



KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Jūrų technikos fakultetas

Statybos katedra

TOMAS ROLLERIS

METALO KOROZIJOS IR SENĖJIMO JŪRINĖJE APLINKOJE TYRIMAS

RESEARCH OF METAL CORROSION AND AGING IN MARINE ENVIRONMENT

Magistro baigiamasis darbas

Uosto statinių studijų programa

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Technologijos mokslų studijų sritis

Vadovas: Lekt. dr. D. Narmontas

Klaipėda, 2011

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Jūrų technikos fakultetas

Statybos katedra

TVIRTINU_____

Katedros vedėjas

Lekt. Dr. D. Narmontas

METALO KOROZIJOS IR SENĖJIMO JŪRINĖJE APLINKOJE TYRIMAS

Magistro baigiamasis darbas

Autorius **TMVSI-09 gr. magistrantas**
T. ROLLERIS

(parašas, data)

Vadovas **Lekt. dr. D. NARMONTAS**

(parašas, data)

Recenzentas **Lekt. Dr. A. ŠTUOPYS**

(parašas, data)

Recenzentas **Doc. Dr. A. KRUTINIS**

(parašas, data)

CD pateiktas **Lekt. Dr. D. NARMONTAS**

(parašas, data)

Klaipėda, 2011

1 priedas
MAGISTRO BAIGIAMŲJŲ DARBŲ LYDRAŠČIO FORMA

Tomas Rolleris

(magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė)

Metalo korozijos ir senėjimo jūrinėje aplinkoje tyrimas

(magistro baigiamojo darbo pavadinimas lietuvių kalba)

Patvirtinu, kad magistro baigiamasis darbas parašytas savarankiškai, nepažeidžiant kitiems asmenims priklausančių autorių teisių, visas baigiamasis magistro darbas ar jo dalis nebuvo panaudotas Klaipėdos universitete ir kitose aukštosiose mokyklose.

Tomas Rolleris

(magistro baigiamojo darbo autoriaus ir parašas)

Sutinku, kad magistro baigiamasis darbas būtų naudojamas neatlygintinai 5 m. Klaipėdos universiteto studijų procese.

Tomas Rolleris

(magistro baigiamojo darbo autoriaus ir parašas)

Pildo magistro baigiamojo darbo vadovas

Magistro baigiamąjį darbą ginti

leidžiu

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

2011- -

(data)

lekt. dr. Darius Narmontas.....

(magistro baigiamojo darbo vadovo vardas, pavardė ir parašas)

Pildo katedros, kuruojančios studijų programą, administratorius (sekretorius)

Baigiamasis darbas įregistruotas Statybos katedroje

2011- -

(data)

Svetlana Šlisers.....

(katedros sekretorės vardas, pavardė ir parašas)

Pildo katedros, kuruojančios studijų programą, vedėjas

Magistro baigiamąjį darbą ginti

leidžiu

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

2011- -

(data)

dr. Darius Narmontas.....

(katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)

Recenzentais skiriu

doc. dr. Antaną Krutinį

lekt. dr. Arminą Štuopį

(recenzentų vardas, pavardė)

2011- -

(data)

dr. Darius Narmontas.....

(katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS
JŪRŲ TECHNIKOS FAKULTETAS
STATYBOS KATEDRA

TMVSI-09 grupės magistranto Tomo Rollerio
MOKSLINIO – TIRIAMOJO DARBO PLANAS

Darbo tema: Metalų korozijos ir senėjimo jūrinėje aplinkoje tyrimas

Vadovas: Lekt. Dr. Darius Narmontas

I semestras:

1. Literatūros apžvalga:
 - 1.1. Metalų korozija
 - 1.2. Metalų apsauga nuo korozijos
 - 1.3. Metalų tyrimų ir bandymų metodai
2. Darbo tikslo ir uždavinių formulavimas

II semestras:

1. Eksperimentų plano sudarymas
2. Bandinių paruošimas:
 - 2.1. Šventosios molo varžtas
 - 2.2. Gelžbetoninių durų armatūros tinklas
 - 2.3. Artilerijos aikštelių pakloto armatūros strypai
 - 2.4. Šiuolaikinis varžtas
3. Metalų paviršiaus būklės vizualinė analizė

III semestras:

1. Metodikos sudarymas ir eksperimentų atlikimas:
 - 1.1. Metalų tyrimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu
 - 1.2. Metalų kietumo bandymas
 - 1.3. Metalų tempimo bandymas
 - 1.4. Metalų rentgenografinė analizė
 - 1.5. Metalų optinė emisinė analizė

IV semestras:

1. Tyrimų rezultatų apdorojimas
2. Išvadų formulavimas
3. Baigiamojo darbo apiforminimas

Klaipėdos universitetas
Jūrų technikos fakultetas
Statybos katedra

Uosto statinių studijų programos baigiamasis magistro darbas

METALO KOROZIJOS IR SENĖJIMO JŪRINĖJE APLINKOJE TYRIMAS

Autorius: T. Rolleris

Vadovas: Lekt. dr. D. Narmontas

Kalba – lietuvių

ANOTACIJA

Magistrantūros baigiamajame darbe atlikta Lietuvos ir užsienio literatūros apžvalga apie metalų koroziją, apsaugą nuo korozijos, metalų tyrimų ir bandymų metodus. Ištirta metalo korozija ir senėjimas jūrinėje aplinkoje: nustatytas metalų korozijos tipas bei korozijos greitis jūrinėje aplinkoje, ištirta korozijos produktų cheminė sudėtis, nustatytas metalo kietumas, nustatytos metalų takumo ir stiprumo ribos bei santykinės deformacijos, identifikuoti korozijos produktai, nustatyta metalų cheminė sudėtis.

Baigiamąjį darbą sudaro įvadas, teorinė dalis, tiriamoji dalis, išvados, literatūros sąrašas (25 šaltiniai).

Darbo apimtis: 81 puslapis tekstinės dalies be priedų, 83 paveikslai, 22 lentelės.

