész szerkezet állapotára. Nem mond semmit a graviometria módszere a már említett fémen belüli korrodáltságról, amikor a szemcshatáron történik elváltozás. Ebben az esetben tömegcsökkenést szinte lehetetlen mérni, annyira kismértékű, viszont az egyik legveszélyesebb korróziós folyamat, ezért más módszer szükséges a már szerkezeti hibát okozó folyamat feltárására.

1.3.2 Ellenállásmérés alapú vizsgálat

Megfigyelhetjük ezeket a korróziós folyamatokat a fémek vezetőképességének szempontjából is. A fémek korrózió okozta anyagvesztesége miatt ugyanis a keletkezett első és másodlagos korróziótermékek megváltoztathatják az anyag elektromos tulajdonságait. Erre a fajlagos ellenállás megváltozásából következtethetünk leginkább. A mérési módszer sorozatvizsgálatok elvégzésére is alkalmas. Főleg huzalokon végzik és hosszú, de vékony keresztmetszetű alkatrészeken is kivitelezhető. A fizikai elv a következő [5] (23):

$$\mathbf{R} = \boldsymbol{\varrho} \frac{l}{A} \quad [\Omega] \tag{23}$$

ahol: **q** a fajlagos ellenállás,

l a vezető hossza,

A pedig a vezető keresztmetszete

Ha a korrózió a felületre egyenletesen hat, az elektrokémiai kölcsönhatások miatt a huzal keresztmetszete vékonyabb lesz. A keresztmetszet nagysága és az ellenállás érték egymással fordított arányban áll ezért az ellenállás megnő. Ezt mérhetjük egy egyszerű

ellenállásmérővel, képet kapva a korrodálás mértékéről. A módszer alkalmas a már említett kristályközi elváltozás kimutatására is, mivel ez az anyagban inhomogenitást okoz, ugyanis ekkor mindig megváltozik a fajlagos ellenállás (**Q**) az anyag belsejében. A módszer további előnye még az automatizálhatósága. A korróziós folyamat mérhetőségét ilyenkor maga az ellenállás relatív változása adja a következőképpen [5] (24):

$$K = \frac{\varrho_0 - \varrho_1}{\varrho_0} \cdot \mathbf{100} [\%]$$
(24)

ahol: K a korrózió,

Q0 az eredeti fajlagos ellenállás,

Q1 megváltozott ellenállás.

1.3.3 A szakítószilárdság és a nyúlás csökkenésének vizsgálata

Következő fontos terület vizsgálatainkban a nem látható, az anyag belsejében létrejövő korróziós elváltozások precíz feltérképezése, mérése, mint erre már röviden utaltam az előzőekben. Ez a legveszélyesebb, legalattomosabb tönkremenetel fajta is egyben. Tekintsük át a szemcsehatáron (interkrisztallin) esetleg a kristályszemcséken (transzkrisztallin) keresztül keletkező korrózió előfordulási okait. Elsősorban ausztenites rozsdamentes acéloknál fordulhat elő, illetve nagy szilárdságú alumíniumötvözeteknél is megfigyelték már. A nagyon tiszta, szennyezőktől mentes fémeknél viszont megjelenése kizárható. A korróziós jelenség a szemcsehatárokon indul a felület közelében, innen halad az anyag mélyebb rétegei felé. A folyamat gyakorlatilag láthatatlan, feltárására és előrehaladottságának megállapítására speciális, nem megszokott korróziós vizsgálatokat kell elvégeznünk. A szemcseközi korrodáltság tulajdonképpen egy mikro repedés vagy ezek halmaza, mely kedvezőtlenül befolyásolja az anyag mechanikai, szilárdsági tulajdonságait. Kézenfekvő tehát, hogy azt mérjük, ami változik. Ezek a mechanikai sajátságok, amik az anyagban megváltoznak, segítenek a korrózió mértékének számszerű feltérképezésében [45, 46, 47]. Egy fémből készült szerkezet méretezéséhez precízebb és biztonságosabb is ez a megoldás. Nem szabad összevetni a szerkezet felületén keletkezett méretcsökkenés mértékét a fém belsejében történt elváltozásokkal. Nagyságrendi hibákat véthetünk, ha rosszul becsüljük meg a folyamatra jellemző korróziósebességet. A rozsdamentes acélok esetén a hegesztési hő hatására kiválások (Cr₂₃C₆) jöhetnek létre a szemcsehatáron így a kiválások környezetében a Cr tartalom lecsökken, ami a korrózióállóság csökkenését okozza (13. ábra).



 13. ábra Hegesztett rozsdamentes acél 6%-os Vas(III)-kloridos maratás után(szerző)

A szerkezeti anyagok mechanikai vizsgálatai közé tartozik a szakítóvizsgálat. Ezeket a már jól ismert módszereket szabványok rögzítik. A vizsgálandó anyagból megfelelő számú mintát (próbatestet) kell biztosítani, és elvégezni a mechanikai méréseket. A korróziós igénybevétel után megint meghatározzuk a mechanikai tulajdonságokat, és az itt kapott értékekből fejezhetjük ki a változás mértékét százalékosan. Mivel vizsgálataim célja a korróziósebesség meghatározása, érdemes időegységenként elvégezni a méréseket és ábrázolni azokat korrózió-idő diagramban. A korróziós folyamat mechanikai szempontból történő legfontosabb mérőszámai tehát [14] (25), (26):

$$\mathbf{K}_{\rm sz} = \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0} \cdot \mathbf{100\%}$$
(25)

ahol: Ksz a korrózió szakítószilárdság szerinti mértéke,

- σ_0 a vizsgált fém eredeti szakítószilárdsága,
- σ_1 a vizsgált fém korrózióval terhelt szakítószilárdsága.

$$\mathbf{K}_{ny} = \frac{\delta_0 - \delta_1}{\delta_0} \cdot \mathbf{100\%}$$
(26)

ahol: Kny a korrózió nyúláscsökkenés szerinti mértéke,

- δ_0 a fém eredeti nyúláscsökkenése,
- δ_1 a fém korrózióval terhelt nyúláscsökkenése.

2 TERMOGRÁFIA ÉS ALKALMAZÁSA A KORRÓZIÓS VIZSGÁLATOKBAN

A mai modern műszaki diagnosztikai vizsgálatok elképzelhetetlenek érintés nélküli hőmérsékletmérés nélkül. A nagy intenzitással folyó kutatások, a sorozatgyártás nagyságrendekkel elérhetőbbé tette a hőkamera jelenlétét az időszakos állapotvizsgálatok terén. Felhasználóbarát kezelhetőség, könnyen állítható mérési paraméterek rendkívül egyszerű mérési metódusokat sugall az átlag felhasználó számára. Azonban a termográfia mint képalkotó mérési eljárás megfelelően elsajátított elméleti és gyakorlati tudás hiányában szinte minden esetben rossz, kiértékelhetetlen, hibás hőmérsékleti eredményeket produkál. Biztonságtechnikai, munkavédelmi szempontból ez élet- és közveszélyes állapotokat okozhat.

2.1 A termográfia alapjai

Az infravörös sugárzáson alapuló hőmérsékletmérés, illetve a hőkamerás mérési módszer a testek hősugárzó képességétől függ. A hőmérsékleti sugárzás az a folyamat, amely az atomok hőmozgása miatt elektromágneses hullámokat bocsát ki magából. Ennek az energiának a nagy része másik testre emittálódhat vagy reflektálódhat, továbbá transzmittálódhat is. Ha a vizsgált darabra érkező sugárzást az maradék nélkül elnyeli, akkor abszolút fekete testről beszélhetünk. Amennyiben teljes mértékben visszaverődik, akkor abszolút tükröződő testről, és hogyha a testen teljes mértékben áthalad, akkor átlátszó anyagról beszélhetünk. A hősugárzásnak, mint elektromágneseshullám terjedésnek közvetítő közegre nincs szüksége. Az energiamegmaradás törvényének szemszögéből vizsgálva a sugárzási paramétereket az alábbi összefüggést találjuk (27):

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \tag{27}$$

ahol:

- ε emissziós tényező;
- ρ reflexiós tényező;
- τ transzmissziós tényező.

A táblázatból (1. táblázat) látható értékek alapján, a gyakorlati következtetés, hogy a tökéletes tükör és a tökéletes ablak hődetektoros technikával nem mérhető, hiszen számottevő sugárzást nem bocsátanak ki magukból. Anyagiminőségük nem teszi lehetővé

felületük hőmérsékletének termográfiás meghatározását. Ezeket az anyagokat viszont a méréstechnikában, a fenti tulajdonságaiknak köszönhetően széles körben alkalmazzák.

Anyag	Tényező	Összefüggés
Fekete test	ε = 1	$\tau = 0, \rho = 0$
Tökéletes tükör	ρ = 1	$\varepsilon = 0, \tau = 0$
Tökéletes ablak	τ = 1	$\varepsilon = 0, \rho = 0$
Nem átlátszó test	$\tau = 0$	$\epsilon + \rho = 1$

1. táblázat Anyagok fizikai jellemzői

A hősugárzás alaptörvénye a Stefan-Boltzmann-törvény [48] (28):

$$\mathbf{E}_{(\mathbf{f})}(\mathbf{T}) = \mathbf{\sigma} \times \mathbf{T}^4,\tag{28}$$

ahol:

- E(f) fekete test emissziós képessége;
- σ Stefan-Boltzmann féle állandó: 5,67 10⁻⁸ [J/m² K⁴];
- T hőmérséklet [K].

A törvény szerint a T hőmérsékletű fekete test egységnyi felülete által egységnyi idő alatt kisugárzott teljes energia arányos a test hőmérsékletének negyedik hatványával. Látható tehát, hogy idealizált esetben csak a fekete test képes az összes hőenergiát elnyelni és azt kisugározni. Ilyen a valóságban azonban nincs. A különböző anyagok más és más mértékben képesek az energiát emittálni. Minél inkább hasonlítanak az ideális fekete test tulajdonságaihoz, annál pontosabb mérést tesznek lehetővé. Ellenkező esetben korrigálnunk kell a mérési eredményünket [48].

2.2 Az infravörös sugárzás mérési elve és lehetőségei

Mint az eddigiekből láthattuk, a bennünket körülvevő tárgyak láthatatlan elektromágneses sugarakat is bocsátanak ki magukból. Ahhoz, hogy ezeket érzékelni tudjuk, megfelelő berendezésre van szükségünk, amely érzékelők segítségével villamos jelekké alakítja át ezeket a sugárzásokat [48-50]. A jeleket egy speciális elektronika digitalizálja. A digitalizált adatként kapott eredményt a szemünk által érzékelhető színekké transzformálja. Ez a berendezés a hőkamera vagy pirométer. Működési elve az 14. ábrán látható



14. ábra Termikus detektorok működési sémája [51]

Ahhoz, hogy a valóságnak megfelelő hőmérsékleti értéket kapjunk, figyelembe kell vennünk az ideális fekete testtől való eltérést [52]. Leegyszerűsítve elmondható, hogy a valós hőmérsékleti intenzitást a már említett változó paraméterek befolyásolják (29):

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1, \tag{29}$$

A gyakorlatban az emissziós tényező mindig kisebb, mint 1. A transzmissziós tényezőt a legtöbb anyagnál elhanyagolhatjuk, ebből következően csak az első két fizikai változóval kell számolnunk. Annál pontosabb a mérés minél jobban megközelítjük a test valódi hősugárzás-kibocsátási képességét (ɛ). Ezt a korrekciót a modern kamerák specifikációi teszik lehetővé. Legkisebb változtatást a sötét, érdes anyagoknál, legnagyobb eltérést pedig a világos, fényes felületeken kell meghatározni. Az érintés nélküli hőmérsékletmérés kivitelezhetetlen polírozott, tükörszerű, fénytanilag átlátszó felületeknél. A 2. táblázat a villamosiparban használt, néhány szerelési anyag sugárzás kibocsátó képességét mutatja.

Fém	Felület jellege	3
vas	oxidált	0,45-0,85
alumínium	oxidált	0,18-0,45
sárgaréz	oxidált	0,45-0,5

2. táblázat Sugárzás kibocsátó képesség

2.3 Hőkamera alkalmazási lehetősége

Jelen korunkban nem élhetünk elektromos áram nélkül, tehát az áramellátás zavartalansága a biztonságtechnika egyik alapvető kérdése. Minthogy az elektromos hálózatok nagyon sok fémes kapcsolódási pontot tartalmaznak, és ezek korróziója sokféle üzemzavar forrásai lehetnek, ezért vizsgálatuk az üzembiztonság szempontjából igen fontos. Minthogy a korrózióból eredő károsodások rendszerint rejtve maradnak (többnyire láthatatlanok), ezért csak körülményesen fedhetők fel. A fémes összeköttetések élettartamának meghatározása nagyon nehéz, mert a korróziós jelenség nehezen közelíthető számítással. Az elektromos érintkezésből adódó káresemények nagy problémákat okozhatnak az ipari és a magánéletben is. Az elektromos eszközök élettartamának előrejelzése évszázadunk kihívása. A legegyszerűbb vizsgálatok a vizuális ellenőrzés és a hőmérsékletmérés. A hőmérsékletmérés miatt viszont áramtalanítani kell az adott kötést, ami üzemkimaradást okoz. A hőmérsékletmérés nem egyszerű a hagyományos módszerek alkalmazásával, mert ebben a folyamatban kikapcsoljuk az áramot. Az áramellátás szüneteltetése az iparban és az otthonokban is károkat okozhat. A korszerű technológiai fejlődés eredményeként új eszközöket találhatunk a biztonságos és pontos hőmérsékletméréshez [52]. Egyik ilyen eszköz a hőkamera, a termográfia legfontosabb mérőeszköze. A nagysorozatban történő gyártás lehetővé teszi az egyre szélesebb körben való elterjedését. Villamos rendszereknél számos hibajelenség léphet fel, ami elsősorban a túláram okozta felmelegedés következménye. A fent említett korróziós hatásokon kívül gondot okozhat a menetzárlat, vezetékszakadás, a berendezés túlterhelése. Problémaforrás lehet még a nem megfelelő csatlakozási mechanika, kötéslazulás, különböző deformációk az érintkező felületeken. Viszont hőkamera használatával feltárható a hiba pontos helye. A 15. ábrán egy hőkamera kiértékelő szoftverének képe látható.



15. ábra Hőkamera kiértékelő szoftver felülete

Hőtérképet készíthetünk a vizsgált berendezésről, melyet referenciaként alkalmazhatunk a későbbi ellenőrzések alkalmával. Üzemi hőmérsékleteket ellenőrizhetünk, megállapíthatjuk a szakszerű karbantartás minőségét. A termográfiai mérés segítségével, jóval a meghibásodás előtt képet kaphatunk a villamos rendszer állapotáról. Ezeknek a méréseknek igen nagy a költséghatékonysága, hiszen egy ma már olcsónak számító mérőberendezéssel nagymértékben lehet csökkenteni az állásidőt, katasztrófához vezető, nagy anyagi veszteségekkel járó tűzeseteket lehet megelőzni.

2.4 Hőkamera használata a gyakorlatban

- A pontos felületi hőmérséklet értékét nagyban befolyásolja a mérendő tárgy emissziós tényezője és annak a helyes korrekciója. Nagyságrendi hibát vétünk ennek a nem megfelelő megítélésével (100-150%). Eddigi tapasztalataim szerint más paramétereket is figyelembe kell venni. Eltérést mutathat, a közvetlen érintéssel és a kamerás méréssel meghatározott eredmény.
- A pontatlanság következhet az infravörös sugárzás valamilyen közegen való áthaladásából vagy a helytelenül kiválasztott mérési hullámhossz (rövid vagy hosszú) alkalmazásából. A villamos kötések üzem közbeni legnagyobb hőmérséklete tapasztalataim szerint 300 °C.
- A legpontosabb mérési eredményt hosszú hullámú elven működő hőkamerával kaptam.
- 4. Gondot okoz a mérendő felületen található, nagyszámú anyagminőség előfordulása, a nem megfelelő felbontású hőkamera (pixelenkénti állítható lehetőséggel) hibás eredményeket detektál.

- 5. Problémát okozott kültéri méréseknél a napszak helyes kiválasztása is, mert ügyelni kell a napsugárzás okozta interferenciák elkerülésére.
- 6. Mérőszekrényben, üzem alatt lévő kapcsolótáblákon érdemes több helyről és legalább ötször elvégezni az ellenőrző méréseket.
- 7. Kritikus, nagy pontosságot igénylő, biztonságot befolyásoló méréseknél érdemes hibaszámítást végezni a megfelelő hibahatár megállapításához. Gyakorlati tapasztalat, hogy a mérendő tárgy színe a mérési eredményre csak nagyon kis mértékben gyakorol hatást (0,1-0,3%).

2.5 A mérést befolyásoló tényezők

Méréseket valós környezetben az ideálistól eltérve kell elvégezni. A valódi testek hőkibocsátó (sugárzási) kapacitása, a mérés körülményei minden esetben befolyásolják a termográfiai analízist. A legfontosabb paraméterek a következők:

- emissziós tényező, ε<1;
- mérőeszköz hullámhosssza
- mérési útszakasz jellemzői.

Ezek közül a legfontosabb az emissziós tényező. Helytelen kiválasztása akár jelentős hőmérséklet mérés különbséget is okozhat. Feketeségi foknak is nevezik, és egyszerűen fogalmazva a tárgy felületének sugárzási képességét fejezi ki. Mértéke az ideális sugárzótól való eltérést mutatja. Minden esetben függ a mérendő objektum felületének anyagától, érdességétől a mérőeszköz (hőkamera) és a tárgy által bezárt szögtől. Befolyásolja a hőmérsékletmérést a háttér és tárgyhőmérséklet is. Sokan a hődetektálást végzők közül nem veszik figyelembe a mérendő objektum környezetében elhelyezkedő tárgyak által sugárzott hő nagyságát. Ez a hő reflektálódik a tárgyon, megváltoztatva a termokamerába jutó infravörös sugárzás valódi mennyiségét. Ha az emissziós tényező értéke pontatlan, a két hiba erősíti egymást. Az alábbi ábrán (16. ábra) villamosszekrény behúzótekercsének hibás hőmérséklet meghatározása látható. A háttérhőmérséklet 20 °C-al való eltérése és a fémes felület emissziójának alulbecsült (25 %) értéke 20,2 °C-os eltérést eredményezett.


16. ábra Behúzótekercs hő- és fényképe (szerző)

Fémek esetén a hőmérséklet függvényében változó kristályszerkezet az, ami más és más emissziós tényezőt jelenthet. A 17. ábrán különböző fémek specifikus emissziós tényezőjét láthatjuk a tárgyfelület hőmérsékletének függvényében.



17. ábra Különböző fémek emissziójának hőmérsékletfüggése [53]

A grafikonból jól látható, hogy az emissziós tényező változása csak nagyobb hőmérsékleten számottevő, ebben a tartományban viszont figyelembe kell vennünk, a minél pontosabb hőanalízis miatt.

2.6 A hőkamera hullámhossztartományának szerepe a sugárzás mérésében

Az érintés nélküli hőmeghatározás kivitelezése főként a levegőn keresztül történik, ami fizikai sajátságokat vet fel a mérőműszer kialakításában és a mérés folyamán. Többnyire három spektrális tartomány használata alakult ki. Beszélhetünk hosszú hullámú (8–14 μm), középhullámú (3–5 μm) és speciális esetekben rövidhullámú (1–2 μm) hőkamerákról. A termográfiával foglalkozó szakember feladata eldönteni melyik a legmegfelelőbb az adott feladat elvégzésére. Helytelenül választott méréstartomány hatást gyakorol a mérési eredményre. A gyakorlat azt mutatja, hogy a középhullámú mérőeszköz érzéketlen az kicsi hőmérsékletekre viszont a nagyobb hőmérsékleti (400 °C) tartományban pontosabb mérést tesz lehetővé. Kis hőmérsékletek esetén célszerűbb hosszú hullámú kamerát használni. Az ipari gyakorlatban azonban univerzálisan elterjedt hullámhossz-tartomány szintén a hosszú hullámú hőkamera, kis és nagy hőmérsékletek mérésére egyaránt. Kisebb korrekcióval megfelelően pontos eredményt kaphatunk például a villamosipar nem kívánatos melegedései terén. Speciális esetekben, amikor figyelembe kell vennünk a mérendő tárgy spektrális emisszióját, használhatjuk a rövidhullámon mérő hőkamerákat igen nagy hőmérsékleteken.

2.7 Mérési útszakasz jellemzői

A méréseket sok egyéb változó mellett befolyásolja az infravörös sugárzás tárgytól a mérőműszerig megtett útja is. Ez az út néhány kivételtől eltekintve (vákuum) legtöbbször a levegő. A benne található szennyező anyagok por, korom, füst, különféle vegyi anyagok hátrányosan befolyásolhatják mérési eredményeket. Szintén hatással van az atmoszférában jelen lévő vízpára, oxigén, szén-dioxid, nitrogén, különféle szénhidrogének jelenléte. Torzíthatják az eredményt a zavaró források, a levegő hőmérséklete is. Ezek a hátráltató tényezők már pár méterről is hátrányosan módosíthatják az átbocsátó képességet. Végül figyelembe kell venni a levegő fizikai sajátosságait, átviteli paramétereit is. Nem minden hullámhossz-tartományban van mód maximális intenzitású infravörös sugárzás detektálására. Számolt és kísérleti úton úgynevezett meghatározott atmoszférikus ablak helyek alakulnak ki a légkörben, melyeknek jók az átviteli tulajdonságaik. A gyártók ezekhez az ablakokhoz igazítják a különféle hullámhosszon előállított mérőberendezéseiket. A hőkamera kiértékelő szoftvere lehetőséget ad, számos kedvezőtlen hatás korrekciójának beállítására.