Raktiniai žodžiai: metalas, korozija, senėjimas, jūrinė aplinka, plienas, korozijos greitis.

Klaipėda University
Faculty of Marine Engineering
Building Department

Harbor works study program master thesis

RESEARCH OF METAL CORROSION AND AGING IN MARINE ENVIRONMENT

Author: T. Rolleris

Academic supervisor: Lekt. dr. D. Narmontas

Thesis language – Lithuanian

ANNOTATION

In the master thesis was performed Lithuanian and foreign literature review about metal corrosion, corrosion protection, analysis and test methods of metals. Metal corrosion and aging in marine environment was investigated: the type of metal corrosion was identified and corrosion rate in marine environment, chemical analysis of corrosion products was performed, hardness of metal was tested, yield strength, tensile strength and strain of metal were tested, corrosion products were identified, chemical analysis of metal was performed.

Master thesis consists of introduction, theoretical part, testing part, conclusions, literature list (25 sources).

Thesis volume: 81 pages text without annexes, 83 illustrations, 22 tables.

Keywords: metal, corrosion, aging, marine environment, steel, corrosion rate.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Mikroskopo skiriamoji geba naudojant skirtingus darbinius režimus	38
2 lentelė. EDS detektoriaus skiriamoji geba ir kitos savybės	38
3 lentelė. Korodavusio paviršiaus cheminės mikroanalizės rezultatai	56
4 lentelė. Korozijos židinio duobutėje cheminės mikroanalizės rezultatai	65
5 lentelė. Cheminės mikroanalizės rezultatų palyginimas	67
6 lentelė. Kietumo bandymo rezultatai	67
7 lentelė. Kietumo bandymo rezultatų statistiniai duomenys	67
8 lentelė. Pradiniai bandinių duomenys (Šventosios molo varžtas)	68
9 lentelė. Tempimo bandymų rezultatai (Šventosios molo varžtas)	68
10 lentelė. Tempimo bandymo rezultatų statistiniai duomenys (Šventosios molo varžtas)	69
11 lentelė. Pradiniai bandinių duomenys (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 1)	69
12 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 1)	70
13 lentelė. Tempimo bandymo rezultatų statistiniai duomenys (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 1)	70
14 lentelė. Pradiniai bandinių duomenys (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 2)	71
15 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 2)	71
16 lentelė. Tempimo bandymo rezultatų statistiniai duomenys (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 2)	72
17 lentelė. Pradiniai bandinių duomenys (Šiuolaikinis plienas)	72
18 lentelė. Bandymų rezultatai (Šiuolaikinis plienas)	72
19 lentelė. Tempimo bandymo rezultatų statistiniai duomenys (Šiuolaikinis plienas)	73
20 lentelė. Optinės emisinės analizės rezultatai (Šventosios molo varžtas)	75
21 lentelė. Optinės emisinės analizės rezultatai (Šiuolaikinis plienas)	76
22 lentelė. Šventosios molo varžto ir šiuolaikinio plieno palyginimas	77

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Korozijos skirstymas pagal korozijos proceso pobūdį	14
2 pav. Elektrocheminės korozijos proceso schema	15
3 pav. Korozijos skirstymas pagal pažeidimo pobūdį	17
4 pav. Lygiasluksnė korozija	18
5 pav. Nelygiasluksnė korozija	18
6 pav. Kontaktinė korozija	18
7 pav. Taškinė (pitingo) korozija	19
8 pav. Plyšinė korozija	19
9 pav. Tarpkristalinė korozija	19
10 pav. Erozinė korozija	19
11 pav. Trinties korozija	20
12 pav. Įtempių korozija	20
13 pav. Lakštinių plieninių atraminių konstrukcijų korozijos zonos Šiaurės ir Baltijos jūroje	20
14 pav. U ir Z profiliuotųjų galimų rūdžių sritys atoslūgio zonoje (jūros vandenyje)	21
15 pav. Plieninės konstrukcijos storio sumažėjimo priklausomybė nuo laiko skirtingose zonose	21
16 pav. Kavitacinė korozija	22
17 pav. Vandenilinis trapumas	22
18 pav. Korozija dėl metalų nuovargio	22
19 pav. Ideali dviejų metalų izoliacija	23
20 pav. Katodinė apsauga, naudojant aukojimo anodus	25
21 pav. Užpiltų vamzdinių katodinė apsauga, naudojant srovę	25
22 pav. Tyrimo ir kontrolės metodų klasifikacija	28
23 pav. Celestron skaitmeninis mikroskopas	36
24 pav. Skenuojantis elektroninis mikroskopas	37
25 pav. Zwick/Roell ZHJ 250 bandymų mašina	39
26 pav. Apkrovos pridėjimo schema	40
27 pav. Bandinio vaizdas iš viršaus ir iš priekio	40
28 pav. Zwick/Roell Z100 bandymų mašina	41
29 pav. Bandinys iš Šventosios molo varžto	41
30 pav. Bandinys iš artilerijos aikštelių pakloto plieno Nr. 1	41
31 pav. Bandinys iš artilerijos aikštelių pakloto plieno Nr. 2	42
32 pav. ARL QuantoDesk įrenginys	43
33 pav. Bandinio įtvirtinimas įrenginyje	43