Összefoglalás

Az eddigiekben kísérletet tettem egy, az iparban új hőmérsékletmérési módszer bemutatására a teljesség igénye nélkül. Az érintés nélküli hőkamerás vizsgálat lehetővé teszi a hibásan, nem rendeltetésszerűen működő villamos kötések, más elektromos és mechanikus berendezések vizsgálatát. A módszer előnye a gyorsasága, balesetveszélymentes használata és a működés közbeni analizálási lehetősége. Ez utóbbi gazdasági megtakarításokat is eredményez. A hőkamerák nagy tömegben történő gyártása lehetővé teszi a könnyebb elérhetőségüket. Az elektronika mai fejlettségi szintje egyre kisebb és könnyebb berendezések gyártását eredményezi, megkönnyítve az alkalmazhatóságukat és a mobilizálhatóságukat. Igyekeztem bemutatni a termokamerás mérés legfontosabb fizikai hátterét, s mint gyakorlati felhasználó, összefoglaltam azokat az empirikus összefüggéseket, melyekkel precízebben elvégezhető a mérés a megvalósítás szempontjából.

A felhasználóbarát alkalmazhatóság a látszólag triviális kezelhetőség mögött egy komplex és széles körű tudásbázist igénylő méréstechnika rejlik. Pontos diagnosztikai vizsgálatokat csak hőtan-fizikai felkészültség és évekig tartó üzemi mérés tapasztalat útján lehet elsajátítani. Ma már az élet számos területén létjogosultságot nyert ez a vizsgálati módszer a villamosipartól kezdve katonai alkalmazásokon át az egészségügyig. Fontos tehát a termográfiás méréstechnika eredményét befolyásoló, előzőekben felsorolt tényezők alapos ismerete, és a korrekciós tényezők beállítása a hőkamera szoftvere által adott lehetőségek szerint [54].

3 A VILLAMOS KÖTŐELEMEK GALVÁNKORRÓZIÓJÁNAK LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATA

Célom egy gyorsított vizsgálat, mely lehetővé teszi a vizsgálandó anyag viselkedésének megfigyelését korróziós közegben. Amennyiben a méretarányok engedik közvetlenül, ha nem, akkor a vizsgálandó szerkezeti anyagból kimetszett mintadarab lesz a kísérlet tárgya. A laboratóriumi módszerek az üzemi (légköri, talajmenti stb.) körülményeket csak megközelíteni tudják, tökéletesen pontos képet nem közvetítenek, de segítségükkel nagyon jól közelíthetőek a valós viszonyok. Galvánkorrózió vizsgálatára szabványokat készítettek, melyek alapján a várható korróziós károsodásokat előre jelezhetik. Ilyen szabványok voltak például az MSZ 4380-86, amely természetes légköri viszonyok között vizsgálta az egymással érintkező fémek korrózióját vagy az ISO 8044:2020 szabvány, amely potenciál különbség mérése alapján becsülte a galvánkorróziós hatást. Szintén korróziós szabvány foglalkozik az összeépíthető fémek anyagválasztékával [55, 56]. Sajnos ezek a felsorolt szabványok visszavonásra kerültek, és helyettük az MSZ EN ISO 7441:2015 szabvány érvényes [57]. Ennek segítségével megelőzhetők az összeépítésből eredő galvánkorróziós károsodások majdani kialakulásai. Jelenleg a korróziós károsodások mérésére találhatók vizsgálati módszerek, és a galvánkorrózióra szabványosított módszerek, eljárások (ASTM G82, G71, ISO 23226). Kutatásom célja tehát egy új módszer kialakítása, mely segítségével modellezhető a villamosiparban előforduló kötőelempárok galvánkorróziója.

3.1 Kísérleti paraméterek meghatározása

A már említett gyorsított folyamatot több paraméter befolyásolásával érhetjük el. Rendszerint felgyorsul a korróziós folyamat a kialakított környezet (közeg) koncentrációjának (összetételének) változtatásával. Szintén gyorsul a hőmérséklet emelkedésével. Más és más az eredmény, ha a munkadarab és a körülötte lévő közeg közötti reakciók relatív sebessége változik. Teljesen más végeredmény alakulhat ki, ha nem ismert kellően a kísérleti paraméterek hatása a vizsgálni kívánt korróziós jelenségre.

3.2 Főbb szempontok kialakítása villamos kötőelemek galvánkorróziós vizsgálata során

Különböző fajtájú és összetételű fémek korrózióvizsgálatára a folyadék bemerítéses vizsgálat egy széles körben alkalmazott módszer. A különböző paraméterek kialakítása és változtatása itt kellően és precízen követhető. Ahhoz, hogy a lehető legtökéletesebb eredményt kapjuk a következő tényezőkre kell figyelni:

- Munkadarabok kijelölése (választása) lehet üzemen kívüli áramkörből szerelés, kimetszés útján vagy eredeti még fel nem használt minta alapján. Ismerni kell a kémiai, metallurgiai összetételt, tudnunk kell milyen fémipari megmunkáláson estek át. Kiemelten fontos egy sorozaton belül a homogenitás az egységes jellemzők megléte. Egyes vizsgálati módszerek megkövetelik a felület előkészítés különböző formáit. Esetünkben a nyers eredeti felszín vagy a polírozott kivitel jöhet szóba, a vizsgálati módszer függvényében.
- A kimetszett vagy gyári eredeti munkadarabon csak a legszükségesebb megmunkálás engedélyezett olyan, ami a befogáshoz elengedhetetlen. Fontos az egyforma beavatkozás betartása is, elkerülendő a különböző mechanikai igénybevétel hatására kialakuló egyéb korróziós hatás kialakulása.
- A vizsgáló helyiség hőmérséklete, légnyomása, relatív páratartama szigorúan állandó értéken legyen. Ezek a változók jelentősen befolyásolhatják a vizsgálandó folyamatok eredményét. Ha ingadozás lépne fel, azt minden esetben rögzíteni kell.
- A vizsgálandó próbadarabot körülvevő oldat fizikai-kémiai változóit szintén vizsgálni és figyelni kell, a pH, hőmérséklet, összetétel, relatív sebesség tartozik ide. Ezeknek akár csak kismértékben történő változása is nagymértékben hamisítja meg a mérési eredményeket. Ha a korrozív oldat párolgásra hajlamos, megfelelő időközönként pótolni kell.
- Célszerű elkülöníteni a megfigyelés alatt tartott munkadarabokat. Nagy pontosságra nem törekvő, gyors vizsgálatok esetén megengedett lehet egyszerre több minta vizsgálata közös közegben. Precíz, tudományos mérések viszont nem teszik lehetővé ennek kivitelezését. A munkadarab és a vizsgálóközeg felület-térfogat arányát szigorúan állandó értéken kell tartani. A mérési tapasztalataim alapján egységnyi felületre (1 cm²) legalább 100 ml oldatnak kell jutnia.
- A mintadarab edényzetében elhelyezkedő korróziós oldat homogenitása elsőrendű cél. Nem fordulhat elő koncentrációkülönbség egyes helyeken. Nem alakulhat ki

minimális mértékű hőmérséklet ingadozás vagy áramlási sebesség sem. A legjobb eredményt tehát kevert folyadékban érhetjük el. Ha megfelelő sebességgel mozgatjuk a vizsgáló közeget, megakadályozhatjuk a vizsgált munkadarab nemkívánatos helyein a korróziós termékek képződését. A túl nagy keverési sebesség beállítását is kerülni kell.

- A kettős fémek vizsgálati módszereinél mindig a teljes folyadékba merülés a követendő vizsgálati módszer. Kerülendő a csak részben bemerített mintadarab ugyanis a levegő-fém-oldat határon az oxigénellátottság mindig jóval nagyobb, mint a folyadék belsejében, így kialakulhat a differenciális koncentrációs elem, ami tönkreteheti a mérést.
- A speciális csavar-saru kötések felületén biztosítani kell az ellenállásmérés zavartalanságát. A korróziós igénybevétel nem hathat a két fémből álló rendszer teljes felületére, ezért biztosítani kell a megfelelő kontaktust befogó szerkezettel. Rozsdamentes acél előnyösebb a tartós használat miatt. Általában kerülendő az érintkezés más próbadarabokkal, itt a két fémből álló rendszer jó kontaktusa a kívánt cél.

3.3 A galvánkorrózió hatása a villamos kötőelemek legfontosabb üzemi jellemzőire

Az előző fejezetekben ismertetett mérési módok, módszerek szabványok sok oldalról képesek számot adni a korrózió mértékéről. Nem adnak azonban egyértelmű választ különböző fémek galvánkorróziójának megítélésében. Két vagy több fém összekapcsolódása jelentősen lerövidíti korróziósebességük meghatározását vizsgáló módszerek sorát. Nem jöhet szóba az eddigiekben ismertetett mérések nagyrésze. Az előre meghatározott nyomatékkal egymásnak feszülő kötőelemek csak részben teszik lehetővé a vizuális és mikroszkópos vizsgálatot, a graviometriát stb. Olyan fizikai paramétert kell választani, amely a korrózió mértékével arányosan változik, és pontosan kifejezi a galvánkorrózió mértékét.

A korróziós elemeket természetes körülmények között vizsgálatnak alávetni gyakran igen nehézkes vagy nem lehetséges. A villamos kötőelemek áramköri viselkedését csak laboratóriumi környezetben tudjuk modellezni. Itt lehet biztonságosan kis és nagy feszültség nélkül modellezni az iparban vagy más környezetben kialakult korróziós támadásokat. A fémek sok fizikai tulajdonsága közül az elektromos ellenállás változása az, amely leginkább alkalmas lehet egy zárt rendszer korróziósebességének pontos meghatározására. A felgyorsított korróziós folyamat és a vele parallel végzett nagy pontosságú ellenállás mérés kifejezi a két fém közötti állapotot.

Olyan készülék tervezése és kivitelezése tehát a cél, amely lehetővé teszi különböző következtetések levonását a galván korrózió előrehaladtáról. Egy ilyen berendezésben különböző fémpárokat vizsgálhatunk egyszerre, eltérő anód-katód arányokat alkalmazhatunk, ha a berendezést zárt térben helyezzük el, változtathatóvá válik a hőmérséklet és a nyomás, ami szintén befolyásoló tényező lehet egy korróziós folyamat jellemzésénél.

A vizsgálóberendezés használata lehetővé teszi az azonnali monitoringot a teljes időtartam alatt. Egyes minták cseréje válik lehetségessé függetlenül a többitől, nem befolyásolja azok eredményét. Számítógépes eszközökkel és szoftverrel kiegészítve grafikonokat, ábrákat készíthetünk és azonnali következtetéseket vonhatunk le az eredményekből. Elemezhetjük különböző korróziógátló anyagok, inhibitorok hatását a korróziósebesség segítségével. Az egyidőben vizsgálható minták száma csak a készülék befoglaló méreteitől függ, ami ez esetben az asztali műszerek méreteinek nagyságrendjébe tartozik. A mintabefogó (szorító) készülék anyaga a jó villamos vezetés miatt Cu E 99,9 anyagból készült és rezezett acél csavaranyák biztosítják a rögzítést. A mintabefogó acéllal (alumíniummal) érintkező része minden esetben védő pasztával kezelt, ami megakadályozza az oxid-képződést, elkerülendő a galvanikus hatás kialakulását a mérés ideje alatt. A kontakt korrózió kinetikáját jellemző villamos ellenállás nagyságát nagyérzékenységű Wheatstone-híd méri, mely $10^{-4} \Omega - 10^{6} \Omega$ tartományig terjed és stabilizált egyenáramú tápegység táplálja. A hozzátartozó galvanométer érzékenysége 0,095 · 10⁻⁸ nagyságrendű. A vizsgáló edényzet a különböző hőhatások elviselése miatt vastagfalú hőálló boroszilikát üvegből készült, mely hőelosztóval 155 °C -ig melegíthető. A homogén hőmérséklet és korróziós oldat (3 m/m%) elérése céljából állandó keverést kell biztosítani, mely méréseim alapján 300 fordulat /perc értéknél a legideálisabb. A beépített keverő fűthetősége 380 °C-ig szabályozható, az egyidőben vizsgálható minták száma csak a készülék befoglaló méreteitől függ. A kapcsolók segítségével kiválasztható a megfigyelt cella próbadarabja. A vizsgálataim megvalósítására a 18. ábrán látható új berendezést kellett építenem, amihez felhasználtam az irodalomban ismertetett [14, 44] mérőberendezés tapasztalatait, és saját vizsgálataimhoz új mérési elemekkel szereltem fel. Így egy eddig nem alkalmazott mérési összeállítást hoztam létre.



18. ábra A galvánkorrózió vizsgálatára kialakított berendezés (szerző)

Célkészülék használata lehetővé teszi a napokig, hetekig tartó vizsgálatok elvégzését. A több részből álló villamos kötőelem legfontosabb feladata az egyes részek közötti minél kisebb veszteséggel megvalósuló áramvezetés.

A fent vázolt készülék segítségével naprakészen nyomon követhetjük a legfontosabb paraméterek változását.

3.3 Villamos ellenállás változása az idő függvényében

3.3.1 Mérés 1. azonos katód-anód arány (acél-réz)

Mérés helye: Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. (Ó.E. BGK.) Kémia labor 212.

Mérés célja: kétfémes villamos kötőelemek galvánkorrózió következtében kialakuló átmenetiellenállásainak detektálása az idő függvényében.

Mérés menete: az erre a célra kialakított vizsgálóberendezésben, azonos katód-anód arányú, különböző anyagminőségű, villamos kötőelemek állandó hőmérséklet melletti ellenállás változás folyamatának követése (mérési adatok rögzítése). Az alkalmazott anyagokat és jellemzőiket a 3. táblázat tartalmazza.

Név	Ráforrasztásos kábelsaru rézvezetőkhöz (19. ábra)	Hatlapfejű csavar M3.0X10 (20. ábra)	Hatlapfejű anya M3.0 (21. ábra)	NaCl- oldat
Jellemző(k)	MeeI eng. szám:	Horganyzott,		3 m/m %
	c 2243/116,	tövigmenetes,		
	Msz: 05-45 1601-23	8,8		
	Anyagminőség:	Din: 933		
	Cu E 99,9	ISO 4017		
	MSZ E Cu-58			

3. táblázat A méréssorozathoz felhasznált anyagok



19. ábra Ráforrasztásos kábelsaru (szerző)



20. ábra Hatlapfejű csavar (szerző)



21. ábra Hatlapfejű anya (szerző)

A mérés során három darab azonos, saru-csavar páros megfigyelését végeztem egyidőben. A vizsgált villamos kötőelemek ellenállásértékeit meghatározott időnként rendre leolvastam az erre a célra kialakított, már bemutatott vizsgáló berendezés (18. ábra) segítségével. A kísérletben azonos (1:1) katód (réz saru) és anód (bevonatos acélcsavar) felületeket monitoroztam és a fizikai mennyiségek mérési eredményeinél használatos hibaszámítás módszerét használtam. Az eredményeket a 4. táblázatban foglaltam össze és a 22. ábrán ábrázoltam.

t	Mért	Átlag	Abszolút	Gaus-féle hiba	Relatív hiba
[h]	értékek	$\overline{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_n}{a_1 + a_2 + a_n}$	hiba	$\Lambda \overline{\alpha} = \sqrt{(\Delta a_1)^2 + (\Delta a_2)^2 + \dots (\Delta a_n)^2}$	$\delta \bar{a} = \frac{\Delta \bar{a}}{\Delta \bar{a}}$.
	[Ω] x10 ⁻³	n	$\overline{a} - a_n =$	$\Delta u = \sqrt{\frac{n(n-1)}{n(n-1)}}$	ā 100%
			Δa_n		10070
	20,9		0,2		
0	21,1	21,1	0	0,11	0,52
	21,3		-0,2		
	23,9		0,3		
21	24,1	24,2	0,1	0,20	0,82
	24,6		-0,4		
	28,7		0,2		
42	28,8	28,9	0,1	0,15	0,51
	29,2		-0,3		
	23,9		0,2		
112	24,1	24,1	0	0,11	0,45
	24,3		-0,2		
	31,7		0,2		
180	31,9	31,9	0	0,11	0,34
	32,1		-0,2		
	46,9		0,2		
271	47	47,1	0,1	0,19	0,4
	47,4		-0,3		
	50,8		0,1		
391	50,9	50,9	0	0,05	0,09
	51		-0,1		
	94,9		0,3		
439	95,1	95,2	0,1	0,20	0,21
	95,6		-0,4		
	151,6		0,3		
607	151,8	151,9	0,1	0,20	0,13
	152,3		-0,4		
	179,9		0,3		
799	180,1	180,2	0,1	0,20	0,11
	180,6		-0,4]	

4. táblázat Mérési eredmények (acél-réz)

A 22. ábrán az ellenállásértékeket tüntettem fel a korróziós időtartam függvényében, és a mérési pontokra függvényt illesztettem.



22. ábra Azonos katód-anód arányú (acél-réz) kötőelem vizsgálat során mért ellenállás az idő függvényében

Az azonos katód arányú kötőelemek esetén elvégzett korróziós vizsgálat során kapott eredmények alapján megállapítottam, hogy az ellenállás az idő függvényében nő.

3.3.2 Mérés 2. eltérő (5:1) katód anód arány

Címe: Különböző (5:1) katód-anód arányú kötőelem ellenállás vizsgálata

Mérés helye: ÓE.BGK. Kémia labor 212.

Mérés célja: kétfémes villamos kötőelemek galvánkorrózió következtében kialakuló átmenetiellenállásainak detektálása az idő függvényében.

Mérés menete: az erre a célra kialakított vizsgáló berendezésben, különböző katód-anód arányú, azonos anyagminőségű villamos kötőelemek állandó hőmérséklet melletti monitoring tevékenysége.

Felhasznált anyagok a 3. táblázat szerint.

A mérés során három darab azonos, saru-csavar páros megfigyelését végeztem egyidőben. A vizsgált villamos kötőelemek ellenállásértékeit meghatározott időnként rendre leolvastam az erre a célra kialakított, már bemutatott vizsgálóberendezés (18. ábra) segítségével. A kísérletben különböző (5:1) katód (rézsaru) és anód (bevonatos acélcsavar) felületeket monitoroztam, és a fizikai mennyiségek mérési eredményeinél

használatos hibaszámítás módszerét használtam. Az eredmények az 5. táblázatban foglaltam össze, és a 23. ábrán ábrázoltam.

t	Mért	Átlag	Abszolút hiba	Gaus-féle hiba	Relatív hiba
[h]	értékek	$\overline{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_n}{a_1 + a_2 + a_n}$	$\overline{a} - a_n =$	$\Delta \overline{a}$ =	$\delta \bar{a} = \frac{\Delta \bar{a}}{\bar{a}} \cdot 100\%$
	[Ω] x10 ⁻³	n	Δa_n	$(\Delta a_1)^2) + (\Delta a_2)^2) + (\Delta a_n)^2)$	а
				$\sqrt{n(n-1)}$	
0	24,8		0,2		
	24,9	25	0,1	0,15	0,6
	25,3		-0,3		
17,	27,1		0,2		
5	27,2	27,3	0,1	0,15	0,5
	27,6		-0,3		
38	32,9		0,2		
	33	33,1	0,1	0,15	0,45
	33,4		-0,3		
11	35,8		0,3		
0	36	36,1	0,1	0,20	0,55
	36,5		-0,4		
17	35,2		0,4		
6	35,5	35,6	0,1	0,26	0,73
	36,1		-0,5		
26	59,1		0,9		
6	59,8	60	0,2	0,34	0,56
	61,1		-1,1		
38	64,8		0,3		
7	65	65,1	0,1	0,20	0,30
	65,5		-0,4		
58	105,2		0,2		
0	105,4	105,4	0	0,11	0,001
	105,6		-0,2		
74	139,9		0,3		
8	140,2	140,2	0	0,17	0,001
	140,5		-0,3		
77	170,3		0,7		
2	170,9	171	0,1	0,43	0,25
	171,8		-0,8		

5. táblázat Mérési eredmények (acél-réz)



23. ábra Különböző (5:1) katód-anód arányú (acél-réz) kötőelem vizsgálat során mért ellenállása az idő függvényében

A különböző (5:1) katód arányú kötőelemek esetén elvégzett korróziós vizsgálat során kapott eredmények alapján megállapítottam, hogy az ellenállás az idő függvényében nő.

3.3.3 Mérés 3. különböző (5:1) katód-anód arány (alumínium-réz)

Címe: Különböző (5:1) katód-anód arányú kötőelem ellenállás-vizsgálata

Mérés helye: ÓE.BGK. Kémia labor 212.

Mérés célja: kétfémes villamos kötőelemek galvánkorrózió következtében kialakuló átmenetiellenállásainak detektálása az idő függvényében.

Mérés menete: az erre a célra kialakított vizsgálóberendezésben (18. ábra), különböző katód-anód arányú, különböző anyagminőségű villamos kötőelemek állandó

hőmérséklet melletti monitoring tevékenysége. Az alkalmazott anyagokat a jellemzőiket a 6. táblázat tartalmazza.