34 pav. Inkarinis varžtas prieš nuvalant susidariusius korozijos produktus	44
35 pav. Korozijos produktai inkarinio varžto viršutinėje dalyje	44
36 pav. Korozijos produktai inkarinio varžto vidurinėje dalyje	44
37 pav. Korozijos produktai inkarinio varžto apatinėje dalyje	45
38 pav. Įsriegta inkarinio varžto dalis	45
39 pav. Inkarinis varžtas nuvalius susidariusius korozijos produktus	46
40 pav. Nuskilusi inkarinio varžto galvos dalis	46
41 pav. Inkarinio varžto plokštelės nuvalius rūdis	46
42 pav. Įsriegtos varžto dalies kūgiškumas	47
43 pav. Inkarinio varžto korozija	47
44 pav. Inkarinio varžto padėtis radimvietėje	48
45 pav. Šventosios uosto pietinio molo griuvėsiai	48
46 pav. Varžto – strypo srieginė dalis	49
47 pav. Srieginės varžto dalies kūginis galas	50
48 pav. Varžto veržlė pašalinus rūdžių sluoksnį	50
49 pav. Varžto plokštelė – poveržlė	51
50 pav. Varžto paviršiaus vaizdas per mikroskopą priartinus apie 10 – 40 kartų	51
51 pav. Varžto paviršiaus vaizdas per mikroskopą priartinus apie 150 kartų	52
52 pav. Gelžbetoninių durų armatūros tinklas	52
53 pav. Armatūros tinklo fragmentas	53
54 pav. Armatūros strypo vaizdas per mikroskopą	53
55 pav. Žiūrėjimo schema	54
56 pav. Sukorodavusio paviršiaus vaizdas priartinus 1000 kartų	54
57 pav. Korodavusio paviršiaus spektrograma	55
58 pav. Bandinio briaunos vaizdas priartinus 600 kartų	56
59 pav. Bandinio briaunos vaizdas priartinus 1000 kartų	57
60 pav. Korozijos židinyje prie duobutės priartinus 3000 kartų	57
61 pav. Korozijos židinyje prie duobutės priartinus apie 6000 kartų	58
62 pav. <i>Fe, Cl, Ca, K, Na, S, P, Si, Al, O, C, Mn</i> pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės	58
63 pav. Geležies (<i>Fe</i>) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės	59
64 pav. Anglies (<i>C</i>) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės	59
65 pav. Silicio (<i>Si</i>) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės	60
66 pav. Mangano (<i>Mn</i>) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės	60
67 pav. Fosforo (<i>P</i>) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės	61

68 pav. Sieros (<i>S</i>) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės	61
69 pav. Aliuminio (<i>Al</i>) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės	62
70 pav. Kalcio (<i>Ca</i>) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės	62
71 pav. Kalio (<i>K</i>) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės	63
72 pav. Natrio (<i>Na</i>) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės	63
73 pav. Chloro (<i>Cl</i>) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės	64
74 pav. Deguonies (<i>O</i>) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės	64
75 pav. Korozijos židinis duobutėje priartinus 15000 kartų	65
76 pav. Korozijos židinio duobutėje spektrograma	66
77 pav. Įtempių – deformacijų kreivės (Šventosios molo varžtas)	68
78 pav. Įtempių – deformacijų kreivės (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 1)	70
79 pav. Įtempių – deformacijų kreivės (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 2)	71
80 pav. Įtempių – deformacijų kreivės (Šiuolaikinis plienas)	73
81 pav. Skirtingų metalų takumo ir stiprumo ribų palyginamoji diagrama	73
82 pav. Skirtingų metalų deformacijų (pailgėjimo) palyginamoji diagrama	74
83 pav. Varžto rūdžių rentgenograma	74

SANTRUPŲ (ŽYMENU) SĄRAŠAS

d – Bandinio skersmuo, [mm]

A_0 – Bandinio skerspjūvio plotas, [mm²]

ΔL (dL) – Bandinio pailgėjimas po trūkio, [mm]

$\varepsilon_{\%}$ (eps_%) – Bandinio santykinis pailgėjimas po trūkio, [%]

F_f – Jėga suirimo metu, [N]

$F_{p0,2}$ – Jėga ties takumo riba, [N]

F_m – Didžiausia jėga, [N]

$f_{p0,2}$ – Takumo riba, [MPa (N/mm²)]

f_m – Stiprumo riba, [MPa (N/mm²)]

f_y – Charakteristinis stipris pagal takumo ribą, [MPa (N/mm²)]

f_u – Charakteristinis stipris pagal stiprumo ribą, [MPa (N/mm²)]

HB – Brinelio kietumas, [kG/mm²]

HR – Rokvelo kietumas, [kG/mm²]

HV – Vickerso kietumas, [kG/mm²]

TURINYS

ĮVADAS	13
1. TEORINĖ DALIS	14
1.1. Metalų korozija	14
1.1.1. Cheminė korozija	15
1.1.2. Elektrocheminė korozija	15
1.1.3. Apsauga nuo korozijos	23
1.2. Metalo tyrimų ir bandymų metodai	28
1.2.1. Mechaninių metalo savybių tyrimo metodai	28
1.2.2. Metalų struktūros tyrimo metodai	31
2. EKSPERIMENTINĖ DALIS	36
2.1. Eksperimentų metodika	36
2.1.1. Metalo paviršiaus būklės vizualinė analizė	36
2.1.2. Metalo tyrimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu	37
2.1.3. Metalo kietumo bandymas	39
2.1.4. Metalo tempimo bandymas	41
2.1.5. Metalo rentgenografinė analizė	42
2.1.6. Metalo optinė emisinė analizė	43
2.2. Eksperimentų rezultatai	44
2.2.1. Metalo paviršiaus būklės vizualinės analizės rezultatai	44
2.2.2. Metalo tyrimo skenuojančiu elektroniniu mikroskopu rezultatai	54
2.2.3. Metalo kietumo bandymo rezultatai	67
2.2.4. Metalo tempimo bandymo rezultatai	68
2.2.5. Metalo rentgenografinės analizės rezultatai	74
2.2.6. Metalo optinės emisinės analizės rezultatai	75
IŠVADOS	78
LITERATŪRA	80

ĮVADAS

Medžiagos laikui bėgant sensta, metalas ne išimtis – laikui bėgant senėja, vyksta korozijos procesai. Šiuos procesus ypač paspartina agresyvi aplinka. Kaimo, miesto, pramonės ir jūros aplinkoje metalas koroduoja skirtingu greičiu. Šiuo metu korozija yra plačiai aprašyta tiek Lietuvos, tiek užsienio literatūroje. Korozijos tema yra aktuali, kadangi atliekama daugybė mokslinių tyrimų bei publikuojama mokslinių straipsnių šia tema.

Dauguma tyrimų atliekami laboratorijose priverstinai sudarant palankias sąlygas plieno korozijai ir senėjimui. Šiame baigiamajame darbe ypatinga tai, kad tiriamas buvo senas, o ne šiuolaikinis pasendintas (priverstinai) plienas.

Darbo objektas – metalo korozijos ir senėjimo jūrinėje aplinkoje tyrimas.

Šio darbo tikslai yra išsiaiškinti apie metalų korozijos klasifikaciją bei apsaugą nuo korozijos, taip sužinoti, kokie būna metalų tyrimų ir bandymų metodai, ištirti metalo koroziją ir senėjimą jūrinėje aplinkoje.

Užsibrėžtam tikslui pasiekti buvo iškelti tokie uždaviniai:

1. Atlikti Lietuvos ir užsienio literatūros apžvalgą,
2. Nustatyti metalų korozijos tipą bei korozijos greitį jūrinėje aplinkoje,
3. Ištirti korozijos produktų cheminę sudėtį,
4. Nustatyti metalo kietumą,
5. Nustatyti metalo takumo ir stiprumo ribas, santykinės deformacijas,
6. Identifikuoti korozijos produktus,
7. Nustatyti metalų cheminę sudėtį.

Darbe buvo taikyti šie tyrimų metodai: literatūros analizė, metalų paviršiaus būklės vizualinė analizė, metalo tyrimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM), Vikerso kietumo bandymas, metalų tempimo bandymai, metalo (korozijos produktų) rentgenografinė analizė, metalo optinė emisinė analizė, tyrimų rezultatai apdoroti kompiuterine programa STATISTICA.

Tyrimuose daugiausiai buvo naudojamas plieninis inkarinis strypas – varžtas (1936 m.), kuris buvo rastas Šventosios uosto šiaurinio molo liekanose. Papildomai buvo tiriamas tarp Melnragės ir Girulių rastas varžtas, armatūros tinklas iš artilerijos baterijos gelžbetoninių durų (1939 m.), plienas iš artilerijos aikštelių pakloto (1939 m.), taip pat šiuolaikinis plienas (2010 m.).

Mokslinį – tiriamąjį darbą sudaro dvi dalys (teorinė ir eksperimentinė), išvados, literatūros sąrašas (25 šaltiniai). Darbe pateikiama 83 paveikslai ir 22 lentelės. Baigiamąjį darbą sudaro 81 puslapis.

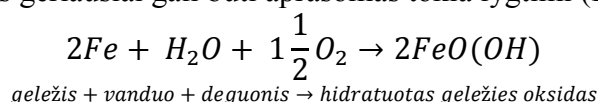
1. TEORINĖ DALIS

1.1. Metalų korozija

Korozija – metalų irimas dėl fizinės ir cheminės sąveikos su aplinka, kai metalas pereina į oksiduotą būseną ir praranda jam būdingas savybes.

Korozija vyksta kontaktuojant su vandeniniais tirpalais, oru ir jo priemaisomis, dujomis, įvairaus tipo dirvožemiu, kitomis statybinėmis medžiagomis ir daugeliu kitų cheminių junginių.

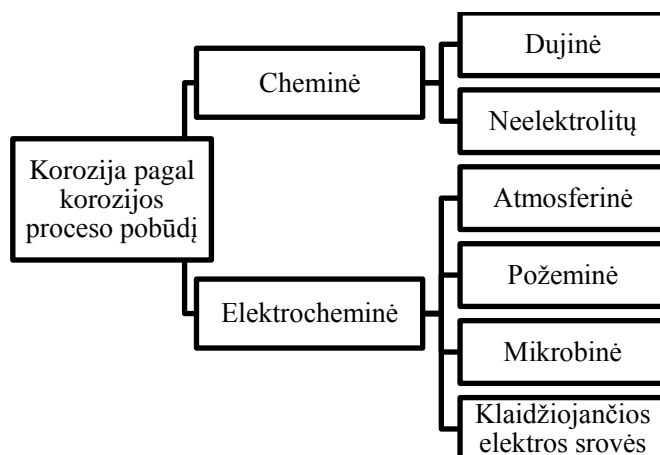
Rūdžių formavimasis geriausiai gali būti aprašomas tokia lygtimi (Knöfel, 1978):



D. Knöfel metalų koroziją klasifikuoja pagal tokius kriterijus:

1. *Aplinkos sąlygos.* Aplinkos poveikis įtakoja koroziją atmosferoje, dirvožemyje ir vandenyje.
2. *Išorinė išvaizda.* Dažnai pagal išorinę išvaizdą galima nustatyti korozijos kilmę ir tipą (paviršinė korozija, pittingo korozija, tarpkristalinė korozija).
3. *Cheminių ir mechaninių veiksnių derinys.* Pastebima, kad cheminis ir mechaninis veiksniai, kurie veikdami atskirai, blogiausiu atveju, sukelia vidutinę žalą, o veikdami kartu gali sukelti ypač didelę žalą. Tokie medžiagų savybių pokyčiai sukelti bendro mechaninio ir cheminio poveikio yra įtempių korozija ir trinties korozija.
4. *Korozijos mechanizmas.* Labai svarbu yra atskirti cheminės korozijos procesus, tokius kaip oksidacija, ir elektrocheminės korozijos procesus. Elektrocheminės korozijos atveju, dvi metalinės fazės yra prijungtos prie elektros laidininko, kuris yra elektrolitas (skystis, kuris dėl jonų buvimo, yra laidus elektrai). Korozija dėl klaidžiojančių srovių grunte taip pat priklauso šiai grupei.

Pagal korozijos proceso pobūdį korozija gali būti skirstoma (Šulčius, 2006) į dvi pagrindines grupes: cheminę koroziją ir elektrocheminę koroziją (1 pav.).



1 pav. Korozijos skirstymas pagal korozijos proceso pobūdį

1.1.1. Cheminė korozija

Cheminė korozija vyksta metalams jungiantis su sausosiomis dujomis (deguonimi, sieros vandeniliu, halogenais, sieros oksidais ir t.t.) arba skystomis elektra nelaidžiomis medžiagomis. Cheminės korozijos metu metalas rūdija neveikiamas elektros srovės – elektrocheminė reakcija nevyksta.