Név	Kábelcsatlakozó	Alumíniumhuzal	NaCl-oldat
	(24. ábra)		
Jellemző(k)	Meel eng.szám: 221-	Meel eng.szám:	3 m/m %
	06604	221-02737-8	
	MSZ: IEC 1238-1	Anyagminőség: Al 99.5	
	Anyagminőség: Cu E		
	99,9 MSZ E Cu-58		

6. táblázat A felhasznált anyagok



24. ábra Kábelcsatlakozó, sematikus ábra (szerző)

A mérés során három darab azonos, kábelcsatlakozó-alumínium huzal pár megfigyelése történt egy időben.

t	Mért	Átlag	Abszolút	Gaus-féle hiba	Relatív hiba
[h]	értékek	$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_n}{a_1 + a_2 + a_n}$	hiba	$\mathbf{A} \overline{\mathbf{a}}_{-} \overline{(\Delta a_1)^2) + (\Delta a_2)^2) + \dots (\Delta a_n)^2}$	$\delta \overline{a} = \frac{\Delta \overline{a}}{\overline{a}}$.
	[Ω] x10 ⁻³	n	$\overline{a} - a_n =$	$\Delta a = \sqrt{\frac{n(n-1)}{n(n-1)}}$	ā 100%
			Δa_n		10070
	20,4		0,5		
0	20,7	20,9	0,2	0,36	1,7
	21,6		-0,7		
48	26,3		0,5		
	26,7	26,8	0,1	0,32	1,19
	27,4		-0,6		
192	62,9		0,3		
	63	63,2	0,2	0,25	0,3
	63,7		-0,5		
360	172		0,7		
	172,6	172,7	0,1	0,43	0,24
	173,5		-0,8		
552	202,7		0,4		
	203,2	203,1	-0,1	0,20	0,09
	203,4		-0,3		
696	239,1		0,5		
	239,8	239,6	-0,2	0,25	0,10
	239,9		-0,3		
888	399,5		0,5		
	399,7	400	0,3	0,40	0,1
	400,8		-0,8		

7. táblázat Mérési eredmények

A vizsgált villamos kötőelemek ellenállásértékeit meghatározott időnként rendre leolvastam az erre a célra kialakított, már bemutatott vizsgáló berendezés segítségével. A kísérletben különböző katód (réz kábelcsatlakozó) és anód (alumíniumvezeték) felületeket monitoroztam, és a fizikai mennyiségek mérési eredményeinél használatos hibaszámítás módszerét használtam (7. táblázat, 25. ábra).



25. ábra Különböző (5:1) katód-anód arányú (alumínium-réz) kötőelem vizsgálat során mért ellenállás az idő függvényében

3.3.4 Mérések eredményei

Mint a grafikonokból jól látható, galvánkorróziós elváltozásra hajlamos kötőelem, 3%-os NaCl vizes oldat hatására megváltoztatja kétfémes rendszerén belül a villamos ellenállását.



26. ábra SEM vizsgálat eredménye, a próbatest felülete a korróziós vizsgálat után jellemző lyukkorrózió

A mérési bizonytalanság ellenére is nyomon követhető a korróziós igénybevétel hatására bekövetkező polinomiális függvénykép. A fémek felületén pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálattal (csavaranya és rézsaru kapcsolat) elsősorban lyukkorrózió kialakulását lehet felfedezni (26. ábra).

A mérési eredményeken és a grafikonokon jól nyomon követhetőek az azonos, és a különböző katód-anód felületű réz + bevonatos acél páros, és az iparban még mindig előforduló réz-alumínium alkotta kötőelem ellenállásváltozásai az idő függvényében. A réz + bevonatos acél páros azonos katód-anód felület aránnyal kezdetben nagyobb meredekséggel változtatja ellenállásértékeit (22. ábra), mint a különböző felületarányú katód-anód (5:1) réz-bevonatos acél páros (23. ábra). Ez utóbbi laposabban indul az idő függvényében, majd láthatóan meredekebb lesz, mert a nagy katódfelület miatt erőteljesebb korróziós hatást vált ki a két különböző elektródpotenciálú fém között. A harmadik kísérlet (réz-alumínium páros) markáns eredményei a nagyobb elektródpotenciál különbségeknek köszönhető. Itt a függvény nagyobb meredekségű, és az ellenállás értékei is nagyobbak időegység alatt (25. ábra).

A függvény mindhárom esetben másodfokú polinom képét mutatja: R=at²+bt+c. A korreláció négyzete (R², determinációs együttható) két változó szoros kapcsolatát fejezi ki. A függvényképek eleinte közel linearitást feltételeznek, majd az idő függvényében a négyzetes tag értéke egyre jelentősebb lesz.



27. ábra A munkadarab kezdeti ellenállás mérésének elrendezése, sematikus ábra (szerző)

Az átmenetiellenállás csak lassan változik az idő múlásával a kötőelem belsejében. Kezdetben a munkadarab jellegzetes két pontja közt mért villamos ellenállás R₁ (27. ábra).

A korrózió anyagveszteséggel járó folyamat, az anyagveszteség többek között a fémfelület változásával követhető nyomon. A fém felülete megváltozik, a korróziós igénybevétel hatására a két fém közötti határfelület egymáshoz érő, tisztán vezető fémes pontjai lecsökkennek. Emiatt az egységnyi felületre eső áramerősség értéke növekedésnek indul, az ellenállásé (R₂) ennek következtében szintén nő (28. ábra). Egyik oka változatlan terhelés mellett az áram megnövekedett úthossza az időközben lecsökkent keresztmetszeten. A két ellenállás különbsége: R₂-R₁, éppen az átmenetiellenállás értékét adja meg, ami alkalmas a korrózió kinetikájának nyomon követesére (29):



$$\mathbf{R}_{\mathrm{\acute{a}t}} = \mathbf{R}_2 \mathbf{-} \mathbf{R}_1 \tag{29}$$

28. ábra Munkadarab igénybevétel utáni ellenállás mérésének elrendezése, sematikus ábra (szerző)

3.4 A felületi érdesség változása az idő függvényében

A felületi érdességet jellemző értékek (Ra, Rq, Rmax) különböző módon jellemzik a vizsgált felületet [58].

Rq: a felszíni egyenetlenséget statisztikai módszerrel írja le (a négyzetek átlagának gyöke). Jól jellemzi a felszíni magasság-eloszlás standard deviációját.

Ra: átlagos érdesség; A felület profilján mért kiemelkedések és bemélyedések számtani átlaga nm-ben megadva. Általánosan használt érdességi paraméter, amely alkalmas a felszín kvalitatív jellemzésére és jól leírja a felszíni változásokat (a kiemelkedések és a bemélyedések előjeltől független számtani közepe).

Rmax: maximális egyenetlenség-magasság; A legmagasabb és a legmélyebb csúcs közötti függőleges különbség a teljes mérési szakaszon.

Az alkalmazott kísérleti elemek felületét atomerő mikroszkóppal vizsgáltam, mely nagy felbontásban képes a felületi érdesség meghatározására.

A 29. ábrán a kötést rögzítő csavar felszíni képét figyelhetjük meg: látható, hogy az eredeti, gyártósoron készült felület sem tökéletesen sima. Nanoskálán elemezve kisebb egyenetlenségeket mutat. Emiatt a villamos kötés korróziós igénybevétel nélkül is melegszik csekély mértékben az áramerősség függvényében.



29. ábra A csavarfej kapcsolódó eredeti felszínének AFM-es képe

A következő ábrán (30. ábra) a csavarfej igénybevétel után készült felvétele látható. Megállapíthatjuk a nagyfokú roncsolódás mértékét a számszerű érdességi mutatók alapján is. A mért felületi érdesség értékeket a 8. táblázat foglalja össze. Mindhárom érdességi mutató többszörösére nőt, nagy a felület durvulás mértéke. A Δm-ben mért bemaródás is lényegesen nagyobb lett.

8. táblázat A felületi érdesség értékek

Vizsgált fémminta	Rq [nm]	Ra [nm]	Rmax [nm]	Δm [nm]
Csavarfej eredeti	17,4	13,3	177	63,9
Csavarfej + 2h NaCl-ben	68,9	52,3	790	381



30. ábra A csavarfej igénybevétel utáni felszíne (NaCl oldatba merülés után AFM-mel mérve)

Ha ugyanezt a vizsgálatot elvégezzük az áramvezető rézsaru esetében is, jól láthatóvá válik az átmenetiellenállás növekedésének felületi érdesség miatt bekövetkezett oka. Az atomerő mikroszkóppal készített felvételen az eredeti, igénybevétel nélküli felület szintén mutat enyhe egyenetlenségeket a metszeti képen (31. ábra).



31. ábra Rézsaru eredeti felszínének AFM-es képe

Az igénybevétel után a mikroszkópos képen (32. ábra) a rézsaru károsodása jól kivehető.



32. ábra Rézsaru igénybevétel utáni felszíne (NaCl oldatba merülés után AFMmel mérve)

A három felületi érdességi mutató (9. táblázat) ebben az esetben is többszörös a kezdeti értékhez képest. A bemaródás egy helyen majdnem elérte a rézvezető alját, ami nemcsak rossz kontaktushoz, de biztonságtechnikai és szilárdsági problémákhoz is vezet.

Vizsgált	Rq [nm]	Ra [nm]	Rmax [nm]	Δm [nm
fémminta				
Rézsaru 1	10,6	8,12	121	50,0
Rézsaru 2+ 2h	90.4	68.6	642	394
NaCl-ben	20,4	00,0	012	574

9. táblázat Rézsaru felületi érdessége

3.5 Kötési nyomaték változása

A villamos kötés áramvezető képessége nemcsak az érintkező felületek érdességétől, oxidmentességétől, alakjától, hőmérsékletétől, ellenállásától függ. Befolyásolja a felületeket összeszorító erő nagysága is. Az oldható kötés (csavaranya) meghúzási nyomatéka vagy az ezzel arányos csavaranya szögelfordulásának a függvényében változik az átmenetiellenállás nagysága is (33. ábra). Előírt értékre beállított összeszorító erő csökkenti a vezető felületek közti ellenállás nagyságát. Csökken a kiemelkedő felületi érdességcsúcsok száma, megtörhet a vezetőképességet csökkentő oxidréteg.



33. ábra Átmenetiellenállás az anya szögelfordulásának függvényében

A 33. ábrán az átmenetiellenállás változását figyelhetjük meg a szögelfordulás függvényében eredeti és korróziós igénybevétel hatása után (34. ábra). Látható, hogy a csavaranya nulla fokos (laza) "elfordulatlanságában" az ellenállás jelentős értéket

képvisel. Ezt megváltoztatva egyre nagyobb és nagyobb nyomatékot kifejtve a csavaranyára, meredeken csökkenő, lineárisan változó függvényképet kapunk. Egy adott határt elérve a vezető rétegek összesimulnak a kiálló élek eltűnnek, a kontaktus nem változik tovább.



34. ábra Átmenetiellenállás a meghúzás szögelfordulás függvényében, 120 óra korróziós igénybevétel után

Ha korróziós igénybevételnek tesszük ki a villamos kötést, függvényünk képe hasonló lesz. Itt a kötés ellenállása megnő és ez a tendencia figyelhető meg végig a vizsgálat folyamán (34. ábra).

3.6 Villamos ellenállás változása a hőmérséklet függvényében

Ha egy fémet erős melegítés hatásának teszünk ki tapasztalatunk szerint nő annak ellenállása. Megállapíthatjuk, hogy az ellenállás általában függ a hőmérséklettől. Fémeknél a hőmérséklettel arányosan nő, félvezetőké, széné, elektrolitoké pedig arányosan csökken. Nem extrém nagy hőmérsékleteken és viszonylag kis intervallumban vizsgálódva a kérdéses fémek ρ fajlagos ellenállása minden esetben arányos a vizsgált hőmérséklet tartományban (30) [3].

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \alpha \left(t - t_0 \right) \tag{30}$$

ahol:

 $\rho = fajlagos ellenállás [\Omega m]$

 $\alpha = h$ őfoktényező [1/°C]

t = hőmérséklet [°C]

A fajlagos ellenállás helyett használhatjuk a vele ekvivalens villamos ellenállás fogalmát is, ekkor összefüggésünk a következőképpen alakul (31):

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{20} \left(1 + \alpha_{20} \,\Delta t \right) \tag{31}$$

ahol

R =villamos ellenállás [Ω]

 $R_{20} = 20$ °C-on vett ellenállás [Ω]

 $\alpha_{20} = 20$ °C-on vett hőfoktényező[1/°C]

Az iparban használt réz és acél kötőelemek ellenállása a hőmérséklet függvényében tehát az alábbi grafikon szerint alakul (35. ábra):



35. ábra Ellenállás a hőmérséklet függvényében [3]

Esetünkben a vizsgált hőmérséklet tartomány (0-700 °C) kibővítése nem szükséges, hiszen a rendellenesen működő villamos kötőelem káros felmelegedése ebbe az intervallumba tehető.

Villamos kötőelem vizsgálata

Célom az iparban alkalmazott, 1:1 felület arányú bevonatos acél-réz pár ellenállásának meghatározása a hőmérséklet függvényében. Mennyivel járul hozzá egy galvánkorrózióval terhelt nagy átmenetiellenállású acél-réz kapcsolat villamos ellenállásához. Milyen nagyságrendű ellenállást képvisel az iparban általánosan használt villamos kontaktus, ha csak a melegedés által vizsgált paramétereket mérjük?

Az irodalmi értékek szerint a fajlagos ellenállás (ill. R ellenállás) nem számottevő, ha a hőmérséklet szemszögéből nézzük. Mégis fontos tudni hogyan alakulnak értékei, ha nem laboratóriumi körülmények között vizsgáljuk. A mérést összeszerelt állapotban végeztem, megfelelő nyomatékkal meghúzva a csavart. Az ellenállásérték nagyságrendje és pontos mérhetősége miatt Wheatston-hidas mérési eljárással dolgoztam. Az alkalmazott hőkamera (1. függelék) biztosítja az érintés nélküli hőfokleolvasást üzemszünet nélkül. A villamos kötőelem megfelelő hevítését a módosított vizsgáló berendezés (18. ábra) teszi lehetővé. A mérés elvi vázlatát a 36. ábrán láthatjuk.



36. ábra Hőkamerás mérés elvi vázlat (szerző)

Mérés azonos katód-anód arány esetén (acél-réz)

Mérés címe: azonos katód-anód arányú kötőelem ellenállás vizsgálata a hőmérséklet függvényében

Mérés helye: ÓE.BGK. Kémia labor 212.

Mérés célja: kétfémes villamos kötőelemek galvánkorrózió következtében kialakuló átmenetiellenállás mérés változó hőmérsékletnél.

Mérés menete: az erre a célra kialakított vizsgáló berendezésben, azonos katód-anód arányú, különböző anyagminőségű villamos kötőelemek állandó hőmérséklet melletti monitoring tevékenysége.

Felhasznált anyagok a 3. táblázat szerint a 36. ábra szerinti elrendezéssel, hőkamerával. A mért átmenetiellenállás értékeket a 10. táblázat tartalmazza. A hőmérséklet függvényében az átmenetiellenállást a 37. ábra mutatja.

Т	Mért	Átlag	Abszolút	Gaus-féle hiba	Relatív
[°C]	értékek	$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_n}{n}$	hiba	$\Lambda \overline{a} = \sqrt{(\Delta a_1)^2 + (\Delta a_2)^2 + \dots (\Delta a_n)^2)}$	hiba
	R [Ω] x10 ⁻³	11	$\overline{a} - a_n =$	$\int u^{-1} \sqrt{n(n-1)}$	$\delta \bar{a} = \frac{\Delta \bar{a}}{\bar{a}} \cdot$
			Δa_n		100%
	0,09		0,01		
254	0,11	0,1	-0,01	0,005	0,05
	0,1		0		
	0,17		0,02		
309	0,2	0,19	-0,01	0,01	0,05
	0,2		-0,01		
	0,29		0,02		
360	0,3	0,31	0,01	0,01	0,03
	0,34		-0,03		
	0,36		0,03		
410	0,4	0,39	-0,01	0,01	0,02
	0,41		-0,02		
	0,49		0,03		
460	0,5	0,52	0,02	0,02	0,03
	0,57		-0,05		
	0,6		0,01		
505	0,62	0,61	-0,01	0,005	0,008
	0,61		0		

10. táblázat Az átmenetiellenállás a hőmérséklet függvényében



37. ábra Ellenállás a hőmérséklet függvényében azonos katód-anód arányú (acél-réz) kötőelem

A (37. ábra) diagramban ábrázolt mérési eredmények alapján megállapítható: a függvény menete hasonló a nagy pontosságú, akkreditált laboratóriumi körülmények közt mért fémtiszta vezető anyagokéval.

Összegzés

A vizsgálatom célja volt meghatározni a villamosipar által használt kötő, áramvezető alkatrészek ellenállását a hőmérséklet függvényében. Eltér-e és ha igen mennyivel az irodalomból megismert értékektől. A mérések nehézségét, a kiértékelés pontosságát a gyártásból adódó különbségek adták, lévén egy összeszerelt, esetenként több tagból álló szerelvény volt a vizsgálat tárgya. Összehasonlítva az irodalomban fellelhető, minden anyagra megadott hőfoktényezőket az általam használt réz-acél alkatrészével a következő következtetést kell levonni:

A réz és az acél hőfoktényezője $\alpha_{20} = 3.9 \cdot 10^{-3} - 4.2 \cdot 10^{-3}$ értékek között változik. Mérésem során már 250 °C-tól 500 °C-ig többszörös vagy akár egy nagyságrendi növekedést mutattam ki (30 – 40·10⁻³). Ezeken a hőmérsékleteken tehát az egy ohm ellenállású anyag egy darabja ennyivel változtatja meg az értékét 1 °C hatására.

A mért eredmények felhasználásával kapott grafikonos ábrázolás segítségével megállapítottam, hogy a villamos ellenállás a hőmérséklet másodfokú függvényeként írható fel (32):

$$\mathbf{R} = \mathbf{a}\mathbf{t}^2 + \mathbf{b}\mathbf{t} + \mathbf{c} \tag{32}$$

A fent említett galvánkorrózió hatásnak kitett villamos kötőelemek ellenállása tehát nemcsak az átmenetiellenállás emelkedése miatt növekszik. Számolni kell az anyag ellenállásának emelkedésével is, főként, ha pontosan tartanunk kell egy alkatrész hőmérsékleti jellemzőit, hiszen méréseim szerint, áramerősség-függően többször 10 °C különbség is adódhat. Az ellenállást befolyásoló egyéb tényezőkhöz tartozhat még a villamos alkatrészek mechanikai (nyomás és nyújtás) igénybevétele.

4 VILLAMOS KÖTŐELEMEK GALVÁNKORRÓZIÓJÁNAK TERMOGRÁFIAI VIZSGÁLATA

A villamosiparban használt kötőelemek hagyományos vizsgálata biztonságtechnikai, üzemeltetési szempontból nehézkes, veszélyes folyamat. A termográfia elterjedésével azonban ezek a vizsgálatok a villamos kötések körében egyszerűbben, gyorsabban, biztonságosabban kivitelezhetők. Az ipari, háztartási környezetben tehát nagy segítség lehet egy megfelelően kiválasztott hőkamera alkalmazása. Nincs ez másként laboratóriumi körülmények között sem, ahol e modern diagnosztikai eszközt megfelelő mérési módszerrel és berendezéssel kiegészítve végezhetjük nagy pontosságú méréseinket.

Célom egy olyan készülék tervezése és kivitelezése, amely lehetővé teszi a vizsgált minta áramköri megfigyelését, hőmérsékletének detektálását a termográfia alkalmazásának lehetőségével.

4.1 Készülékkel szemben támasztott követelmények

- Az előzőleg galvánkorróziónak kitett kötőelem áramkörbe helyezése legyen gyorsan kivitelezhető, biztonságos.
- különböző méretű minták is befoghatóak legyenek,
- a befogószerkezet villamos kontaktusa minimális hőfejlődéssel járjon a mérés zavartalansága miatt,
- a készülékben elhelyezett próbadarab hőmérséklete több oldalról is megfigyelhető legyen hőkamerával,
- szabályozható teljesítmény a különböző mérési pontokon megvalósítható detektálás miatt,
- mérési pontosság,
- hőkamera alkalmazása,
- In-situ monitorozási lehetőség.

A követelményeket figyelembe véve a 38. ábrán látható összeállítás szerinti mérőrendszert fejlesztettem a 39. ábrán látható hőkamera (1.függelék) felhasználásával. A megvalósított készülék főbb egységei szerint tehát áll egy váltakozó áramú stabilizált tápegységből. A mérési igények szerint 230 VAC, 50 Hz, maximálisan 10 A-es

kimenettel, mely fokozat mentesen szabályozható. Tartalmaz a mérési elrendezés áramerősség mérőt 2,5 x/s mintavételező lehetőséggel, 50mA/500mA/10A Ac méréstartománnyal, \pm 1,5% + 2 digit mérési pontossággal. Beépítésre került feszültség mérő egység is, mely szintén 2,5 x/s mintavételező képességgel bír, \pm 1,5% + 2 digit pontosságú és 5V/50V/500V/750V a mérési tartománya. A kötőelemtartó elrendezésében és anyagában megegyezik a korrózió vizsgáló berendezésnél alkalmazott mintabefogó készülékkel. A fűtőegység teljesítménye 23–4000 W-ig terjed fokozatmentesen. Névleges áram felvétele szabályozható maximum 16 A-ig. Védettségi osztálya IP 20. A keletkezett hő elvonását termosztáttal ellátott egyfázisú ventilátor biztosítja. A hőkamera fókusz távolsága 100–300 mm között állítható, a lencse szimmetria tengelye merőleges a vizsgálati minta felületére.