Cheminė korozija skirstoma:

- a) Dujinė korozija,
- b) Neelektrolitų korozija.

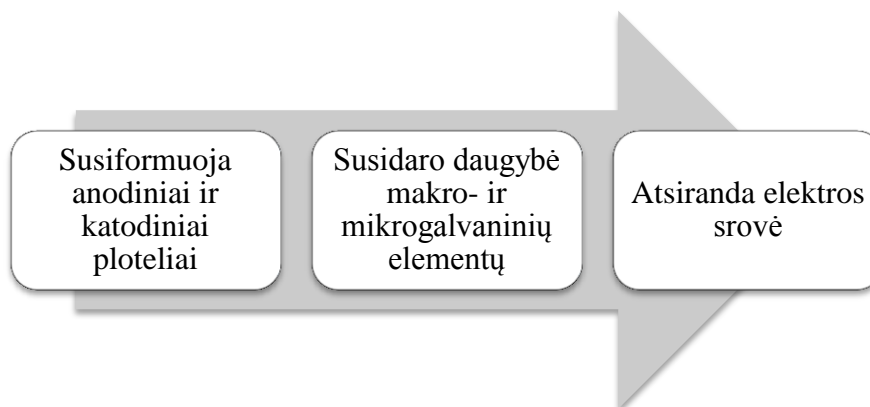
Metalo ir jo lydinių dujinė korozija vyksta esant aukštai temperatūrai: kontaktiniais ar kitais aparatais virinant metalo konstrukcijas, metalo kaitinimo krosnyse, vidaus degimo varikliuose, dujų generatoriuose, dujų turbinose, branduoliniuose reaktoriuose. Tačiau dujinė korozija vyksta ne tik aukštoje, bet ir kambario temperatūroje veikiant paveikioms dujoms. Dujinės korozijos intensyvumas priklauso nuo metalo savybių, lydinio sudėties, temperatūros, dujų veikimo trukmės, korozijos produktų savybių. Dažniausia dujinės korozijos priežastis – metalo sąveika su oro deguonimi. Dėl šios sąveikos metalų paviršiuje susidaro oksidų plėvelės.

Neelektrolitų korozija vyksta metalui liečiantis su elektra nelaidžiomis medžiagomis. Neelektrolitinės medžiagos – bromas, ištirpusi siera, daugelis organinių medžiagų (benzenas, chloroformas, fenolis ir t.t), skystas kuras (nafta, žibalas, benzinas, tepalai) (Aušrienė, 2002).

1.1.2. Elektrocheminė korozija

Elektrocheminė korozija vyksta tuomet, kai metalo paviršių drėkina elektra laidus skystis – elektrolitas (vanduo, įvairūs tirpalai, išlydytos druskos, rūgštys, šarmai).

Elektrocheminės korozijos procesas (2 pav.):



2 pav. Elektrocheminės korozijos proceso schema

Elektrocheminės korozijos rūšys:

- 1) Atmosferinė korozija,
- 2) Požeminė korozija,
- 3) Mikrobinė korozija,
- 4) Klaidžiojančios elektros srovės korozija.

Atmosferinė korozija – labiausiai paplitusi korozijos rūšis, kurios intensyvumas priklauso nuo santykinio oro drėgnumo ir atmosferos sudėties.

Atmosferinė korozija pagal teršalų koncentraciją gali būti skirstoma (Šulčius, 2006):

- a) Kaimo atmosfera (būdingas nedidelis teršalų kiekis: SO₂ nusėdimo greitis < 10 mg SO₂ vienam m² per parą, chloridų - < 5 mg NaCl vienam m² per parą),
- b) Miesto atmosfera (būdinga didelė SO₂ ir dulkių koncentracija: SO₂ nusėdimo greitis 10-80 mg SO₂ vienam m² per parą),
- c) Pramoninė atmosfera (būdinga ypač didelė tarša: SO₂ nusėdimo greitis 200 mg SO₂ vienam m² per dieną),
- d) Jūros atmosfera (būdinga didelė chlorido jonų koncentracija jūros vandens lašelių arba mažų kristalų pavidalu: NaCl nusėdimo greitis 5-500 mg NaCl vienam m² per parą).

Požeminės korozijos greitis ir korozinės aplinkos intensyvumas priklauso nuo dirvožemio sudėties, struktūros, rūgštingumo, drėgmės bei cheminės sudėties. Požeminės korozijos atveju metalas dažniausiai pažeidžiamas taškine (pitingo) korozija.

Mikrobinė korozija – korozija, vykstanti dėl dirvožemyje ar vandenyje esančių mikroorganizmų: bakterijų, grybelių, dumblių ir kt. Tačiau pavojingiausios iš jų yra bakterijos. Anglų mokslininkai nustatė, kad ~50% plieninių konstrukcijų požeminės korozijos vyksta dėl mikrobinės korozijos. Mikrobinė korozija pasireiškia jūrų, upių, tvenkinių, kanalų bei nutekamuosiuose vandenyse, pelkėse. Kitaip tariant vietose, kur gausu organinių medžiagų, drėgmės, yra rami ir tamsi aplinka. Palankiausia jų dauginimosi temperatūra yra 20 – 32 °C.

Visos bakterijos skirstomos:

- a) Aerobinės bakterijos – mikroorganizmai, kurių gyvybinei veiklai reikalingas deguonis.
- b) Anaerobinės bakterijos – mikroorganizmai, kurių gyvybinei veiklai deguonis nereikalingas ir netgi kenksmingas.

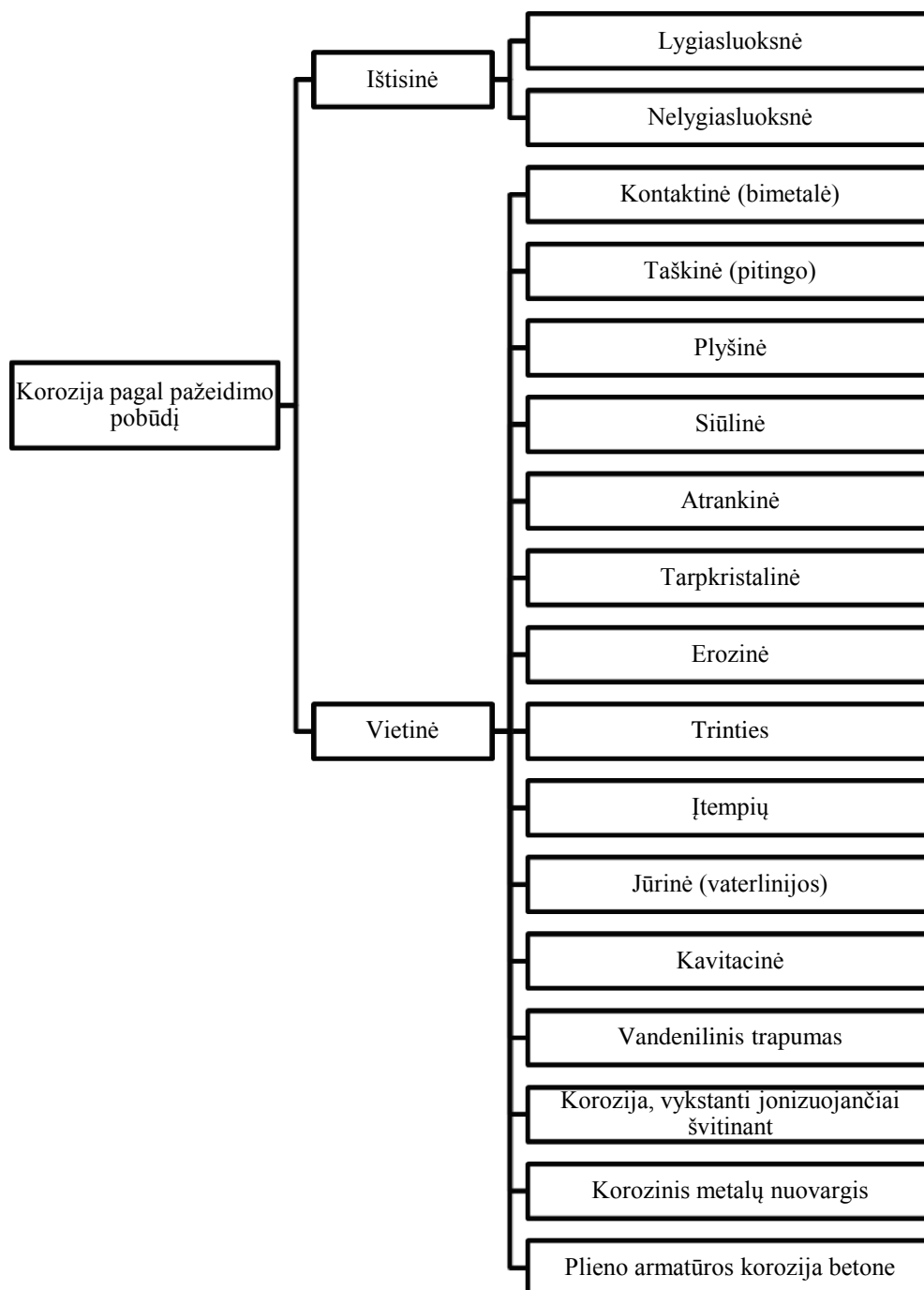
Pavojingiausios aerobinės bakterijos yra sierą oksiduojančios tignoninės arba sieros bakterijos (SOB). Jos energiją gauna oksiduodamos vandenilio sulfidą arba sierą.

Iš anaerobinių bakterijų dažniausiai pasitaikančios yra sulfato jonus redukuojančios bakterijos (SRB). Rečiau pasitaiko nitrato jonus redukuojančių bakterijų bei bakterijų, išskiriančių metano dujas (Šulčius, 2006).

Klaidžiojančios elektros srovės koroziją sukelia šie pagrindiniai klaidžiojančios elektros srovės šaltiniai: elektrifikuotos geležinkelių, tramvajų linijos, įvairūs įrenginiai, naudojantys elektros srovę, katodinės stotys, elektros suvirinimo įrenginiai, radijo ir televizijos siūstuvai, žaibolaidžiai.

Vamzdyno dalis, kurioje elektros srovė įteka į metalą, vyksta deguonies ar vandenilio redukcija – katodinė sritis, o vamzdyno dalis, kurioje elektros srovė išteka į gruntą – anodinė sritis. Vidurinioji vamzdyno dalis – neutrali zona. Anodinėje zonoje plienas koroduoja, o aliuminis, cinkas, švinas – ir katodinėje zonoje (Kačerauskas, 2006).

Korozija dar gali būti skirstoma pagal metalo pažeidimo pobūdį (3 pav.).

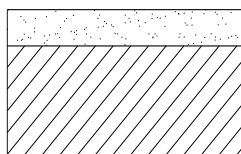


3 pav. Korozijos skirstymas pagal pažeidimo pobūdį

Ištisinė korozija – kai metalas rūdija visame paviršiaus plote vienodai.

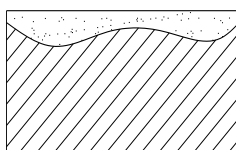
Ištisinė korozija skirstoma:

- 1) Lygiasluoksnė – metalas rūdija ištisai, o rūdžių sluoksnis susidaro vienodo storio (4 pav.).



4 pav. Lygiasluoksnė korozija

- 2) Nelygiasluoksnė – metalas rūdija ištisai, tačiau rūdžių sluoksnio storis nevienodas (5 pav.).



5 pav. Nelygiasluoksnė korozija

Vietinė korozija vyksta esant nevienodai korozinei aplinkai pavienėse metalo paviršiaus vietose.

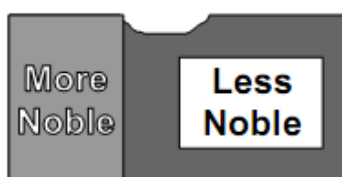
Kontaktinė (bimetalė) korozija vyksta, kai greta sujungti nevienodos rūšies metalai, t.y. kai liečiasi metalai su skirtingais elektrodiniais potencialais.