38. ábra A termokamerás mérés elvi összeállítási rajza (mérőegységekkel)

(szerző)



39. ábra Hőkamera (1. függelék)

4.2 Hőmérséklet-különbség változása a villamos ellenállás függvényében

4.2.1 Mérés 1. azonos katód-anód arány (acél-réz)

Címe: Azonos katód-anód arányú kötőelem áramköri melegedésének vizsgálata

Mérés helye: ÓE.BGK. Kémia labor 212.

Mérés célja: kétfémes villamos kötőelemek galvánkorrózió következtében kialakuló melegedésének detektálása a kötés ellenállásának függvényében.

Mérés menete: az erre a célra kialakított, változtatható teljesítményű vizsgáló berendezésben azonos katód-anód arányú, különböző anyagminőségű villamos kötőelemek hőmérsékleti monitoring tevékenysége.

Felhasznált anyagok a 3. táblázat szerint a 38., 39. ábra szerinti vizsgáló berendezéssel 23–4000 W és hőkamerával (Bosch GTC 400 C Professional). A mérési eredményeket a 11. táblázat tartalmazza. A hőmérsékletet az átmenetiellenállás függvényében a 40. ábra mutatja.



40. ábra A hőmérséklet az ellenállás függvényében azonos acél-réz katód-anód arány esetén

A vizsgálat során három darab azonos, saru-csavar páros megfigyelése történt egyidőben. A vizsgált villamos kötőelemek ellenállásértékeit meghatározott időnként rendre leolvastam az erre a célra kialakított, melegedést vizsgáló berendezés segítségével. A kísérletben azonos (1:1) katód (rézsaru) és anód (bevonatos acélcsavar) felületeket monitoroztam és itt is a fizikai mennyiségek mérési eredményeinél használatos hibaszámítás módszerét használtam.

Rāx10⁻	Mért	Átlag	Abszolút	Gaus-féle hiba	Relatív hiba
3	értékek	$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_n}{n}$	hiba	$\Delta \bar{a}$ =	$\delta \bar{a} = \frac{\Delta \bar{a}}{\bar{a}} \cdot 100\%$
[Ω]	ΔT [°C]	11	$\overline{a} - a_n =$	$(\Delta a_1)^2 + (\Delta a_2)^2 + (\Delta a_n)^2)$	u
			Δa_n	$\sqrt{\frac{1}{n(n-1)}}$	
	4,2		0,2		
21,1	4,3	4,4	0,1	0,15	0,03
	4,7		-0,3		
	4,5		0,4		
24,2	4,8	4,9	0,1	0,26	0,05
	5,4		-0,5		
	5		0,1		
28,9	5,1	5,1	0	0,05	0,01
	5,2		-0,1		
	4,7		0,2		
24,1	4,8	4,9	0,1	0,15	0,03
	5,2		-0,3		
	4,9		0,4		
31,9	5,3	5,3	0	0,23	0,04
	5,7		-0,4		
	5,9		0,2		
47,1	5,9	6,1	0,2	0,2	0,03
	6,5		-0,4		
	6,1		0,2		
50,9	6,3	6,3	0	0,11	0,01
	6,5		-0,2		
	7,5		0,3		
95,2	7,7	7,8	0,1	0,2	0,02
	8,2		-0,4		
	11,6		0,2		
151,9	11,9	11,8	-0,1	0,1	0,008
	11,9		-0,1		
	13,4		0,3		
180,2	13,7	13,7	0	0,18	0,01
	14		-0,3		

11. táblázat A hőmérséklet az ellenállás függvényében

4.2.2 Mérés 2. különböző (5:1) katód-anód arány (acél-réz)

Címe: Különböző (5:1) katód-anód arányú kötőelem áramköri melegedésének vizsgálata

Mérés helye: ÓE.BGK. Kémia labor 212.

Mérés célja: kétfémes villamos kötőelemek galvánkorrózió következtében kialakuló melegedésének detektálása a kötés ellenállásának függvényében.

Mérés menete: az erre a célra kialakított, változtatható teljesítményű vizsgáló berendezésben különböző katód-anód arányú, különböző anyagminőségű villamos kötőelemek hőmérsékleti monitoring tevékenysége. Felhasznált anyagok a 3. táblázat szerint a 38., 39. ábra szerinti vizsgáló berendezéssel, ami 23–4000 W fűtőegységgel és hőkamerával (Bosch GTC 400 C Professional).

$R\bar{a}x10^{-3}$	Mért	Átlag	Abszolút hiba	Gaus-féle hiba	Relatív hiba
[Ω]	értékek	$\bar{a}=$	$\overline{a} - a_n = \Delta a_n$	$\Delta \overline{a}$ =	$\delta \bar{a} = \frac{\Delta \bar{a}}{\Delta \bar{a}} \cdot 100\%$
	ΔT [°C]	$a_1 + a_2 + a_n$		$(\Lambda q_1)^2 + (\Lambda q_2)^2 + (\Lambda q_m)^2)$	\bar{a} 10070
		n		$\sqrt{\frac{(\ln n)^{2} + (\ln 2)^{2} + (\ln 2)^{2}}{n(n-1)}}$	
	7,4		0,4		
25	7,7	7,8	0,1	0,26	0,03
	8,3		-0,5		
	7,9		0,2		
27,3	8	8,1	0,1	0,15	0,01
	8,4		-0,3		
	8,4		0,3		
33,1	8,7	8,7	0	0,15	0,01
	9		-0,3		
	9,2		0,3		
36,1	9,6	9,5	-0,1	0,15	0,01
	9,7		-0,2		
	9,9		0,1		
35,6	9,9	10	0,1	0,1	0,01
	10,2		-0,2		
	13,8		0,3		
60	14	14,1	0,1	0,26	0,01
	14,5		-0,4		
	14,5		0,6		
65,1	14,[15,1	0,3	0,21	0,01
	16		-0,9		
	16		0,3		
105,4	16,2	16,3	0,1	0,20	0,01
	16,7		-0,4		
	21		0,2		
140,2	21,3	24,6	-0,1	0,1	0,004
0,15	21,3		-0,1		
	35		0,3		
171	35,2	37,4	0,1	0,20	0,005
0,25	35,7		-0,4		

12. Táblázat Hőmérséklet az ellenállás függvényében

A vizsgált villamos kötőelemek ellenállás értékeit meghatározott időnként rendre leolvastam. A kísérletben különböző (5:1) katód ((rézsaru) és anód (bevonatos acélcsavar) felületek vettek részt és az eddigiekben már ismertetett hibaszámítás módszerét használtam. Az értékeket a 12. táblázat tartalmazza. A hőmérsékletet az átmenetiellenállás függvényében a 41. ábra mutatja.



41.ábra A hőmérséklet az ellenállás függvényében különböző katód anód arányú acél-réz kötőelemeknél mérve

4.2.3 Mérés 3. különböző (5:1) katód-anód arány (alumínium-réz)

Címe: Különböző (5:1) katód-anód arányú kötőelem áramköri melegedésének vizsgálata

Mérés helye: ÓE.BGK. Kémia labor 212.

Mérés célja: kétfémes villamos kötőelemek galvánkorrózió következtében kialakuló melegedésének detektálása a kötés ellenállásának függvényében.

Mérés menete: az erre a célra kialakított, változtatható teljesítményű vizsgáló berendezésben különböző katód-anód arányú, különböző anyagminőségű villamos kötőelemek hőmérsékleti monitoring tevékenysége.

Felhasznált anyagok a 6. táblázat szerint a 38., 39. ábra szerinti elrendezéssel, hőkamerával (Bosch GTC 400 C Professional). A mért átmenetiellenállás értékeket a 13. táblázat tartalmazza. A hőmérséklet függvényében az átmenetiellenállást a 42. ábra mutatja.

A mérés során három darab azonos, kábelcsatlakozó-alumínium huzal páros megfigyelése történt egy időben. A vizsgált villamos kötőelemek ellenállás értékeit meghatározott időnként rendre leolvastam az erre a célra kialakított, már bemutatott vizsgáló berendezés segítségével. A kísérletben különböző (5:1) katód (réz kábelcsatlakozó) és anód (alumínium vezeték) felületeket hasonlítottam össze és a fizikai mennyiségek mérési eredményeinél használatos hibaszámítás módszerét használtam.

13. táblázat A hőmérséklet az ellenállás függvényében Al-Cu anyagpárnál

Rāx10⁻	Mért	Átlag	Abszolút	Gaus-féle hiba	Relatív hiba
3	értékek	$\overline{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_n}{n}$	hiba	$\sqrt{\overline{a}} = \sqrt{(\Delta a_1)^2 + (\Delta a_2)^2 + \dots (\Delta a_n)^2)}$	$\delta \bar{a} = \frac{\Delta \bar{a}}{\bar{a}}$.
[Ω]	ΔT [°C]	п	$\bar{a} - a_n =$	$\int \frac{\Delta u}{\sqrt{n(n-1)}}$	<i>a</i> 100%
			Δa_n		10070
	4,2		0,2		
20,9	4,2	4,4	0,2	0,2	0,04
	4,8		-0,4	-	
	6,5		0,2		
26,8	6,6	6,7	0,1	0,15	0,02
	7		-0,3		
	15,9		0,2		
63,2	16,2	16,1	-0,1	0,10	0,006
	16,2		-0,1		
	16		0,2		
172,7	16,2	16,2	0	0,11	0,006
	16,4		-0,2		
	16,4		0,2		
203,1	16,6	16,6	0	0,11	0,006
	16,8		-0,2		
	27,5		0,1		
239,6	27,5	27,6	0,1	0,1	0,003
	27,8		-0,2		
	45,7		0,3		
400	45,9	46	0,1	0,2	0,004
	46,4		-0,4		



42. ábra A hőmérséklet az ellenállás függvényében különböző katód-anód arányú alumínium-réz anyagpárnál

Összegzés

Bár mindhárom kísérlet azonos nagyságrendű ellenállásértékről indult és egyforma ideig tartott, a vizsgálat eredményeit elemezve észrevehető a réz-alumínium kötőelem nagyobb ellenállás változása a réz-bevonatos acél alkatrészekhez képest. Ennek oka az alkalmazott fémpárok különböző elektródpotenciál különbségeiben és a felület arányok eltéréseiben keresendő (33), (34), (35), (36).

$$AI = -1,67 V E^{0}$$
(33)

$$Cu = +0.34 V E^0$$
 (34)

$$Zn = -0,76 V E^0$$
(35)

$$Fe = -0,44 V E^0$$
 (36)

Az alumínium és réz közötti potenciál számottevőbb, mint a cink bevonatú acél és réz között. Ez az anyagminőségbeli különbség felgyorsítja a galvánkorrózió mértékét. Gyorsabban és jelentősebben válik helyi elemmé az alumínium + réz páros a károsodás nyomán (42. ábra). Az érintkező felületek felületi érdessége egyre romlik, ami jelentős áram és ebből következően hőmérséklet-változást okoz az egyforma terhelésnek kitett

villamos kötő elemen. A cinkbevonatú acél – réz 1:1 és 5:1 katód-anód arányú alkatrészeinél az egységnyi idő alatti ellenállás változás érzékelhető ugyan, de nem jelentős. Ugyanazokban az ellenállás pontokban mért hőmérséklet emelkedés azonban markáns különbséget mutat. Ennek oka a nem azonos átmérőjű (keresztmetszetű) anód méretben rejlik. A villamos kötőelemen átfolyó áramerősség nagyságát az áramkörbe iktatott fogyasztó határozza meg, a kialakuló, számítható áramsűrűséget pedig a vezeték tényleges átmérője befolyásolja. Ha ez az átmérő (felület) például a korróziós igénybevétel hatására a felére csökken, a fogyasztó leadott veszteséges villamos teljesítménye (és a vele arányos hő fejlődés) a négyszeresére nő a kiépített villamos kötőelemen. Ha az idő függvényében változó galvánkorrózió negyedére csökkenti az átmérőt (felületet) az 16-szoros melegedést vált ki és így tovább. Tehát P az érintkező felületek melegedéséből származó teljesítmény. Ezt a fizikai jelenséget a következő összefüggés fejezi ki (37):

$$P \sim \frac{1}{d^2} \tag{37}$$

ahol:

P: a villamos teljesítmény [W]

d: átmérő [m, mm].

A melegedés önmagában is növeli a villamos alkatrész átmenetiellenállását, amint azt egy korábbi mérésnél bemutattam. Problémát okoznak még a kötésen vagy kötésben létrejövő égéstermékek (szigetelő réteg), különféle korróziótermékek (oxidok). Ezek mind ellenállás növelők. Nem időben diagnosztizált rendellenes működés hője pedig akár a gyulladási hőmérsékletig is elmehet, ami tűzveszélyt, robbanást, üzemleállást okozhat.

4.3 A hőmérséklet különbség változása az idő függvényében

4.3.1 Mérés 1. azonos katód-anód arány (acél-réz)

Címe: Azonos katód-anód arányú kötőelem áramköri melegedésének vizsgálata

Mérés helye: ÓE.BGK. Kémia labor 212.

Mérés célja: kétfémes villamos kötőelemek galvánkorrózió következtében kialakuló melegedésének detektálása az idő függvényében.

Mérés menete: az erre a célra kialakított, változtatható teljesítményű vizsgáló berendezésben azonos katód-anód arányú, különböző anyagminőségű villamos kötőelemek hőmérsékleti monitoring tevékenysége.
Felhasznált anyagok a 3. táblázat szerint a 38., 39. ábra szerinti elrendezéssel, hőkamerával.

A mérés során három darab azonos, saru-csavar páros megfigyelése történt egyidőben. A vizsgált villamos kötőelemek hőkamera által mutatott hőmérsékleti értékeit meghatározott időnként rendre leolvastam az erre a célra kialakított, már bemutatott vizsgáló berendezés segítségével.

t	Mért	Átlag	Abszolút	Gaus-féle hiba	Relatív hiba
[h]	értékek	$\overline{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_n}{a_1 + a_2 + a_n}$	hiba	$= \sqrt{(\Delta a_1)^2 + (\Delta a_2)^2 + (\Delta a_n)^2}$	$\delta \bar{a} = \frac{\Delta \bar{a}}{\Delta \bar{a}} \cdot$
	$\Delta T [^{\circ}C]$	n	$\overline{a} - a_n =$	$\Delta a = \sqrt{\frac{n(n-1)}{n(n-1)}}$	ā 100%
			Δa_n		100%
	4,2		0,2		
0	4,3	4,4	0,1	0,15	0,03
	4,7		-0,3		
	4,5		0,4		
21	4,8	4,9	0,1	0,26	0,05
	5,4		-0,5		
	5		0,1		
42	5,1	5,1	0	0,05	0,01
	5,2		-0,1		
	4,7		0,2		
112	4,8	4,9	0,1	0,15	0,03
	5,2		-0,3		
	5,9		0,2		
180	5,9	6,1	0,2	0,2	0,03
	6,5		-0,4		
	6,1		0,2		
271	6,3	6,3	0	0,11	0,01
	6,5		-0,2		
	7,5		0,3		
391	7,7	7,8	0,1	0,2	0,02
	8,2		-0,4		
	11,6		0,2		
439	11,9	11,8	-0,1	0,1	0,008
	11,9		-0,1		
	12,6		0,4		
607	13	13	0	0,22	0,01
	13,4		-0,4		
	13,4		0,3		
799	13,7	13,7	0	0,18	0,01
	1.4		0.2		
	14		-0,3		

14. táblázat A hőmérséklet az idő függvényében acél-réz anyagpárnál

A kísérletben azonos (1:1) katód (réz saru) és anód (bevonatos acélcsavar) felületeket monitoroztam és a fizikai mennyiségek mérési eredményeinél használatos hibaszámítás módszerét használtam. A mérési eredményeket a 14. táblázatban foglaltam össze és a 43. ábra diagramjában ábrázoltam.



43. ábra A hőmérséklet az idő függvényében acél-réz anyagpár esetén

4.3.2 Mérés 2. különböző katód-anód arány (acél-réz)

Címe: Különböző (5:1) katód-anód arányú kötőelem áramköri melegedésének vizsgálata

Mérés helye: ÓE.BGK. Kémia labor 212.

Mérés célja: kétfémes villamos kötőelemek galvánkorrózió következtében kialakuló melegedésének detektálása az idő függvényében.

Mérés menete: az erre a célra kialakított, változtatható teljesítményű vizsgáló berendezésben különböző katód-anód arányú, különböző anyagminőségű villamos kötőelemek hőmérsékleti monitoring tevékenysége.

Felhasznált anyagok a 3. táblázat szerint a 38., 39. ábra szerinti elrendezéssel, hőkamerával.

A vizsgálat három darab azonos típusú saru-csavar páros megfigyelésére irányult azonos leolvasási időket választva. A vizsgált villamos kötőelemek hőmérséklet értékeit rendre leolvastam az erre a célra kialakított, villamos vizsgáló berendezés segítségével. A kísérletben különböző (5:1) katód ((rézsaru) és anód (bevonatos acélcsavar) felületek

vettek részt és az eddigiekben ismertetett hibaszámítás módszerét használtam. A mérési eredményeket a 15. táblázatban foglaltam össze és a 44. ábra diagramján ábrázoltam.

t	Mért	Átlag	Abszolút	Gaus-féle hiba	Relatív hiba
[h]	értékek	$\overline{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_n}{a_1 + a_2 + a_n}$	hiba	$= \sqrt{(\Delta a_1)^2 + (\Delta a_2)^2 + (\Delta a_2)^2}$	$\delta \bar{a} = \frac{\Delta \bar{a}}{2}$.
	AT [⁰C]	n n	ā a —	$\Delta a = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}}$	ā
			$a - a_n - $		100%
			Δa_n		
	10,1		0,3		
0	10,3	7,8	0,1	0,20	0,02
	10,8		-0,4		
17,5	8		0,1		
	8	8,1	0,1	0,10	0,01
	8,3		-0,2		
38	7,5		0,2		
	7,7	8,7	0	0,11	0,01
	7,9		-0,2		
110	9,3		0,2		
	9,4	9,5	0,1	0,15	0,01
	9,8		-0,3		
176	9,7		0,3		
	9,7	10	0,3	0,30	0,03
	10,6		-0,6		
266	13,9		0,2		
	14,1	14,1	0	0,11	0,008
	14,3		-0,2		
387	16,6		0,2		
	16,9	15,1	-0,1	0,10	0,005
	16,9		-0,1		
580	18,3		0,3		
	18,5	16,3	0,1	0,20	0,01
	19		-0,4		
748	21		0,2		
	21,1	24,6	0,1	0,15	0,007
	21,5		-0,3		
772	35,2		0,1		
	35,3	37,4	0	0,05	0,001
	35,4		-0,1		

15. táblázat A hőmérséklet az idő függvényében (acél-réz)



44. ábra A hőmérséklet az idő függvényében (acél-réz)

4.3.3 Mérés 3. különböző katód-anód arány (alumínium-réz)

Címe: Különböző (5:1) katód-anód arányú kötőelem áramköri melegedésének vizsgálata

Mérés helye: ÓE.BGK. Kémia labor 212.

Mérés célja: kétfémes villamos kötőelemek galvánkorrózió következtében kialakuló melegedésének detektálása az idő függvényében.

Mérés menete: az erre a célra kialakított, változtatható teljesítményű vizsgáló berendezésben különböző katód-anód arányú, különböző anyagminőségű villamos kötőelemek hőmérsékleti monitoring tevékenysége.

Felhasznált anyagok a 6. táblázat szerint a 38., 39. ábra szerinti elrendezéssel, hőkamerával.

A mérés során három darab azonos, kábelcsatlakozó-alumínium huzal páros megfigyelése történt egy időben. A vizsgált villamos kötőelemek hőmérséklet értékeit leolvastam a hőkamera segítségével. A kísérletben különböző katód (réz kábelcsatlakozó) és anód (alumínium huzal) felületeket monitoroztam és a fizikai mennyiségek mérési eredményeinél használatos hibaszámítás módszerét használtam. A mérési eredményeket a 16. táblázatban foglaltam össze és a 45. ábra diagramján ábrázoltam.

t	Mért	Átlag	Abszolút	Gaus-féle hiba	Relatív hiba
[h]	értékek	$\overline{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_n}{n}$	hiba	$\Lambda \overline{a} = \sqrt{(\Delta a_1)^2 + (\Delta a_2)^2 + \dots (\Delta a_n)^2)}$	$\delta \bar{a} = \frac{\Delta \bar{a}}{\bar{a}} \cdot$
	ΔT [°C]	10	$\bar{a} - a_n =$	$\int n(n-1)$	100%
			Δa_n		
	4,1		0,3		
0	4,3	4,4	0,1	0,20	0,04
	4,8		-0,4		
	6,6		0,1		
48	6,7	6,7	0	0,05	0,008
	6,8		-0,1		
	15,9		0,2		
192	16	16,1	0,1	0,15	0,009
	16,4		-0,3		
	15,8		0,4		
360	16,2	16,2	0	0,23	0,01
	16,6		-0,4		
	16,4		0,2		
552	16,5	16,6	0,1	0,15	0,009
	16,9		-0,3		
	27,2		0,4		
696	27,4	27,6	0,2	0,3	0,01
	28,2	-	-0,6		
	45,7		0,3		
888	46	46	0	0,17	0,003
	46,3		-0,3		

16.táblázat A hőmérséklet az idő függvényében



Összegzés

A vizsgálatok eredményeként megállapítható, hogy az időben változó korróziót leíró függvényben a hőmérséklet növekszik. A gyakorlatban a villamos kötőelemek esetében ez a korrózió hatására bekövetkező melegedés hőkamerával mérhető. Korábbi méréseimből láthattuk az átmenetiellenállás változását az idő függvényében. A roncsolódott, nagy felületi érdességgel jellemezhető vezetőfelületek a rossz érintkezés miatt áram szűkületet okoznak. A mérés eredményein a hőmérséklet-idő grafikonokon jól megfigyelhetők az azonos, a különböző katód-anód felületű réz – bevonatos acél páros és az iparban, háztartásokban még gyakran alkalmazott réz-alumínium párból álló kötőelemek ellenállás-változásai az idő függvényében. Réz-alumínium kötés esetén legmarkánsabb a függvény menete. Itt a nagyobb különbségű elektódpotenciál-értékek erőteljesebb korróziót váltanak ki, emiatt a villamos alkatrész melegedése is számottevőbb. Az azonos katód-anód felületű munkadarabok esetén a függvénykép a kezdeti vizsgált szakaszban közel lineáris, majd a polinom összefüggés szerint változó négyzetes tag kerül előtérbe. A nagy katód kis anód (5:1) felület arányú villamos kötőelem grafikon menete meredekebb és a detektált hőmérsékleti értékek közel kétszer akkorák a kezdeti szakasz után, mint az előző esetben. Ennek közvetlen oka az áramsűrűség, ami viszont független az áramköri fogyasztó teljesítményétől. A vizsgálatnál alkalmazott egyforma áramterhelés oszlik el kisebb felületen, egy nagyságrendbe eső ellenállásérték mellett, ami erőteljesebb melegedést vált ki a vizsgált munkadarabon.

Elektromos áramsűrűség jellemzésére az alábbi összefüggés írható fel: a töltés áramlásának irányára merőleges egységnyi keresztmetszeten időegység alatt átáramló töltés mennyisége (38):

$$\mathbf{J} = \mathbf{I}/\mathbf{A} \left[\mathbf{A}/\mathbf{m}^2, \mathbf{A}/\mathbf{m}\mathbf{m}^2\right]$$
(38)

ahol:

J az áramsűrűség jele,

I áramerősség, [A]

A keresztmetszet [m²].

Jelentősen befolyásolja a villamos kapcsolat üzemi hőmérsékletét a kötést összetartó erő meghúzási nyomatéka vagy az ezzel arányos csavaranya-szögelfordulás. Mint azt fentebb láthattuk az összeszorító erő nagysága hatással van a villamos kötőelemben kialakuló átmenetiellenállás nagyságára. Ha a szögelfordulás függvényében vizsgáljuk az áramkörben kialakuló melegedés mértékét az alábbi grafikont kapjuk (46. ábra).









47. ábra Hőmérséklet a kötés nyomatékkal arányos szögelfordulás függvényében

A grafikonok jól mutatják a csavaranya szögelfordulásának hatását a kötésen mért hőmérséklet alakulására. Kilazult, nem megfelelő nyomatékkal lehúzott kötés melegedést mutat. Negyvenöt-ötven fokos szögelfordulás szükséges ahhoz, hogy a melegedés a megengedett szintre csökkenjen. Ha a környezet galvánkorróziós hatást gyakorol a csavarkötésre, nagyságrendileg kétszer nagyobb hőhatás keletkezik rajta, ami káros villamos veszteséget, gyorsabb tönkremenetelt, biztonságtechnikai problémákat vet fel.

E dolgozatnak nem témája, de meg kell említeni még a kialakuló korróziótermék redukciós hatását a tiszta fémes érintkezési felületekre. A fentebb említett hatások és ennek következtében is az átmenetiellenállás nő. Az egyre növekvő átmenetiellenállás lokális melegedést okoz.

4.4 Hőmérséklet különbség változása az áramerősség függvényében

4.4.1 Mérés 1. azonos katód-anód arány (acél-réz)

Címe: Azonos katód-anód arányú kötőelem áramköri melegedésének vizsgálata

Mérés helye: ÓE.BGK. Kémia labor 212.

Mérés célja: kétfémes villamos kötőelemek galvánkorrózió következtében kialakuló melegedésének detektálása az áramerősség függvényében.

Mérés menete: az erre a célra kialakított, változtatható teljesítményű vizsgáló berendezésben azonos katód-anód arányú, különböző anyagminőségű villamos kötőelemek hőmérsékleti monitoring tevékenysége.

Felhasznált anyagok a 3. táblázat szerint.

Vizsgáló berendezés 23-4000 W és hőkamera (Bosch GTC 400 C Professional).

A mérés során három darab azonos kivitelű saru-csavar páros megfigyelése történt egyidőben. A vizsgált villamos kötőelemek hőkamera által mutatott hőmérsékleti értékeit különböző áramerősség paramétereknél rendre leolvastam az erre a célra kialakított, már bemutatott vizsgáló berendezés segítségével. A kísérletben azonos (1:1) katód (réz saru) és anód (bevonatos acélcsavar) felületeket figyeltem meg és a fizikai mennyiségek mérési eredményeinél használatos már bemutatott hibaszámítás módszerét használtam. Az eredményeket a 17. táblázatban foglaltam össze és a 48. ábrán ábrázoltam.

I [A]	Mért	Átlag	Abszolút	Gaus-féle hiba	Relatív
	értékek	$\overline{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_n}{a_1 + a_2 + a_n}$	hiba	$= \sqrt{(\Delta a_1)^2) + (\Delta a_2)^2) + (\Delta a_n)^2}$	hiba
	$\Delta T [^{\circ}C]$	n	$\overline{a} - a_n =$	$\Delta a = \sqrt{\frac{n(n-1)}{n(n-1)}}$	$\delta \bar{a} = \frac{\Delta \bar{a}}{\bar{a}} \cdot 100\%$
			Δa_n		ā
	27		0,2		
0	27,1	27,2	0,1	0,15	0,005
	27,5		-0,3		
	26,9		0,5		
0,08	27,3	27,4	0,1	0,24	0,008
	27,7		-0,3		
	33,9		0,2		
2	34	34,1	0,1	0,15	0,004
	34,4		-0,3		
	44,1		0,2		
3,9	44,1	44,3	0,2	0,2	0,004
	44,7		-0,4		
	74,6		0,4		
7,66	74,9	75	0,1	0,26	0,003
	75,5		-0,5		
	124		1		
11,58	124,9	125	0,1	0,6	0,004
	126,1		-1,1		

17.táblázat Hőmérséklet az idő függvényében (acél-réz)



48. ábra A hőmérséklet az idő függvényében (acél-réz)

Összefoglalás

A galvánkorrózió jelenségének vizsgálata során létrehoztam egy laboratóriumi modellmérési rendszert. A vizsgálat előtt felület tisztítást végeztem, majd korróziós terhelés (3% -os sószórással 168 óra alatt, 40 ° C hőmérsékleten) alatt határoztam meg az eredményeket. Vizsgálati módszer a 38. ábrán bemutatott összeállítás szerint.

A fűtőberendezés különböző kapcsolóállásában a használt teljesítménye eltér. Az elektromos áram nagysága változik az előkészített kötésen, ahol mérhető hő keletkezik, mivel az ellenállás az előkészítés során megváltozott (0,01 Ω -ról 5,6 Ω -ra). A hőkamera lehetővé teszi a biztonságos és pontos hőmérési folyamatot. Ebben a kísérletben a kötés hőmérsékletét a villamos áram változásának függvényében mértem. A nagy áramsűrűség hőt termel. A 39. egyenlet alapján feltételezhető a hőmérséklet és a teljesítmény közötti összefüggés. Az egyenlet, ahol P [W] a villamos teljesítmény, I [A] az elektromos áramerősség, U [V] a feszültség (39):

$$P = U \cdot I \tag{39}$$

Az Ohm-törvényt alkalmazva, ahol az ellenállás R [Ω], a következő összefüggés adódik (40):

$$P = R \cdot I^2 \tag{40}$$

Ebből az egyenletből látható, hogy a kísérletben a villamos energia (hőfejlődés) négyzetesen arányos az áramerősséggel.

A villamos kötés hőmérséklete változott a vizsgálati idő alatt. Ennek az eredménynek az alapján azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az ipari (valós) alkalmazásokban ugyanazt a jelenséget észlelhetjük. A galvánkorrózió hatására a kötés ellenállása is megváltozik. A keletkező hő mérhető, és ez hőkamerával jó közelítéssel és biztonságosan meghatározható. A következő ábrákon a villamos kötőelem hőkamera által készített képei láthatók (49-50. ábra).



5 GALVÁNKORRÓZIÓ KINETIKÁJÁNAK MEGHATÁROZÁSA TÖMEGVESZTESÉG ÉS FÉMION BEOLDÓDÁS ALAPJÁN

Eddigi kutatásom célja a rézsaruk és a horganyzott acélcsavarok közötti galvánkorrózió szerepének vizsgálata volt. Korábbi, hőkamerás, áram alatt végzett vizsgálataim alapján a szerelvény körüli korróziós folyamatok szerepe állt a középpontban, amelyek a hőfejlődésért felelősek lehetnek [38, 59, 60]. Ebben a többfémes rendszerben, ahol a fémek eltérő elektródpotenciálúak, a kémiai folyamatokat elektrolitok jelenlétében különböző, egymást kiegészítő technikákkal elemeztem. A különböző hőmérsékleteken mért tömegveszteség-vizsgálatok a korróziós fémveszteségekről adtak információt, a korróziós folyamatok során oldott fémionok analízisét induktív csatolású plazma optikai

emissziós spektrometriával (ICP-OES) végeztem, a korróziós igénybevétel okozta felületi morfológiai változásokat sztereomikroszkóppal (SM), pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) és atomi erőmikroszkóppal (AFM) tettem láthatóvá.

Ezek az egymást kiegészítő kísérletek számszerűen igazolták, hogy a vizsgált villamos szerelvények működése során a réz oldódását a cink és a vas jelenléte még megnövelt hőmérsékleten is gátolta. A vasionok megjelenése az elektrolitban és a fémfelületen megjelenő barnás foltok azt jelezték, hogy először a cink tudta gátolni a réz korrózióját, de a csavaron lévő vékony cinkréteg feloldódása után a vas veszi át a réz védelmét. Mindig a kevésbé nemes fém károsodik, oldódik [59–68]. A vizsgált fémek állandóit a 18. táblázatban foglaltam össze. Mint korábbi vizsgálatomnál látható volt, fontos a két fém felületének viszonya, minél nagyobb a nemes fém felülete a kevésbé nemeshez képest (nagy katód-, kis anódfelület), annál nagyobb méretű károsodásra számíthatunk.

Anyagállandók	réz	vas	cink
Sűrűség [g/cm ³]	8,96	7,87	7,14
Atomtömeg	63.546	55,8	65,4
Op [°C]	1085	1538	419,5
fajhő [J/Kg.K]	381	460	381
Hővezetési tényező [W/m.K]	386	83	112
Lineáris hőtágulási tényező [1/ºC]	16,7x10 -6	10,4x10 ⁻⁶	32,2 x10 ⁻⁶ 32,2 x10 ⁻⁶
Standard potenciál	0,344 V	-0,441 V	-0,762 V

18.táblázat A vizsgált fémek főbb anyagállandói

5.1 A rozsdásodás elvi következményei, Pilling–Bedworth–arány (**R**_{PB})

A különböző korróziós vizsgálatok eredményeinek bemutatása előtt fel kellett mérni a réz-, cink- és vasfelületeket borító különböző oxidrétegek szerkezetét. A legjobb a Pilling–Bedworth-arány (R_{PB}) alkalmazása, amely a fém és a fém-oxid térfogatának

különbségeit jellemzi. Ezt a jellemzőt a következő összefüggéssel lehet meghatározni [59, 69] (41):

$$R_{PB} = \frac{V_{f\acute{e}moxid}}{V_{f\acute{e}m}} = \frac{M_{f\acute{e}moxid} \cdot \rho_{f\acute{e}m}}{n \cdot A_{f\acute{e}m} \cdot \rho_{oxid}}$$
(41)

ahol:

V_{fémoxid} -a fém-oxid elemi cellájának térfogata,

V_{fém} – a fém elemi cellájának térfogata,

- n fématomok száma az oxidban
- ρ fém sűrűsége
- M móltömeg
- A atomtömeg

Az R_{PB}-értékek meghatározzák a fémfelületen képződött oxidok szerkezetét, ahol a következő esetek fordulhatnak elő (51. ábra):

Vékony oxidréteg, töredezik, nincs védőhatás;

 $R_{PB} < 1$

Az oxidréteg passziválja és védi a fémfelszínt a további oxidálástól (Ti, Al, Cr-tartalmú acél);

```
1 < R_{PB} < 2:
```

Az oxidréteg lepattog, nincs védőhatás (pl Fe₂O₃);

```
R_{PB} > 2:
```



51. ábra Az oxid szerkezete a Pilling-Bedworth-arány szerint [59]

A PB-értékek egyértelműen mutatják: ha a Cu₂O réteg nem tudja egyenletesen befedni a rézfelületet; (bár ez a réteg hatékonyan passziválja a korróziós folyamatokat) nem túl stabil a vizes nátrium–klorid oldatban [70, 71]. A különböző oxidok Pilling–Bedworth - arány értékét a 19. táblázatban foglaltam össze.

Fém	Oxid-képlet	Rpb				
cink	ZnO	1,58				
vas	FeO	1,70				
vas	Fe ₃ O ₄	1,90				
vas	Fe ₂ O ₃	2,14				
réz	Cu ₂ O	0,75*				
réz	CuO	1,75*				
(*•	(*a granz" grámitága alamián)					

19.táblázat A különböző fémoxidok Pilling-Bedworth-aránya

(*a szerző számítása alapján)

A Cu₂O létezését fotoelektron-spektroszkópiával igazolták, de ezek a kísérletek azt bizonyították, hogy a rézfelületen csak akkor kezdenek lyukak keletkezni, amikor a rézoxid (I) nem tudja folyamatosan fedni a fémfelületet. A magasabb oxidációs állapotban lévő Cu (CuO) sima, egyenletes réteget képez. A ZnO-oxidréteg a CuO-hoz hasonlóan viselkedik; szintén vékony fedőréteget képez. A vas esetében a Fe₂O₃ képződése felelős az oxidréteg leválásáért, repedezéséért és a vasfelület szabaddá, láthatóvá tételéért.

A következő kísérletekkel azt kívántam bizonyítani, hogy a kisebb elektronegativitású horganyzott acél rézzel való érintkezésekor a réz helyett a cink (és a cink oldódása után a vas) oldódik fel. A korrózió számszerű meghatározásához kiegészítő kísérleteket alkalmaztam a morfológiai és hőfejlődési megfigyelések bizonyítására és számszerűsítésére, valamint annak kimutatására, hogy ezeket a jelenségeket a különböző fémek érintkezésének korróziótermékei okozzák, és egyúttal a különböző elektronegativitású fémek védőhatásának bizonyítására.

5.2 Tömegveszteség mérése a hőmérséklet függvényében korrozív közegben

A levegő nedvessége és a benne oldott ionok/gázok elősegítik a korróziót. A gyorsított korróziós folyamatok modellezésére sóoldatot használtam. A zsírtalanított réz- és horganyzott acélcsavarokat a mérés után külön-külön és együtt is (3%-os NaCl-oldatot tartalmazó) kémcsövekben tartottam 91 órán keresztül. A kísérleteket különböző hőmérsékleteken végeztem: 23 °C, 40 °C, 60 °C és 80 °C, hogy megfeleljenek az ipari körülményeknek, amikor a korrózió fokozza a többfémes rendszer hőmérsékletét a használat időtartama alatt. A kísérleti idő lejárta után a fémeket kivettem az oldatból; desztillált vízzel mostam, majd a rozsdarétegeket egy speciális oldattal (10% HCl 100 ppm hexametilén–tetraminnal) távolítottam el. Minden fémfajtát ismét vízzel, majd acetonnal mostam, és miután levegőn lecsöpögtettem őket, megmértem a tömegüket. A

kezdeti és a végső tömeg közötti különbség mutatta, hogy a fémek mennyire korrodálódtak.

5.2.1 Mérés

Címe: Azonos (1:1) katód-anód arányú kötőelem tömegveszteség vizsgálata

Mérés helye: ÓE.BGK. Kémia labor 212.

Mérés célja: kétfémes villamos kötőelemek galvánkorrózió következtében kialakuló tömegvesztésének detektálása a hőmérséklet függvényében 91 órán át.

Mérés menete: az erre a célra kialakított vizsgáló berendezésben, azonos katód-anód arányú, különböző anyagminőségű villamos kötőelemek különböző hőmérséklet melletti monitoring tevékenysége.

Felhasznált anyagok a 3. táblázat szerint.

Analitikai mérleg; Kern, ALJ 220-4MN

A korróziós veszteségek pontosabb meghatározása érdekében a fémion koncentrációkat az alkalmazott elektrolitokban ICP-OES technikával határoztam meg, amely képes elemezni a fémionokat ugyanabban az oldatban.

A tömegveszteség mérési eredmény értékeket a hőmérséklet függvényében a 20. táblázatban foglaltam össze, a grafikus ábrázolást pedig az 52–54. ábrákon mutatom be.

Hőmérséklet	Tömegveszteség ∆m [g]				
[°C]	Rézsaru	Acélcsavar	Rézsaru + Csavar		
23	0,0005	0,0057	0,0059		
40	0,0012	0,0090	0,0082		
60	0,0017	0,0094	0,0106		
80	0,0026	0,0184	0,0165		

20.táblázat Tömegveszteség 3%-os NaCl oldatban



52. ábra Tömegveszteség-értékek a hőmérséklet függvényében



53. ábra Tömegveszteség-értékek a hőmérséklet függvényében



54. ábra A tömegveszteség-értékek a hőmérséklet függvényében

Az Arrhenius-egyenlet (42) egy egyszerű, áttekinthető formula a reakciósebesség állandó hőmérséklet függésének kimutatására, és egyben a kémiai reakciósebesség jellemzésére.

$$k = A \cdot e^{\left(\frac{-E_0}{k_B \cdot T}\right)} \tag{42}$$

ahol:

k: sebességállandó;

A: preexponenciális tényező;

k_B: Boltzmann állandó;

T: hőmérséklet

Az Arrhenius–egyenlet azt fejezi ki, hogy a reakciósebesség állandó(k) hogyan függ a hőmérséklettől (T) és az aktiválási energia (E₀) értékétől.

Az ln(k) – 1/T összefüggésből kapott egyenes meredekségéből és tengelymetszetéből az Ea és a "A" értékek számíthatók.

A 21. táblázatban a tömegveszteség mérési eredményeket és logaritmus értékeiket foglaltam össze, majd az 55. ábrán ábrázoltam a hőmérséklet reciprok értékének függvényében.

T [°C]	23	40	60	80
1/T [1/K] x10 ⁴	33,78	31,95	31,13	28,33
Δm (saru) [g] x10 ⁴	5	1,2	1,7	2,6
ln ∆m (saru) [g]	1,6	0,18	0,53	0,95
Δm (csavar) [g] x10 ⁴	57	90	94	184
ln Δm (csavar) [g]	4,04	4,49	4,54	5,21
Δm (egyben) [g] x10 ⁴	59	82	106	165
ln Δm (egyben) [g]	4,07	4,4	4,66	5,1

21.táblázat Tömegveszteség az Arrhenius-egyenlet alapján



55. ábra A tömegveszteségek logaritmusa

Összefoglalás

Mivel korábban már említettem a potenciálkülönbségek fontosságát, egyértelmű, hogy amikor a cink elektrolit jelenlétében érintkezik a rézzel, a galvánreakció a cink oldódásához vezet. A vizsgálat során a horganyzott acélcsavar érintkezik a réz saruval. A cink megvédi az acélt a rozsdásodástól azáltal, hogy a cinkből lassú áram folyik az acélban lévő vashoz, de a cink más érintkező fémekkel, a vizsgált kapcsolat esetén ez a réz, is létesíthet áram átvitelt. A kezdeti kísérleti időszakban a vas nem tud érintkezni a rézzel (a vékony cinkbevonat miatt). Az első reakció a cink gyors korróziója, és csak a cinknek az acél felületéről való kioldódása után kerülhet a rézzel egymás mellé.

A réz és a cink között nagyobb a potenciálkülönbség, mint a vas és a cink között, de a vas is képes gátolni a réz oldódását (7. ábra) [8, 30, 31].

Kísérleteim célja a galvánkorrózió megvilágítása volt, amikor a rézsaru horganyzott acélcsavarral érintkezik. Már kimutattam, hogy hosszú távú kísérletek során e fémek korrózióját hőfejlődés kísérte. Az egyetlen egyszerű módszer a meghibásodás elemzéséhez és a problémák előrejelzésének módjához megemelt hőmérsékleten a hőfejlődés termográfiai vizsgálata a réz saru/horganyzott acélcsavar/ és a csavaranya csatlakozásánál [9, 10]. A jelen dolgozatban ismertetett vizsgálatokkal a korrózió előrehaladását különböző, egymást kiegészítő technikákkal követtem. A nemkívánatos romlási folyamatokat nátrium-klorid oldatban gyorsítottam, hogy a hosszú távú folyamatot rövidebb idő alatt modellezzük.

A horganyzott acélcsavar és a réz saru külön-külön vizsgált tömegvesztési adatai egyértelműen azt mutatják, hogy nagyobb hőmérsékleten a korróziós oldódás mindkét esetben növekszik. A horganyzott csavar és a rézsaru együttes alkalmazásakor a korrózió mértéke (azaz a kioldott fémek tömege) csökkent, ami a horganyzott csavar védőhatását mutatja minden vizsgált hőmérsékleten.

Annak érdekében, hogy többet tudjunk meg a korróziós hatásról, a tömegveszteségvizsgálatokhoz használt elektrolitokban lévő fémion-koncentrációkat egy olyan speciális technikával követtem nyomon, amely képes a fémionok elemzésére ugyanabban az oldatban.