Pagal potencialų reikšmę metalai ir jų lydiniai gali būti skirstomi (Kačerauskas, 2006):

1. Magnis ir jo lydiniai.
2. Kadmis, cinkas, aliuminis ir jų lydiniai.
3. Švinas, alavas, geležis, anglingi plienai.
4. Chromas, nikelis, nerūdijantys plienai, turintys chromo ar chromo ir nikelio.
5. Varis, sidabras, auksas, vario ir nikelio, vario ir cinko lydiniai.

Mokslininkai nustatė, kad vienos grupės metalus galima eksploatuoti, kai jie liečiasi vienas su kitu. Liečiantis skirtingų grupių metalams vyksta bimetalė (kontaktinė) korozija.

Kontaktinės (bimetalės) korozijos esmė: liečiantis skirtingų grupių metalams, o jų kontaktą dengiant elektrolito sluoksneliui, susidaro galvaninis elementas (6 pav.). Katodu būna tas metalas, kurio potencialas yra didesnis (elektroteigiamesnis), o anodu – kurio potencialas mažesnis (elektroneigiamesnis). Koroduoja tas metalas, kurio potencialas mažesnis (elektroneigiamesnis).



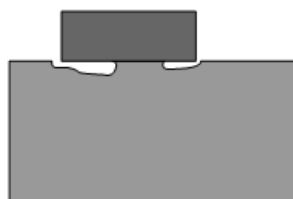
6 pav. Kontaktinė korozija
(Šaltinis: Roberge R. P., 1999)

Taškinės (pitingo) korozijos metu susidaro koroziniai židiniai – nedidelės, bet gilos kiaurymės (7 pav).



7 pav. Taškinė (pitingo) korozija
(Šaltinis: Roberge R. P., 1999)

Plyšinė korozija vyksta susidariusiuose plyšiuose arba šalia jų (8 pav.). Plyšiai susidaro konstruojant, gaminant, kartais ir eksploatuojant metalines konstrukcijas, detales.

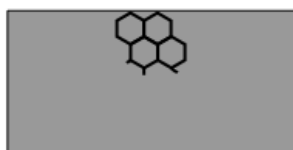


8 pav. Plyšinė korozija
(Šaltinis: Roberge R. P., 1999)

Siūlinė korozija – tai korozija, plintanti ant metalo paviršiaus po apsaugine (lakų, dažų, metaline) danga.

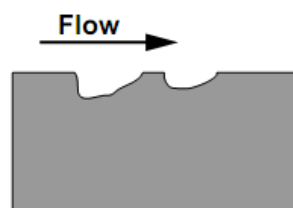
Atrankinė korozija dažniausiai vyksta lydiniuose, kai lydinį sudarantys komponentai koroduoja skirtingais greičiais.

Tarpkristalinė korozija (9 pav.) vyksta tarp metalo kristalų jų sąlyčio ribose ir paveikioje aplinkoje. tarp grūdelių susidaro purus korozijos produktas – rūdys. Ši korozijos rūšis ypač pavojinga – ji metalų paviršiuje nematoma. Šiuo atveju metalas praranda tvirtumą, plastiškumą.



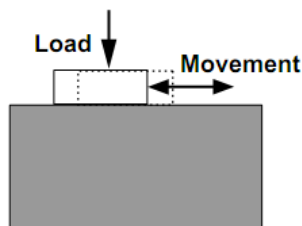
9 pav. Tarpkristalinė korozija
(Šaltinis: Roberge R. P., 1999)

Erozinė korozija – laipsniškas mechaninis metalo ardymo procesas (10 pav.). Erozinės korozijos atveju, korozija ir erozija vyksta vienu metu.



10 pav. Erozinė korozija
(Šaltinis: Roberge R. P., 1999)

Trinties korozija vyksta varžtais, kniedėmis ar kitais jungimo elementais sujungtų metalų besiliečiančiuose paviršiuose veikiant vibraciniam slydimui (11 pav.). Kad vyktų trinties korozija, drėgmė nereikalinga, pagrindinė šios rūšies korozijos priežastis – deguonis.



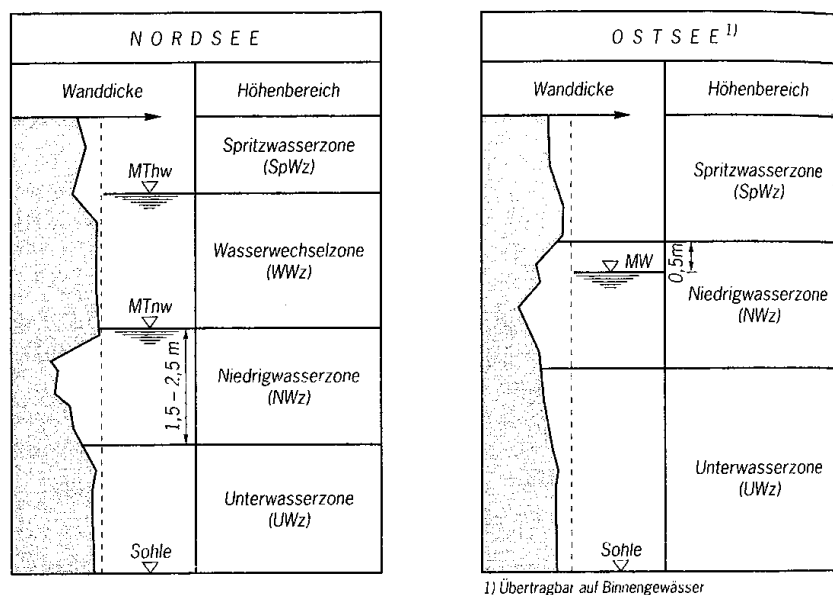
11 pav. Trinties korozija
(Šaltinis: Roberge R. P., 1999)

Įtempių korozija (12 pav.) – tai korozija, kurią sukelia veikiantys vidiniai arba išoriniai įtempimai. Įtempių vietose susidaro mikroplyšiai, kurie plinta kristalo sienelėmis (tarpkristalinis irimas) ir per patį grūdėlį (transkristalinis irimas).