5.3 A korrózió követése a beoldódott ionok mennyisége alapján a hőmérséklet függvényében

Fémion-koncentráció elemzése a korróziós vizsgálat után: a korróziós környezetben lévő NaCl-oldatokban oldott fémionokat induktív csatolású plazma - optikai emissziós spektroszkóppal (ICP-OES) mértem, amely CCD-detektorral van felszerelve (lehetővé teszi a 175-775 nm-es tartomány lefedését). A kísérleteimben használt műszer a Spectro Genesis ICP-OES spektrométer. Az mérések során az ionkoncentrációt a rézsarunál külön, a horganyzott anyánál külön, majd a kettőt együtt egyben is meghatároztam. Az ionkoncentráció meghatározása induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrometriával (ICP) történt.

5.3.1 Mérés azonos katód-anód arány

Címe: Azonos (1:1) katód-anód arányú kötőelem hőmérséklet függő ion beoldódás vizsgálata

Mérés helye: ÓE. BGK. Kémia labor 212.

Mérés célja: kétfémes villamos kötőelemek galvánkorrózió következtében kialakuló ion beoldódás detektálása a hőmérséklet függvényében 91 órán át.

Mérés menete: az erre a célra kialakított vizsgáló berendezésben, azonos katód-anód arányú, különböző anyagminőségű villamos kötőelemek változó hőmérsékletek melletti monitoring tevékenysége. Felhasznált anyagok a 3. táblázat szerint. Méréseket az Induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrométer (ICP) berendezéssel végeztem.

Oldat minta	Cu [ppm]	Fe [ppm]	Zn[ppm]
NaCl oldat, 3%	0,009	0,13	0,058
Réz saru (egyedül)	8,40	0,141	0,794
Galvanizált csavar	0,16	0,496	170
(egyedül)			
A két fém együtt	0,20	2,79	126

22.táblázat Fémion koncentráció 23 °C-on

Oldat minta	Cu [ppm]	Fe[ppm]	Zn [ppm]
NaCl oldat, 3%	0,009	0,13	0,058
Réz saru (egyedül)	30,1	2,07	1,21
Galvanizált csavar	0,14	53,7	170
(egyedül)			
A két fém együtt	0,85	107	190

24.táblázat Fémion koncentráció 60 °C

Oldat minta	Cu [ppm]	Fe [ppm]	Zn [ppm]
NaCl oldat, 3%	0,009	0,13	0,058
Réz saru (egyedül)	43,6	0,21	3,50
Galvanizált csavar	1,06	192	200
(egyedül)			
A két fém együtt	0,56	159	210

25.táblázat Fémion koncentráció 80 °C

Oldat minta	Cu [ppm]	Fe [ppm]	Zn [ppm]		
NaCl oldat, 3%	0,009	0,13	0,058		
Réz saru (egyedül)	108	0,266	4,77		
Galvanizált csavar	0,37	904	159		
(egyedül)					
A két fém együtt	0,83	869	134		



Az eredményeket a 22–25. táblázatokban foglaltam össze és az 56–58 ábrákon ábrázoltam.

56. ábra Kioldódott ionok a hőmérséklet függvényében



57. ábra Kioldódott ionok a hőmérséklet függvényében



58. ábra Kioldódott ionok a hőmérséklet függvényében

Vizsgálti eredmények értékelése Arrhenius-egyenlet szerint

A mérési eredmények feldolgozása során az alábbiakban mutatom be az Arrhenius egyenlet szerint számított ion beoldódás mértékét az elektrolitban. A rézsaru esetén mért mennyiségeket a 26-27. táblázatokban foglaltam össze és az 59. ábrán ábrázoltam.

Saru	Cu ppm		
23 °C	8,4		
40 °C	30,1		
60 °C	43,6		
80 °C	108		

27.táblázat	Rézion	beoldódás az	Arrhenius-	-egvenle	t alapián
= /	1 COLIOII	ocordo da	1 11110111000	• <u>5</u> , • <u>111</u> •	e anappan

1/T [1/K] x10 ⁴	33,78	31,95	31,13	28,33
Cu ppm	8,4	30,1	43,6	108
ln Cu	2,13	3,4	3,78	4,68



59. ábra A rézionbeoldódás a hőmérséklet függvényében

A 28-29. táblázatban összefoglalt mérési eredményeket a 60. ábrán ábrázoltam, ami a csavarból beoldódott ion mennyiségeket mutatja.

28.táblázat Fe és Zn beoldódás

Csavar	Fe ppm	Zn ppm
23 °C	0,496	170
40 °C	53,7	170
60 °C	192	200
80 °C	904	159

29.táblázat A csavarból beoldódott ionok mennyisége az Arrhenius-egyenlet alapján

T [°C]	23	40	60	80
1/T [1/K] x10 ⁴	33,78	31,95	31,13	28,33
Fe ppm	0,496	53,7	192	904
ln Fe	-0,70	3,98	5,26	6,81
Zn ppm	170	170	200	159
ln Zn	5,14	5,14	5,30	5,07



60. ábra A Fe és Zn ion beoldódás a hőmérséklet függvényében

A 30-31. táblázatban a villamos kötőelem összeszerelt állapotban vizsgált ionbeoldódás mennyiségeit foglaltam össze, az eredményeket 61. ábrán ábrázoltam.

Egyben	Fe ppm	Zn ppm	Cu ppm	
23 °C	2,79	126	0,20	
40 °C	107	190	0,85	
60 °C	159	210	0,56	
80 °C	869	134	0,83	

30.táblázat Az ion beoldódás a hőmérséklet függvényében

31.táblázat Az ion beoldódás a hőmérséklet függvényében a	az Arrhenius–egyenlet alapján
---	-------------------------------

1/T [1/K] x10 ⁴	33,78	31,95	31,13	28,33
Fe ppm	2,79	107	159	869
ln Fe	5,63	4,67	5,07	6,77
Zn ppm	126	190	210	134
ln Zn	4,84	5,25	5,35	4,90
Cu ppm	0,2	0,85	0,56	0,83
ln Cu	-1,61	-0,16	-0,58	-0,19



61. ábra Ionok (Cu, Zn, Fe) beoldódása

Összefoglalás

Az ICP-OES adatok azt bizonyítják, hogy az elektrolitba egyedül mártott réz hőmérsékletfüggő oldódása nagymértékben növekszik: 23 °C-on 8,4 ppm, 80 °C-on 108 ppm. Ezzel szemben, amikor a rézsarut és a horganyzott csavart együtt mártjuk a nátriumklorid oldatba, a réz oldódása jelentősen csökken: 23 °C-on 0,2 ppm, 80 °C-on pedig 0,83 ppm. Ezek a fémion értékek a cink és részben a vas védőfunkcióját bizonyítják.

Azon oldatok elemzésénél, amelyekben a horganyzott csavart egyedül vagy a rézsaruval együtt mártottuk megfigyelhető, hogy a megnövekedett hőmérséklet növeli mind a vas-, mind a cinkfém oldódását, de nincs jelentős különbség, hogy a csavart egyedül vagy a réz saruval együtt merítettük az elektrolitba.

Mind a súlyveszteség mérések, mind az ICP-OES analízisek legfontosabb következtetése, hogy a szerelvényből elsősorban a cink oldódott ki, de ha a cink főként cinkionok formájában van az oldatban, akkor a vas még nagyobb hőmérsékleten is átveheti a réz védelmét.

Az Arrhenius-egyenletet figyelembe véve a két féle folyamatra a következő összefüggés vehető észre, a (42) összefüggés felhasználásával:

$$k = A \cdot e^{\left(\frac{-E_0}{k_B \cdot T}\right)} \tag{42}$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E_0}{Tk_B}$$
(43)

$$\ln\Delta m \sim -\frac{E_0}{K_B} \cdot \frac{1}{T} \tag{44}$$

ahol az $-\frac{E_0}{K_B}$ hányados arányossági tényező, így:

$$\ln\Delta m \sim \frac{1}{T} \tag{45}$$

A tömegvesztés folyamatáról kijelenthető, hogy a természetes alapú logaritmusa az $\frac{1}{T}$ - vel, az abszolút hőmérséklet reciprokával egyenes arányban csökken.

Az ezzel parallel vizsgált ion beoldódás ugyanezt a képet mutatja. A saruról (csavarról) leváló anyagmennyiség az oldatba kerül (anyagmegmaradás törvénye), ebből következik, hogy a leváló tömeg és az oldatban lévő réz (cink, vas) aránya ugyanúgy változik. Ezt mutatják a mért eredményekből előállított függvények képei és megfogalmazható a tömegvesztés folyamatára felírt összefüggés az alábbi esetre vonatkoztatva:

$$\ln Me_{\rm ppm} \sim \frac{1}{T} \,. \tag{46}$$

ahol:

Me_{ppm} a beoldódott fémion mennyiségét jelenti.

6 FELÜLETI MORFOLÓGIAI VIZSGÁLATOK

6.1 Vizsgálatok pásztázó elektronmikroszkóppal

A SEM-képek egyértelműen bizonyítják a hőmérséklet hatását a lyukkorrózióra: magasabb hőmérsékleten a lyukak száma és mérete jelentősen megnő. Azokban az esetekben, amikor a fémeket egyedül merítettük az elektrolitba, a lyukak száma sokkal nagyobb, mint azokon a mintákon, ahol összekötöttük őket (a valós ipari körülményeket modellezve). A SEM mérési eredményeket az alábbi 32–33. táblázatokban foglaltam össze.



32. táblázat A minták SEM-felvételei a korróziós kísérletek előtt

Más szavakkal: azokban a korróziós kísérletekben, amikor a rezet a horganyzott csavarhoz és a horganyzott csavaranyához csatlakoztattuk, a lyukak száma a réz felületén drámaian csökkent. A csökkenés azokon a képeken látható a legjobban, amelyeket a 80 °C-on kezelt mintákon vizsgáltunk. Ezek az eredmények alátámasztják az ICP-OES mérésekkel kapott adatokat: nemcsak a lyukak száma csökkent, hanem az oldott réz mennyisége is.

	Korróziós vizsgálat hőmérséklete					
Vizsgált	23 °C	40 °C	60 °C	80 °C		
kötőelem						
Rézsaru	1 20-102 m 2004 1.00 200 200 m 2005 200 m 1 20-102 m 2001 200 2004 200 m 2004 200 m 2004 200 m	Bit D ² + 11.824 Bits (A = 10.1) Dist (C = 10.1) Dist (C = 10.1) Bit D ² + 11.824 Bits (A = 10.1) Dist (C = 10.1) <td>Вілі ОГУЧКИ Виді-101 Виді-101</td> <td>The Second Se</td>	Вілі ОГУЧКИ Виді-101	The Second Se		
Rézsaru	A CARLER AND	1 3 -				
csavar-	Land Alex			A Annales		
fejjel						
érintkezve	20er 0FF+1105VF StyleA-3E1 Des 1819/2022 VIO-1105VF May=-00.X Feature=3-2,3,500-110	200 01 4 122 02 → 02 + 02 2 02 ND + 02 02 ND + 02 2 02 ND + 02 02 ND +	Starr 017-118384 Spel A-511 Den 37 Mor 202 WO - 118244 Bag - 50 X Failware 42,05,051 J	n Dil" + 10.0007 Bignel A - 101 Dans 3 May 202 VG - 10.1 mm May + 5.00 K X Fel Name + 52,00,000 h M		
Csavarfej	11 Martin Sale					
szabadon	Shirt Of VILLOW Single Artist	Pom VD = 8.5 km VD = 8.5 km VD = 8.5 km V	Elizar (ST-11)Elizar Segula-St. Soc 21 May 201 (SD-12) May 10.2. Segula-St. Soc 21 May 201 Partment of (SL, SLOT) The	2 - 20 - 20 - 20 - 20 - 20 - 20 - 20 -		
Csavarfej						
saruval érintkezve						
	2044 807 102 00 Egyst A-SEL Gen 18 No 202 W0 - 80 rm Nog - 50 X File None - 5072,23,500-111	25an 0:91 - 1500 W Sayat A + 581 0an 27 May 1022 Protection 1 - 100 May 100 - 100 - 100 May 100 - 100	20an 801 + 630 W SpeciA - 521 Data 27 May 2022 W VO - 8.0 rm Mag = 50 X Fish Neme - C072, 45, 500 M	Norm (1917-1000) Capata - 601 Day 100/2021 W0 + 650m Mag + 10012 Pankare - 507-203 (1000)		
Galv. anya	eller Bally ?.	and for the	A Charles and a set	A ST		
szabadon	Mp 0 ²⁷ + 10 ²⁶ M Spin 4 × 22 Oper + 10 ²⁶ M		Nor Bit * 625m Nord * 61 Nord Web 20 Nord Web 20 Nord Bit * 625m Nord * 625m Nord Web 20 Nord Web 20	ан (станон адарьска) 2011 - 10 на адарьска 2012 - 10 на адарьска 2013 - 20 на адарьска 2013 - 20 на адарьска 2014 -		
Galv. anya						
érintkezve		Прото 102 - 6120 - Прото 102 - 6120	Bit Bit 1:0:0 Englis 1:0 Dist 2:0:0	Пит Пагто 1997 г. 1 иг. 1 лит Вари К. 1911 г. 1 иг. 1		

33. táblázat A különböző hőmérsékleten vizsgált minták SEM-felvételei

6.2 A felületi morfológia vizsgálata atomi erőmikroszkóppal

Az atomi erőmikroszkóp (AFM) technika hasznosságát a korróziós igénybevétel értékelésében már korábban is bizonyították [72, 73]. Az atomi erőmikroszkóp lehetővé teszi egy szilárd felület vizualizálását µm és nm tartományban, levegőn, mindenféle felület-előkezelés nélkül [74–76]. Egy nagyon éles hegy és a szilárd felület közötti erőt (nN/m) méri. Ez a technika nemcsak a szilárd felület morfológiájáról adhat információt, hanem numerikus információt ad a felületi érdességről is. (Digitális műszer, NanoScope III, Digital Instruments).

Az AFM-technikával vizsgált felületek morfológiai jellemzőit a következő táblázatban (34-35. táblázat) foglaltam össze.

34. táblázat A fémfelületek (külön-külön alkalmazott) AFM-felvételei a korrozív elektrolitba való mártás előtt és után.







Az AFM-felvételek kiértékelése, mind a 3D-s, mind a metszeti képek, azt mutatják, hogy a réz és a horganyzott csavar komoly korróziós oldódást szenved a nátrium-klorid oldatban (a metszeti képeken látható megnövekedett érdesség egyértelműen jelzi a fém fokozott oldódását). A megnövekedett reakcióidő a rézfelületen kimutatott fokozott fémoldódást okozott, amit az egyenetlenségek is bizonyítanak.

35. táblázat A fémfelületek AFM-felvételei (szoros érintkezésben alkalmazva), miután maró elektrolitba mártottuk őket



A valós helyzet utánzása érdekében, azaz amikor a réz- és a horganyzott csavarokat összeillesztett formában alkalmaztam (azaz az egyes fémek szorosan érintkeztek egymással, és a légkör nedvessége és sói befolyásolták őket), AFM-mel láthatóvá tett korróziós igénybevételt figyelhetünk meg. A korábbi képekkel ellentétben itt 2D-s képek kerülnek bemutatásra, mivel ezek több információt hordoznak a nanométeres skálán lévő felületi morfológiáról. Másrészt a 3D-s képek szolgáltak a metszeti képek alapjául, amelyek lehetővé teszik mind a horganyzott csavaron, mind a szoros érintkezésben alkalmazott rézen mért számértékek tanulmányozását: az 1 órára elektrolitba mártott csavaron a nagy felületi különbség 135 nm, a rézen 15 nm. Az összehasonlítás kedvéért, amikor ezeket a fémeket csak nátrium-klorid oldatba mártottuk, külön-külön, ezek az értékek a csavar esetében 358 nm, a réz esetében 74 nm voltak. Az oxidréteg különleges, szabályos formát mutat.

Összefoglalás

A fejezet a gyakorlati életben felmerülő problémát kívánta tisztázni, azaz megmagyarázni a különböző elektronegativitású kapcsolt fémek felmelegedésének okát. A modellfémek réz, alumíniumsaruk és horganyzott csavarok voltak. A korróziós folyamatok tisztázása érdekében nátrium-klorid vizes oldatba merítettük őket, hogy utánozzuk a nedves környezet valóságát különböző agresszív komponensekkel, és egyúttal növeljük a korróziósebességet. A korróziót tömegvesztési vizsgálatokkal, a kloridos oldatban lévő fémionok elemzésével, valamint a fémek károsodása által okozott morfológiai változások SEM- és AFM-technikákkal történő vizualizálásával követtem nyomon. Számszerű érdességi értékek jellemezték a fémek korróziója által okozott érdességet. A fontos megfigyelések a következők:

Amikor a rézsarut és a horganyzott csavart külön-külön a korróziós oldatba merítettük, a korrózió nyomait mind általános, mind lyukkorrózió formában kimutattuk a súlyvesztés vizsgálatával, a fémion-koncentrációk elemzésével, valamint SEM és AFM módszerekkel láthatóvá tettük. A sztereomikroszkópos képek jól támasztják alá mind a tömegveszteség méréssel, a felületmegmutatással (AFM, SEM), mind a beoldódott iontartalom meghatározással kapott eredményeket.

A különböző technikákkal kapott eredmények azt bizonyították, hogy a réz oldódását az illesztett helyzetben jelentősen csökkenti a cink jelenléte a csavaron, azaz bebizonyosodott, hogy ilyen kísérleti körülmények között a kevésbé elektronegatív fém képes megmenteni a másik, nagyobb elektronegativitású fémet, azaz amíg a cink jelen van, a réz korróziója nagymértékben csökken. Ha a cink nem tudja teljesen lefedni a csavar felületét, akkor a vas veszi át a mentési feladatot.

Ezekkel a kísérletekkel megmagyarázhatjuk a gyakorlati körülmények közötti hőfejlődés okát: a kísérletekben képződött korróziós termékek nem teszik lehetővé a szoros érintkezést a réz saru és a horganyzott acélcsavar között. A cink (csakúgy, mint a vas) csak ideig-óráig képes csökkenteni a réz korróziós romlását; később a korróziós termékek csökkentik azt a felületet, ahol az áram folyhat és ez a hőmérséklet emelkedést okoz.

ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

Doktori kutatásaim célja a villamos kontaktusok korróziójának megismerése, korrózióvédelme, valamint a korrózió okozta káros felmelegedésének tudományos vizsgálata. A villamosiparban az ebből eredő teljesítménycsökkenés – rossz, hibás, korrodált villamos kapcsolatok – hányada is magas. Kutatásaim célja volt olyan vizsgálati módszerek bevezetése, melyek lehetővé teszik a hibák időben való felismerését, csökkentve a balesetveszélyes helyzetek kialakulását és az ebből kialakuló veszteségek mértékét. Célom volt továbbá megvizsgálni a főbb villamos kötőelemek korrózió okozta fizikai elváltozásait, különböző paramétereit, összefüggéseit és következtetéseket tenni ezen változók alapján a korróziósebesség alakulására. Céljaimat egy ma már rohamosan terjedő diagnosztikai berendezés segítségével, a hőkamerával és az általam fejlesztett vizsgáló berendezések segítségével valósítottam meg. Doktori témámban a villamosipar és a háztartások villamos energia ellátásának egy markáns szeletét vizsgáltam.

Kutatásaimat átgondolt tervezés alapján szisztematikusan hajtottam végre az alábbiak szerint (a bevezetésben bemutatott 1. ábra tartalmazza):

Az irodalomkutatás segítségével bemutattam az eddigi eredményeket a korrózió és galvánkorrózió kutatás területén, jellemezve ezt a változást jellege és megjelenési formája szerint. Megvizsgáltam a korrózió mérési módszereit, mérhetőségét.

A doktori értekezés következő részében a termográfia eddigi eredményeit, fizikai alapjait vettem górcső alá, alkalmazásának lehetőségeit a korróziós vizsgálatokban.

Kialakítottam egy új és speciális vizsgálati módszert, mely alkalmas kétfémes villamos kötőelem galvánkorróziós kinetikájának meghatározására laboratóriumban. Egyszerre

lehet mérni az átmenetiellenállást az idő és a hőmérséklet függvényében több minta bevonásával különböző felület arányokkal. Érdesség vizsgálattal kiegészítve releváns következtetések vonhatók le a felgyorsított korróziós elváltozás folyamatára, sebességére.

A növekvő átmenetiellenállás melegedést vált ki a villamos alkatrészen. Ennek vizsgálatára alkottam meg elsőként egy alkalmazott mérési rendszert, mely változtatható teljesítmény szinteken követi nyomon a hőhatás változásait a hőkamera segítségével. Ez a vizsgálati módszer az áramerősség hatását is figyelembe tudja venni a kapcsolat melegedésének detektálására.

A két fent említett új eljárás, mérési módszer segítségével kapcsolatot ismertem fel a meghúzási nyomaték értékkel arányos csavar elfordulási szög és a kötőelemen kialakuló ellenállás és hőtermelődés folyamatában.

Kutatásom során fontosnak tartottam az anyagvesztés alakulását is megvizsgálni a villamos kötőelemen, összehasonlítani a beoldódott ionok mennyiségével a hőmérséklet függvényében. Nagypontosságú berendezések (AMF, SEM, ICP-OES) használatával sikerült a folyamatok kinetikáját meghatároznom és a galvánrendszer összetett mechanizmusát elemeznem.

Végül felületi morfológiai vizsgálatoknak vetettem alá a már említett villamos alkatrészeket, hogy az előző vizsgálatok eredményeit megerősítsem. A különböző technikákkal kapott eredmények azt bizonyították, hogy a réz oldódását az illesztett helyzetben jelentősen csökkenti a cink jelenléte a csavaron, azaz bebizonyosodott, hogy ilyen kísérleti körülmények között a kevésbé elektronegatív fém képes megmenteni a másik, nagyobb elektronegativitású fémet, azaz amíg a cink jelen van, a réz korróziója nagymértékben csökken. Ha a cink nem tudja teljesen lefedni a csavar felületét, akkor a vas veszi át a mentési feladatot.

A disszertáció végén függelékben mutatom be az alkalmazott berendezéseket és kísérleti összeállításokat.

A kutatásaim során elért eredmények a hipotézisek igazolásával

1. **Az első hipotézist**, miszerint: Feltehető, hogy alkalmas a nagy pontosságú ellenállás mérés a galvánkorrózió kinetikájának jellemzésére villamos kötőelemek esetén.

Bizonyítottam, hogy új mérési összeállítás fejlesztésével (18. ábra), nagy pontosságú Wheatstone-híd alkalmazásával a mérési eredmények alapján jellemezhető a galvánkorrózió kinetikája, mivel a $10^{-4} \Omega$ felbontású ellenállás méréssel a korrózió hatására bekövetkező változás mérhető. A bizonyítást az 1. tézis tartalmazza.

2. **A második hipotézist**, miszerint: Feltehető, hogy a termokamerás hőmérséklet mérés megfelelő eszköze lehet a galvánkorrózió által okozott melegedés meghatározására. Új vizsgálati eljárás hoztam létre (38. ábra), valamint mérésekkel igazoltam, hogy a galvánkorrózió során melegedés jön létre és ez a melegedés termokamerával mérhető, a bizonyítást a 2. tézis tartalmazza.

3. **A harmadik hipotézist**, miszerint: Feltehető, hogy kapcsolat van villamos kötőelemek meghúzási nyomatéka és az átmenetiellenállás, illetve a melegedés között. Ezt a hipotézist mérésekkel bizonyítottam (6.3 fejezet mérési eredményei) melyet a 3. tézis tartalmaz.

4. **A negyedik hipotézist**, miszerint: Feltehető, hogy a tömegveszteség és az ion beoldódás függvény kapcsolattal jellemezhető. Mérési eredményeimmel igazoltam (8. fejezet), hogy ez az Arrhenius–egyenlettel jellemezhető, a bizonyítást a 4. tézis tartalmazza.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Új ellenállás mérés alapú galvánkorróziós vizsgálati eljárást dolgoztam ki (18. ábra), ami alkalmas a gyakorlatban alkalmazott eltérő elektródpotenciálú fémek (réz-alumínium, cink bevonatos acél-réz) villamos kötéseinek galvánkorróziós kinetika meghatározására 3 m/m%. NaCl oldatban [77, 78].

A mérési eredményeim bizonyítják, hogy az általam fejlesztett vizsgálati eljárás alkalmas a kétfémes galván korróziós rendszerek reakció sebességének meghatározására, melynek a gyakorlat szempontjából az élettartam meghatározásához kiinduló eredményt ad.

2. Új termokamerás hőmérséklet mérés alapú laboratóriumi vizsgálati összeállítást hoztam létre, amely alkalmas (20~300°C között) a gyakorlatban alkalmazott eltérő elektródpotenciálú fémek (réz-alumínium, cink bevonatos acélréz) villamos kötéseinek, galvánkorrózió által okozott melegedés meghatározására az ellenállás és az idő függvényében különböző teljesítmény szinteken (23-4000 W) [25, 67, 68, 79, 80].

A vizsgálati összeállítás (a specifikáció szerinti elemekkel és kamera beállítás mellett) az alkalmazott villamos kötőelemek hőmérséklet mérésével alkalmassá teszi a kétfémes rendszer melegedés sebességének meghatározását, ami biztonsági szempontból a gyakorlat számára kiemelt fontosságú.

3. Bizonyítottam, hogy a csavarkötés meghúzási nyomatéka (ami az elfordulási szöggel arányos) fordítottan arányos az átmenetiellenállás nagyságával. Az átmeneti ellenállás változása az idő függvényében a galvánkorrózió sebességével arányos [81, 82].

A mérési eredmények igazolják, a tézist, mivel a terhelés mentes (33. ábra) valamint a 120 órás korróziós igénybevétel után (34.ábra) a réz–cink bevonatos acél villamos kötés esetén az átmenetiellenállás ezzel a galvánkorrózió a meghúzási nyomaték függvényében csökken.


33. ábra Átmenetiellenállás a meghúzás szögelfordulás függvényében



 34. ábra Átmenetiellenállás a meghúzás szögelfordulás függvényében, 120 óra korróziós igénybevétel után

4. Bemutattam az Arrhenius–egyenlet érvényességét a villamos elemek kontakt korróziós folyamatai esetében tömegveszteségen és fémion beoldódáson alapuló korróziós kísérletekkel [83].

Az Arrhenius-egyenletet figyelembe véve a két féle folyamatra a következő összefüggés vehető észre, a (42) összefüggés felhasználásával:

$$k = A \cdot e^{\left(\frac{-E_0}{k_B \cdot T}\right)} \tag{42}$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E_0}{Tk_B}$$
(43)

$$\ln\Delta m \sim -\frac{E_0}{K_B} \cdot \frac{1}{T} \tag{44}$$

ahol az $-\frac{E_0}{K_B}$ hányados arányossági tényező, így:

$$\ln\Delta m \sim \frac{1}{T} \tag{45}$$

A tömegvesztés folyamatáról kijelenthető, hogy a természetes alapú logaritmusa az $\frac{1}{T}$ - vel, az abszolút hőmérséklet reciprokával egyenes arányban csökken.

Az ezzel paralel vizsgált ion beoldódás ugyanezt a képet mutatja. A saruról (csavarról) leváló anyagmennyiség az oldatba kerül (anyagmegmaradás törvénye), ebből következik, hogy a leváló tömeg és az oldatban lévő réz (cink, vas) aránya ugyanúgy változik. Ezt mutatják a mért eredményekből előállított függvények képei és megfogalmazható a tömegvesztés folyamatára felírt összefüggés az alábbi esetre vonatkoztatva:

$$LnMe_{ppm} \sim \frac{1}{T}.$$
 (46)

ahol:

Me_{ppm} a beoldódott fém ion mennyiségét jelenti.

AJÁNLÁSOK

Dolgozatomban megoldást kerestem villamos alkatrészek (kötőelemek) két fémes rendszerének galvánkorrózió általi tönkremenetelét és melegedését vizsgáló eljárások és berendezések kialakítására. A disszertációban bemutatott kétféle módszer alkalmas e kötőelemek korróziósebesség sebességének nyomon követésére, valamint áramköri melegedésének vizsgálatára. Az eddig elért eredmények segítségével következtethetünk az ipari környezetben működő villamos elemek igénybevétel hatására kialakuló fizikai, kémiai paramétereinek változási irányaira. A korróziós vizsgálatok laboratóriumi kivitelezései jellemezték a legfontosabb összefüggések kimutatását az idő és a hőmérséklet függvényében. A melegedés vizsgálat pedig szintén az idő az ellenállás és az áramerősség függvényében mérte meg a korróziósebesség alakulását. Tervem, hogy a kutatások folytatásaként a már elkészült és használatba vett berendezések és mérési eljárások segítségével egy általános élettartam összefüggést állítsak fel a villamos kötőelemek vizsgáltára. Ehhez további kísérletek, mérések szükségesek egy minden szempontból helytálló matematikai összefüggés felállításához, amely segítségével különféle anyagokból készült villamos alkatrészek biztonságos működési időtartama meghatározható. A másik cél egy olyan segédlet kidolgozása műszakiaknak, ami elősegíti a különféle kötőelemek korróziós igénybevételtől (ipari körülmények) függő élettartam és melegedés becslését a lehető legnagyobb pontossággal. Segít a rendszeres hőkamerás diagnosztika mellett biztonságtechnikai szempontok kialakításánál. Ez természetesen még több méréssel és kísérlettel jár, az eddigieknél is több terep diagnosztikával a legkülönfélébb ipari villamossági helyeken. A jövő mégis ez, elérendő célom a legmagasabb fokú biztonságtechnikai szempontok kialakítása a galván korróziós hatásnak kitett villamos kötőelemek területén.

IRODALOMJEGYZÉK

- Zoran C. Petrović: Katastrofe izazvane korozijom. (Catastrophes Caused by Corrosion) Vojnotehnički glasnik (Military technical courier), 64/4. (2016) 1086– 1064. https://doi.org/10.5937/vojtehg64-10388
- [2] <u>https://www.linkedin.com/pulse/5-disasters-caused-corrosion-samuel-</u> <u>cowlishaw?utm_source=share&utm_medium=guest_desktop&utm_campaign=copy</u> (2022. 04. 01.)
- [3] Kovács K.: Korróziós alapfogalmak. Műszaki Könyvkiadó, 1965.
- [4] Peter A. Claisse: *Civil Engineering Materials*. Chapter 31 *Corrosion*.
 Butterworth-Heinemann, 2016. 339–359. <u>https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100275-9.00031-0</u>.
- [5] Schweitzer P. A.: Fundamentals of Metallic Corrosion. Atmospheric and Media Corrosion of Metals. CRC Press, 2006.
- [6] Lin C.-F., Kozen A. C., Noked M., Liu C., Rubloff G. W.: ALD Protection of Li-Metal Anode Surfaces - Quantifying and Preventing Chemical and Electrochemical Corrosion in Organic Solvent. Advanced Materials Interfaces, 3/21. (2016) 1600426. <u>https://doi.org/10.1002/admi.201600426</u>
- [7] Harsimran S., Santosh K., Rakesh K.: Overview of Corrosion and Its Control: A Critical Review. Proceedings on Engineering Sciences, 3/1. (2021) 13–24. <u>https://doi.org/10.24874/PES03.01.002</u>
- [8] Budó Á.: Kísérleti Fizika. II. kötet. Tankönyvkiadó, Budapest, 1971.
- [9] Kutasi I.: Kémia <u>https://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/bitstream/handle/</u>
 (2017. július 2.)
- [10] Komáromi F.: Kémia és Felületvédelem; Kézirat, Budapest, 1984.
- [11] Buchanan R. A., Stansbury E. E.: *Electrochemical Corrosion*. In: *Handbook of Environmental Degradation of Materials* (Szerk.: Myer Kutz). second edition, 2012. 87–125. <u>https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3455-3.00004-3</u>
- [12] Stansbury E. E., Buchanan R. A.: *Fundamentals of Electrochemical Corrosion*. ASM International, 2000. <u>www.asminternational.org</u>

- [13] Mudali U. K., Pujar M. G.: Pitting Corrosion of Austenitic Stainless Steels and Their Weldments. In: Corrosion of Austenitic Stainless Steels (Szerk.: Khatak H. S., Baldev R.). Woodhead Publishing, 2002. 74–105. <u>https://doi.org/10.1533/9780857094018.106</u>
- [14] Holló M.: Korróziós vizsgálatok. Műszaki Könyvkiadó, 1964.
- [15] Kain V.: Corrosion-Resistant Materials. In: S. Banerjee, A. K. Tyagi: Functional Materials. Elsevier, 2012. 507–547. <u>https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385142-</u> 0.00012-X
- [16] Streicher M. A.: General and Intergranular Corrosion of Austenitic Stainless Steels in Acids: Effect of Cations in the Acids and the Influence of Heat Treatment and Grain Size of the Steel. Journal of The Electrochemical Society, 106/3. (1959) 161–180.

https://doi.org/10.1149/1.2427304

- [17] Cowan R .L., Tedmon C. S. Jr.: Intergranular corrosion of Iron-Nickel-Chromium alloys. In: Advances in Corrosion Science and Technology (Szerk.: Fontana M. G., Staehle R. W.). vol. 3, Plenum Press, New York, 1976.
- [18] Magnin T.: Recent Advances for Corrosion Fatigue Mechanism. ISIJ International, 35/3. (1995) 223–233. <u>https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.223</u>
- [19] Kún Cs.: A korrózió, felületvédelem, felületek előkészítése, mázolás, lakkozás.
 NSZFI.
 www.nive.hu/Downloads/Szakkepzesi_dokumentumok/Bemeneti_kompetenciak_
 meresi_ertekelesi_eszkozrendszerenek_kialakitasa/5_0220_024_101030.pdf (2018.
 szeptember 11.)
- [20] Pao P. S.: Mechanisms of Corrosion Fatigue. In: ASM Handbook 19. Fatigue and Fracture. AMS International, 1996. <u>https://doi.org/10.31399/asm.hb.v19.a0002361</u>
- [21] Shipilov S. A.: Mechanisms for corrosion fatigue crack propagation. Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures, 25/3. (2002) 243–259. <u>https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2002.00447.x</u>

- [22] Iverson W. P.: Biological Corrosion. In: Advances in Corrosion Science and Technology. (Szerk.: Fontana M. G., Staehle R. W.) Vol 2. Springer, 1972. Boston, MA. 1–42. <u>https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8255-7</u>
- [23] Edyvean R. G. J., Videla H. A.: *Biological Corrosion*. Interdisciplinary Science Reviews, 16/3. (1991) 267–282. <u>https://doi.org/10.1179/isr.1991.16.3.267</u>
- [24] Stanaszek-Tomal E., Fiertak M.: Biological Corrosion in the Sewage System and the Sewage Treatment Plant. Procedia Engineering, 161. (2016) 116–120. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.507
- [25] Haraszti F.: Termográfiai vizsgálat alkalmazása a villamosiparban, Acta Materialia Transylvanica 1/2. (2018) 77–80. <u>https://doi.org/10.2478/amt-2018-0025</u>; másod közlés angol nyelven: Thermographic Inspection in the Electric Industry, <u>https://doi.org/10.2478/amt-2018-0026</u>
- [26] Zhang X. G.: Galvanic Corrosion. In: Uhlih's Corrosion Handbook, 3. kiadás Electrochemical Society, Inc.Wiley (2011) ISBN 978-0-470-08032-0
- [27] Oldfield J. W.: Electrochemical Theory of Galvanic Corrosion. In: Galvanic corrosion. (Szerk.: Harvey P. Hack) (STP978-EB) (1988) ASTM Committee ISBN 0-8031-0981-4
- [28] Song G.-L.: Potential and current distributions of one-dimensional galvanic corrosion systems. Corrosion Science, 52/2. (2010) 455–480. <u>https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.10.003</u>
- [29] Jia, J. X., Song G., Atrens A.: Influence of geometry on galvanic corrosion of AZ91D coupled to steel. Corrosion Science, 48/8. (2006) 2133–2153. <u>https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.08.013</u>
- [30] Oltra R., Vuillemin B.: 3 Probing and Modelling of Galvanic Coupling Phenomena in Localized Corrosion. In: Progress in Corrosion Science and Engineering II (Szerk.: Su-Il Pyun, Jong-Won Lee), Springer New York, NY, 2011. 243–296. <u>https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5578-4_3</u>
- [31] Webb E. G., Suter T., Alkire R. C.: *Microelectrochemical Measurements of the Dissolution of Single MnS Inclusions, and the Prediction of the Critical Conditions*

for Pit Initiation on Stainless Steel. Journal of The Electrochemical Society, 148/5. (2001) B186. <u>https://doi.org/10.1149/1.1360205</u>

- [32] Mypati S., Khazaeli A., Barz D. P. J.: A novel rechargeable zinc–copper battery without a separator. Journal of Energy Storage, 42. (2021) 103109. <u>https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103109</u>
- [33] Zeng, Juqin, et al.: Coupled Copper-Zinc Catalysts for Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide. ChemSusChem, 13/16. (2020) 4128–4139. https://doi.org/10.1002/cssc.202000971
- [34] Abraham O. F., et al.: Corrosion behavior of Aluminium in alkaline-water hyacinth plant extract functionalized solution: An electrochemical and weight loss study. Chemical Data Collections, 43. (2022) 100983, ISSN 2405-8300, https://doi.org/10.1016/j.cdc.2022.100983.
- [35] Datta M.: Anodic dissolution of metals at high rates. IBM Journal of Research and Development, 37/2. (1993) 207–226. <u>https://doi.org/10.1147/rd.372.0207</u>
- [36] Abbott A. P., Frisch G., Hartley J., Karim W. O., Ryder K. S.: Anodic dissolution of metals in ionic liquids. Progress in Natural Science: Materials International, 25/6. (2015) 595–602. <u>https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2015.11.005</u>
- [37] Zhang J., Ebrahimi N., Lai D.: Galvanic Corrosion Risk of Using Galvanized A325 Bolts in Corrosion-Resistant Steel Bridges, Journal of Bridge Engineering, 24/6.
 (2019) 06019001.
- [38] Speck F. D., Zagalskaya A., Alexandrov V., Cherevko S.: *Periodicity in the Electrochemical Dissolution of Transition Metals*. Angewandte Chemie International Edition, 60/24. (2021) 13343–13349.
 https://doi.org/10.1002/anie.202100337
- [39] Jones D. R. H.: Corrosion of Central Heating Systems. In: Failure Analysis Case Studies II, (2001) 285–300. <u>https://doi.org/10.1016/b978-0-08-043959-4.50029-8</u>
- [40] Sulzer Pumps: *Materials and Corrosion*. In: Centrifugal Pump Handbook, 3.
 kiadás, 2010. 227–250. <u>https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8612-9.00008-5</u>
- [41] Sagüés A. A.: Corrosion Measurement Techniques for Steel in Concrete, The NACE Annual Conference and Corrosion Show, Corrosion 93, (1993) paper 353.

- [42] Popov B. N.: Basics of Corrosion Measurements. In: Corrosion Engineering. Principles and Solved Problems. Elsevier, 2015. 181–246. <u>https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62722-3.00005-7</u>
- [43] Chasse K. R., Singh P. M.: Corrosion Study of Super Ferritic Stainless Steel UNS S44660 (26Cr-3Ni-3Mo) and Several Other Stainless Steel Grades (UNS S31603, S32101, and S32205) in Caustic Solution Containing Sodium Sulfide. Metallurgical and Materials Transactions A, 44. (2013) 5039–5053. https://doi.org/10.1007/s11661-013-1878-5
- [44] During E. D. D.: Corrosion Atlas: A Collection of Illustrated Case Histories. 3. kiadás Elsevier, 2018.
- [45] Iribarren J. I., Liesa F., Alemán C., Armelin E.: Corrosion rate evaluation by gravimetric and electrochemical techniques applied to the metallic reinforcing structures of a historic building. Journal of Cultural Heritage, 27. (2017) 153–163. https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.04.009
- [46] Loto R. T., Loto C., Ohwofasa O.: Gravimetric and data analysis of the corrosion resistance behaviour and inhibition of C26000 brass in dilute HNO₃ solution. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1117 (2021) 012002
 <u>https://doi.org/10.1088/1757-899X/1117/1/012002</u>
- [47] Anaman S. Y. et al.: A comprehensive assessment of the galvanic corrosion behavior of an electrically assisted pressure joint of dissimilar stainless steel alloys under uniaxial tensile stress. Journal of Materials Research and Technology, 19.
 (2022) 3110-3129. <u>https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.089</u>
- [48] Kingston R. H.: Blackbody Radiation, Image Plane Intensity, and Units. In: Optics and Photonics, Optical Sources, Detectors, and Systems. Academic Press, 1995. 1– 32, https://doi.org/10.1016/B978-012408655-5/50002-0.
- [49] Xu M. et al.: Research on attitude measurement compensation technology under the influence of solar infrared radiation interference. Infrared Physics & Technology, 123. (2022) 104142. <u>https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104142</u>
- [50] Heinz D., Halek B., Krešák J., Peterka P., Fedorko G., Molnár V.; *Methodology of measurement of steel ropes by infrared technology*. Engineering Failure Analysis, 133 (2022) 105978. <u>https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105978</u>

- [51] Professzionális Ipari Méréstechnika. <u>https://www.pim-kft.hu</u> (2017.02.15.)
- [52] Issa Y., Watts D. C., Boyd D., Price R. B.: Effect of curing light emission spectrum on the nanohardness and elastic modulus of two bulk-fill resin composites. Dental Materials, 32/4. (2016) 535–550. <u>https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.12.017</u>
- [53] Nagy I., Baksai G., Sólyomvári K.: Műszaki Diagnosztika II. Delta-3N Kft. 2007.
- [54] Rachne E.: *Termográfia elmélet és gyakorlati méréstechnika*. Invest-Marketing Bt., Budapest, 2018.
- [55] MSZ 4380-86 Természetes légköri viszonyok közötti korrózió
- [56] ISO 8044:2020 Corrosion of metals and alloys
- [57] EN ISO 7441:2015 Corrosion of metals and alloys
- [58] Gadelmawla E.S. et al.: *Roughness parameters*. J. Materials Processing Technology, 123/1. (2002) 133–145. <u>https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2</u>
- [59] Xu C., Gao W.: Pilling-Bedworth ratio for oxidation of alloys. Materials Research Innovations, 3/4. (2000) 231–235. <u>https://doi.org/10.1007/s100190050008</u>
- [60] Szabó S.: Metal corrosion and its relation to other fields of science. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, 4/1. (2015) 35–48.
 <u>https://doi.org/10.17675/2305-6894-2015-4-1-035-048</u>
- [61] Ebrahimi N., Zhang J., Baldock B., Lai D.: Galvanic Corrosion Risk Assessment of Bolt Materials in Contact with ASTM A1010 Steel Bridges, CORROSION 2018, Phoenix, Arizona, USA, April 2018.
- [62] British Standard Institute: Additional Corrosion of Zinc and Zinc Based Alloys Resulting From Contact With Other Metals or Carbon, (1979) 6484.
- [63] ASTM G82-98(2014): Standard Guide for Development and Use of a Galvanic Series for Predicting Galvanic Corrosion Performance, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2014) <u>www.astm.org</u>.
- [64] Hewitt C., Humphries A., Twomey E.: Opposites Attract: A Primer On Galvanic Corrosion of Dissimilar Metals. Modern Steel Construction, July 2019.

- [65] Vargel Ch.: Corrosion of Aluminium. (Second Edition), May 6, (2020) Elsevier, eBook ISBN: 9780080999272.
- [66] Xue H., Xu N., Zhang C.: Effect of stainless steel on corrosion behavior of copper in a copper-bearing intrauterine device. Advances in Contraception14/2. (1998) 153–160. https://doi.org/10.1023/a:1006594818470.
- [67] Haraszti F.: Hőkamera alkalmazása kontaktkorrózió vizsgálatára. Műszaki Tudományos Közlemények, 11. (2019) 77–80. <u>https://doi.org/10.33895/mtk-</u> 2019.11.15; másod közlés angol nyelven: Thermographic Camera Application for Galvanic corrosion detection. <u>https://doi.org/10.33894/mtk-2019.11.15</u>
- [68] Haraszti F.: A termográfia méréstechnikai nehézségeinek elemzése. Műszaki Tudományos Közlemények, 13. (2020) 68–71. <u>https://doi.org/10.33895/mtk-</u> <u>2020.13.10</u> másod közlés angol nyelven: A Review of Difficulties in the Measuring Technologies of Thermography <u>https://doi.org/10.33894/mtk-2020.13.10</u>
- [69] Malakhov D. V.: Pilling-Bedworth Ratio for Homogeneous Alloys: A Physically Sound Practical Generalization. Metallurgical and Materials Transactions B, 54/3.
 (2023) 1174–1180. <u>https://doi.org/10.1007/s11663-023-02752-1</u>
- [70] Wei X., Dong C., Yi P., Xu A., Chen Z., Li X.: *Electrochemical measurements and atomistic simulations of Cl⁻-induced passivity breakdown on a Cu₂O film. Corrosion Science*, 136. (2018). 119–128. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.02.057
- [71] El Warraky A. A., El Shayeb H. A. E., Sherif E. M.: *Pitting corrosion of copper in chloride solutions*. Anti-Corrosion Methods and Materials, 51/1. (2004) 52–61.
 <u>https://doi.org/10.1108/00035590410512735</u>
- [72] Abohalkuma T., Telegdi J.: Corrosion protection of carbon steel by special phosphonic acid nano-layers. Materials and Corrosion, 66/12. (2015) 1382–1390. https://doi.org/10.1002/maco.201508304
- [73] Telegdi J., Abohalkuma T.: *Influence of the nanolayer' post-treatment on the anticorrosion activity*. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, 7/3.
 (2018) 352–365. <u>https://doi.org/10.17675/2305-6894-2018-7-3-6</u>

- [74] Surface texture (surface roughness, waviness, and lay). New York: American Society of Mechanical Engineers. 2020.
- [75] Gadelmawla E. S., Koura M. M., Maksoud T. M. A. et al.: *Roughness parameters*. Journal of Materials Processing Technology, 123/1. (2002) 133–145. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2
- [76] Fan X. L., Chen Y. X., Zhang J. X. et al: Galvanic Corrosion Behavior of Copper– Drawn Steel for Grounding Grids in the Acidic Red Soil Simulated Solution, Acta Metallurgica Sinica (English Lett.), 33. (2020) 1571–1582.
 <u>https://doi.org/10.1007/s40195-020-01071-7</u>
- [77] Haraszti F.: Acél próbatestek korróziós vizsgálata. Műszaki Tudományos
 Közlemények 5. (2016) 189–192. <u>https://doi.org/10.33895/mtk-2016.05.38</u>
- [78] Haraszti F.: Korrózió vizsgálatok alapjai. Műszaki Tudományos Közlemények 5.
 (2016) 185–188. <u>https://doi.org/10.33895/mtk-2016.05.37</u>
- [79] Haraszti F., Öszi, Arnold: *Hőkamera alkalmazása kontaktkorrózió vizsgálatára pilóta nélküli repülőgéppel.* Bánki Közlemények, 2/1. (2019) 11–15.
- [80] Haraszti F.: Villamos Kötések Vizsgálata Hőkamerával. Műszaki Tudományos Közlemények, 7. (2017) 179–182. <u>https://doi.org/10.33895/mtk-2017.07.37</u>
- [81] Tóth, L., Haraszti F., Kovács T.: A felületi érdesség hatása a hegesztett rozsdamentes acél korróziós ellenállására. Acta Materialia Transylvanica, 1/1.
 (2018) 53–56. <u>https://doi.org/10.2478/amt-2018-0017</u> másod közlés angol nyelven: Surface Roughness Effect in the Case of Welded Stainless Steel Corrosion Resistance. <u>https://doi.org/10.2478/amt-2018-0018</u>
- [82] Haraszti F. et al. : Plastic deformation effect of the corrosion resistance in case of austenitic stainless steel. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 175. (2017) 012048. <u>https://doi.org/10.1088/1757-899X/175/1/012048</u>
- [83] Haraszti F. et al.: Chemical background of contact corrosion between copper and galvanized steel screws. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, 11/4. (2022) 1418–1434. <u>https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-4-1</u>

További tudományos közlemények (opcionális)

- [84] Tóth L., Haraszti F., Kovács T.: *Heat treatment effect for stainless steel corrosion resistance*. European Journal of Materials Science and Engineering, 3/2. (2018) 98–102.
- [85] Haraszti F.: Acél próbatestek korróziós vizsgálata. Corrosion Investigation of Steel Samples. Műszaki Tudományos Közlemények, 5. (2016) 189–192. <u>https://doi.org/10.33895/mtk-2016.05.38</u>

7 RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉK

- 1. Me-Fém (Metallum)
- 2. M anyagmennyiség (mol)
- 3. n oldódó fémion vegyértéke
- 4. ε_K a nemesebb fém elektródpotenciálja (hidrogénelektróddal szemben)
- 5. ɛ_A oldatba menő fém elektródpotenciálja (hidrogénelektróddal szemben)
- 6. R_k külső ellenállás
- 7. R_b belső ellenállás
- 8. Q fajlagos ellenállás
- 9. l vezető hossza
- 10. A vezető keresztmetszete
- 11. K korrózió sebesség
- 12. Q0 az eredeti fajlagos ellenállás
- 13. Q1- megváltozott ellenállás
- 14. Ksz korrózió szakítószilárdság szerinti mértéke
- 15. σ_0 vizsgált fém eredeti szakítószilárdsága
- 16. σ_1 vizsgált fém korrózióval terhelt szakítószilárdsága
- 17. Kny-korrózió nyúláscsökkenés szerinti mértéke
- 18. δ_0 fém eredeti nyúláscsökkenése
- 19. δ_1 fém korrózióval terhelt nyúláscsökkenése
- 20. ε emissziós tényező
- 21. ρ reflexiós tényező
- 22. r transzmissziós tényező
- 23. E(f) fekete test emissziós képessége
- 24. σ Stefan-Boltzmann féle állandó: 5,67 10-8 [J/m² K⁴];
- 25. T hőmérséklet [K]
- 26. Rq a felszíni egyenetlenséget statisztikai módszerrel írja le (a négyzetek átlagának gyöke).
- 27. Ra Átlagos érdesség; A felület profilján mért kiemelkedések és bemélyedések számtani átlaga nm-ben megadva
- Rmax Maximális egyenetlenség-magasság; A legmagasabb és a legmélyebb csúcs közötti függőleges különbség a teljes mérési szakaszon
- 29. ρ fajlagos ellenállás [Ωm]
- 30. α hőfoktényező [1/°C]
- 31. t hőmérséklet [°C]
- 32. R villamos ellenállás [Ω]
- 33. $R_{20} 20$ °C-on vett ellenállás [Ω]
- 34. $\alpha_{20} 20$ °C-on vett hőfoktényező[1/°C]
- 35. P a villamos teljesítmény [W]
- 36. d átmérő [m, mm]
- 37. J– az áramsűrűség jele
- 38. I áramerősség, [A]
- 39. A keresztmetszet [m²]
- 40. I [A] az elektromos áramerősség
- 41. U [V] a feszültség
- 42. R [Ω] ellenállás

- 43. V_{fémoxid} a fém-oxid elemi cellájának térfogata
- 44. V_{fém} a fém elemi cellájának térfogata
- 45. n fématomok száma az oxidban
- 46. ρ fém sűrűsége
- 47. A atomtömeg
- 48. k sebességállandó
- 49. A preexponenciális tényező
- 50. E₀-aktiválási energia
- 51. Me_{ppm}- a beoldódott fém ion mennyisége

8 ÁBRA JEGYZÉK

- 1. ábra A kutatás folyamata (szerző)
- 2. ábra Kémiai korrózió [3]
- 3. ábra Vegyes korrózió (szerző)
- 4. ábra Hidrogénfejlődés folyamata [9]
- 5. ábra Elektrokémiai korrózió (szerző)
- 6. ábra Cr-Ni acélok korróziós érzékenységi tartománya [14]
- 7. ábra Normál potenciálsor (szerző)
- 8. ábra Cinkből és rézből álló korróziós galvánelem működésének elve [10]
- 9. ábra Villamos kötőelemek (szerző)
- 10. ábra Különböző fémek galvánkorróziós károsodásai (szerző)
- 11. ábra Villamos kapcsolószekrény (szerző)
- 12. ábra Anódos folyamat a vas felületén (szerző)
- 13. ábra Hegesztett rozsdamentes acél 6%-os Vas(III)-kloridos maratás után(szerző)
- 14. ábra Termikus detektorok működési sémája [48]
- 15. ábra Hőkamera kiértékelő szoftver felülete [50]
- 16. ábra Behúzótekercs hőképe (szerző)
- 17. ábra Különböző fémek emissziójának hőmérsékletfüggése [51]
- 18. ábra Módosított vizsgáló berendezés (szerző)
- 19. ábra Ráforrasztásos kábelsaru (szerző)
- 20. ábra Hatlapfejű anya (szerző)
- 21. ábra Hatlapfejű csavar (szerző)
- 22. ábra Azonos katód-anód arányú (acél-réz) kötőelem vizsgálat során mért ellenállás az idő függvényében
- 23. ábra Különböző (5:1) katód-anód arányú (acél-réz) kötőelem vizsgálat során mért ellenállása az idő függvényében
- 24. ábra Kábelcsatlakozó (szerző)
- 25. ábra Különböző (5:1) katód-anód arányú (alumínium-réz) kötőelem vizsgálat során mért ellenállás az idő függvényében
- 26. ábra SEM vizsgálat eredménye, a próbatest felülete a korróziós vizsgálat után jellemző lyukkorrózió

- 27. ábra A munkadarab kezdeti ellenállás mérése (szerző)
- 28. ábra Munkadarab igénybevétel utáni ellenállása mérése (szerző)
- 29. ábra A csavarfej kapcsolódó eredeti felszínének AFM-es képe
- ábra A csavarfej igénybevétel utáni felszíne (NaCl oldatba merülés után AFMmel mérve)
- 31. ábra Rézsaru eredeti felszínének AFM-es képe
- 32. ábra Rézsaru igénybevétel utáni felszíne (NaCl oldatba merülés után AFMmel mérve)
- 33. ábra Atmenetiellenállás az anya szögelfordulásának függvényében
- 34. ábra Átmenetiellenállás a meghúzás szögelfordulás függvényében, 120 óra korróziós igénybevétel után
- 35. ábra Ellenállás a hőmérséklet függvényében [3]
- 36. ábra Hőkamerás mérés elvi vázlat (szerző)
- ábra Ellenállás a hőmérséklet függvényében azonos katód-anód arányú (acélréz) kötőelem
- 38. ábra A termokamerás mérés elvi összeállítási rajza (mérőegységekkel) (szerző)
- 39. ábra Hőkamera (1. függelék)
- 40. ábra A hőmérséklet az ellenállás függvényében azonos acél-réz katód-anód arány esetén
- 41. ábra A hőmérséklet az ellenállás függvényében különböző katód anód arányú acél-réz kötőelemeknél mérve
- 42. ábra A hőmérséklet az ellenállás függvényében különbőző katód-anód arányú alumínium-réz anyagpárnál
- 43. ábra A hőmérséklet az idő függvényében acél-réz anyagpár esetén
- 44. ábra A hőmérséklet az idő függvényében (acél-réz)
- 45. ábra A hőmérséklet az idő függvényében
- 46. ábra Hőmérséklet a kötés nyomatékkal arányos szögelfordulás függvényében
- 47. ábra Hőmérséklet a kötés nyomatékkal arányos szögelfordulás függvényében
- 48. ábra A hőmérséklet az idő függvényében (acél-réz)
- 49. ábra. Kötés hőmérséklet 44,3 °C
- 50. ábra Kötés hőmérséklet 125 °C
- 51. ábra Az oxid szerkezete a Pilling-Bedworth-arány szerint [56]
- 52. ábra Tömegveszteség-értékek a hőmérséklet függvényében

- 53. ábra Tömegveszteség-értékek a hőmérséklet függvényében
- 54. ábra A tömegveszteség-értékek a hőmérséklet függvényében
- 55. ábra A tömegveszteségek logaritmusa
- 56. ábra Kioldódott ionok a hőmérséklet függvényében
- 57. ábra Kioldódott ionok a hőmérséklet függvényében
- 58. ábra Kioldódott ionok a hőmérséklet függvényében
- 59. ábra A rézionbeoldódás a hőmérséklet függvényében
- 60. ábra A Fe és Zn ion beoldódás a hőmérséklet függvényében
- 61. ábra Ionok (Cu, Zn, Fe) beoldódása

9 TÁBLÁZAT JEGYZÉK

- 1. táblázat Anyagok fizikai jellemzői
- 2. táblázat Sugárzás kibocsátó képesség
- 3. táblázat A méréssorozathoz felhasznált anyagok
- 4. táblázat Mérési eredmények (acél-réz)
- 5. táblázat Mérési eredmények (acél-réz)
- 6. táblázat A felhasznált anyagok
- 7. táblázat Mérési eredmények
- 8. táblázat A felületi érdesség értékek
- 9. táblázat Rézsaru felületi érdessége
- 10. táblázat Az átmenetiellenállás a hőmérséklet függvényében
- 11. táblázat A hőmérséklet az ellenállás függvényében
- 12. táblázat A hőmérséklet az ellenállás függvényében
- 13. táblázat A hőmérséklet az ellenállás függvényében Al-Cu anyagpárnál
- 14. táblázat A hőmérséklet az idő függvényében acél-réz anyagpárnál
- 15. táblázat A hőmérséklet az idő függvényében (acél-réz)
- 16. táblázat A hőmérséklet az idő függvényében
- 17. táblázat Hőmérséklet az idő függvényében (acél-réz)
- 18. táblázat A vizsgált fémek főbb anyagállandói
- 19. táblázat A különböző fémoxidok Pilling-Bedworth-aránya [69]
- 20. táblázat Tömegveszteség 3%-os NaCl oldatban
- 21. táblázat Tömegveszteség az Arrhenius egyenlet alapján
- 22. táblázat Fémion koncentráció 23 oC-on
- 23. táblázat Fémion koncentráció 40 oC
- 24. táblázat Fémion koncentráció 60 oC
- 25. táblázat Fémion koncentráció 80 oC
- 26. táblázat Réz beoldódás
- 27. táblázat Rézion beoldódás az Arrhenius-egyenlet alapján
- 28. táblázat Réz beoldódás
- 29. táblázat A csavarból beoldódott ionok mennyisége az Arrhenius egyenlet alapján
- 30. táblázat Az ion beoldódás a hőmérséklet függvényében

- 31. táblázat Az ion beoldódás a hőmérséklet függvényében az Arrheniusegyenlet alapján
- 32. táblázat A minták SEM-felvételei a korróziós kísérletek előtt
- 33. táblázat A különböző hőmérsékleten vizsgált minták SEM-felvételei
- 34. táblázat A fémfelületek (külön-külön alkalmazott) AFM-felvételei a korrozív elektrolitba való mártás előtt és után.
- 35. táblázat A fémfelületek AFM-felvételei (szoros érintkezésben alkalmazva), miután maró elektrolitba mártottuk őket

FÜGGELÉK

1. Hőkamera



- Tipus: Bosch GTC 400 C Professional
- Gyári szám:

_

-	Measuring	- Thermal image
	application	- Inciniai iniage

- Measurement range $-10 \degree C$ to $+400 \degree C$
 - Measuring- \pm 3.0 $^{\circ}C^{*}$ (*plus use-accuracy of IRdependent deviation)
- Data transfer MicroUSB, Wi-Fi
- Thermal sensitivity (NETD) - <50 mK
- Resolution
 Size of IR sensor
 160x120
- Number of measuring points - 19,200

-	Field of view (FOV)	-	53x43 °
-	Power supply and runtime	-	4 x 1.5 V LR6 (AA) 1 x GBA 12V 1 x GBA 10.8V
-	File format of image	-	jpg
-	Dust and splash protection	-	IP 53
-	Weight	-	0.54 kg
-	Operating temperature	-	-10 – 45 °C
-	Storage temperature	-	-20 – 70 °C
-	Focus distance	-	0.3 m

2. Felszíni vizsgálatok, atomi erőmikroszkóp



- Típus: NanoScope III (Digital Instrument)

Felépítése:



3. Az alkalmazott pásztázó elektron mikroszkóp (SEM)

SEM: a nagyon alacsony hullámhosszú, fókuszált elektronsugár letapogatja a felületet, és az elektronok kinetikus energiájának a szilárd felület molekuláival való kölcsönhatásából jeleket állít elő.

A keletkező másodlagos (és visszaszórt) elektronok képet alkotnak a szilárd felületről, és lehetővé teszik a felületi morfológia láthatóvá tételét a korróziós vizsgálatok kezdete előtt és vége után néhány tíz nm és néhány száz nm tartományban. A fémfelületek arany bevonatúak voltak.

- Típus: JEOL, USA

- Helyszín: Eötvös Loránd Kutató Hálózat laboratóriuma



Pásztázó elektron mikroszkóp

	Eredeti	23 °C/NaCl	40 °C/NaCl	60 °C/NaCl	80 °C/NaCl
Réz saru 1.	500pm	50µm	500m	500µm	<u>509µт</u>
Réz saru 2.	<u>500µm</u>	500µm	<u>50µm</u>	500um	<u>соорт</u>

4. A vizsgált felszínek sztereomikroszkópos felvételei

	Eredeti	23 °C/NaCl	40 °C/NaCl	60 °C/NaCl	80 °C/NaCl
Anyacsavar 1.	500µm	500µm	<u>500µm</u>	<u>500m</u>	500µm
	Eredeti	23 oC/NaCl	40 oC/NaCl	60 oC/NaCl	80 oC/NaCl
Anyacsavar 2.	<u>500µт</u>	500µm	500pm	500µm	500µm

	Eredeti	23 °C/NaCl	40 °C/NaCl	60 °C/NaCl	80 °C/NaCl
Csavarfej 1.	SOurrest Street		SOper-	50µm	
	Eredeti	23 °C/NaCl	40 °C/NaCl	60 °C/NaCl	80 °C/NaCl
Csavarfej 2.	500m		<u>500m</u>		

	23 °C/NaCl	40 °C/NaCl	60 °C/NaCl	80 °C/NaCl
Eredeti Δm minták				
Igénybevétel utáni Δm minták				

5. A tömegveszteség és az ion beoldódás mérés mintái



6. Réz saru – bevonatos acélcsavar minta hőképe





KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönet Prof. Dr. Kovács Tibor tanszékvezető úrnak, aki elindított a kutatómunkában és témavezetőként a téma kidolgozásához nyújtott segítséget. A disszertáció elkészítése legnagyobb igyekezetem ellenére sem sikerülhetett volna közvetlen kolléganők (anyagtudomány), kollégák (mérnöki tudományok), szerzőtársak önzetlen segítsége nélkül. Naprakész szakmai tudásuk, kutatástechnikai javaslataik és ötleteik, más nézőpontból történő probléma megoldásaik mindig tovább lendítettek egyegy nehezebb rész elkészítésénél. Külön köszönet jár a H6-os Hév vonal műszaki dolgozóinak, a sajószögedi gyorsindítású gázerőmű barátságos és nagy szakmai tudással rendelkező munkatársainak, akikhez Dr. Horváth Tamás révén jutottam el. Szeretném megköszönni Prof. Dr. Pokorádi László intézetigazgató úr önzetlen támogatását méréstechnikai kérdések megoldásában. Kiemelt köszönettel tartozom Őri István tanár úr kollegiális és baráti segítségéért és matematikai útmutatásaiért. Nem feledkezhetem meg hálámat kifejezni Prof. Dr. Telegdi Judit kutató asszonynak, akinek kimeríthetetlen emberi és szakmai segítségnyújtása nélkül e disszertáció soha nem készülhetett volna el. Nagy segítségemre volt Prof. Dr. Bitay Enikő, aki a témavezetésen kívül konferencia kiadványaimban és előadásaimban állt tapasztalatával rendelkezésemre. Végül és természetesen nem utolsó sorban külön köszönetet mondok családomnak, akik mindenben támogattak és mellettem álltak az évekig tartó kutatás folyamán.