12 pav. Įtempių korozija
(Šaltinis: Roberge R. P., 1999)

Jūrinė (vaterlinijos korozija) pažeidžia jūroje ar prieplaukoje esančius įvairius įrenginius, laivus. Jūros vandenyje yra daug ištirpusių įvairių druskų chloridų, sulfatų ir natrio karbonatų, magnio, kalio, kalcio ir kt., kurie atlieka elektrolito vaidmenį. Palyginimui galima pažiūrėti, kaip vyksta lakštinių plieninių atraminių konstrukcijų korozija skirtingose zonose Šiaurės ir Baltijos jūroje (13 pav.).

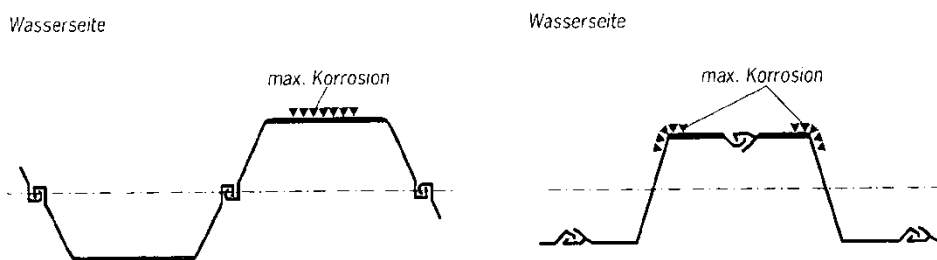


13 pav. Lakštinių plieninių atraminių konstrukcijų korozijos zonos Šiaurės ir Baltijos jūroje
(Šaltinis: Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstrassen, 2004)

Atmosferinė korozija, kaip ir korozija aukščiau purlų zonos yra labai maža – 0,01-0,05 g/(m²·val). Lyginant su korozija purlų ir povandeninėje zonoje praktiškai bereikšmė. Korozijos greičio reikšmės atitinkamai 0,5 g/(m²·val) ir 0,18 g/(m²·val). Jūros vandenyje didžiausia korozija vyksta vaterlinijos zonoje – fazių sąlyčio riboje jūros vanduo – metalas.

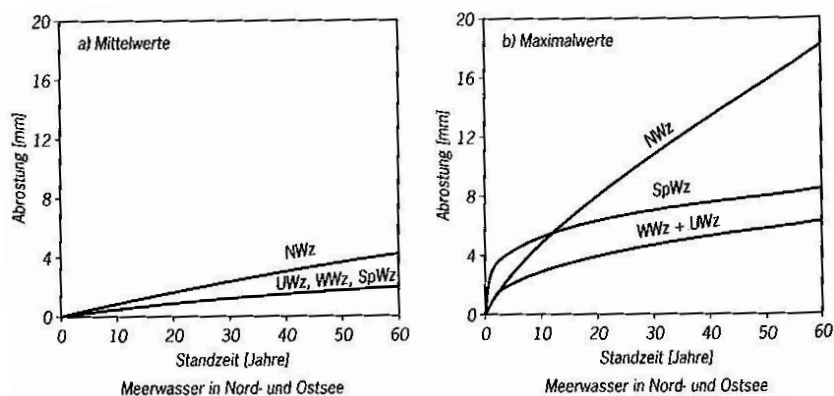
Tačiau jūrinei korozijai įtakos turi ne tik jūrinė aplinka, bet ir pačio metalo cheminė sudėtis. Atlikti moksliniai tyrimai (Wang et al., 2008) parodė, kad atmosferos zonoje efektyviausios plieno lydinio priemaišos yra fosforas ir varis, antras pagal efektyvumą – molibdenas, purlų zonoje – fosforas, molibdenas ir varis, o panardinimo zonoje – aliuminis ir chromas. Moksliniais tyrimais taip pat nustatyta, kad aliuminio ir chromo priemaišos turi geras antikorozines savybes panardinimo zonoje, tačiau yra žalingos purlų ir atmosferos zonoje.

Didžiausios korozijos zonose, ypač jūros vandens srityje, gali pasireikšti vietinė korozija, kuri U profilio konstrukcijose būna nugarinėje dalyje, o Z profilio – kampuose (14 pav.). Dėl šios vietinės korozijos gali sumažėti konstrukcijos saugis, nes dėl atsiradusių rūdžių gali būti išplautas gruntas ir atsirasti nuosėdžių.



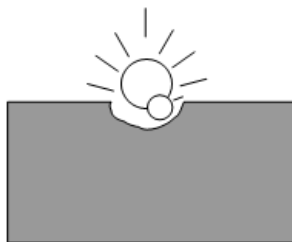
14 pav. U ir Z profilioočių galimų rūdžių sritys atoslūgio zonoje (jūros vandenyje)
(Šaltinis: Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstrassen, 2004)

Kaip jau buvo minėta, korozijos greitis skirtingose zonose skiriasi. 15 pav. pavaizduota plieninės konstrukcijos storio sumažėjimo priklausomybė nuo laiko. Priklausomai nuo daugybės įtakos faktorių (temperatūros, chemijos, mikrobu, mechaninio atsparumo, klaidžiojančių srovių) storio sumažėjimas gali skirtis.



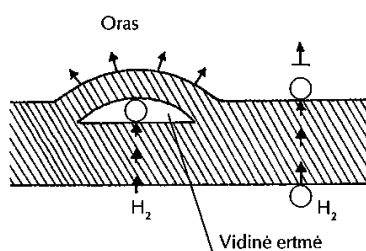
15 pav. Plieninės konstrukcijos storio sumažėjimo priklausomybė nuo laiko skirtingose zonose
(Šaltinis: Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstrassen, 2004)

Kavitacinė korozija – procesas, kai kavitacijos (garų ar dujų burbuliukų susidarymo ir suirimo proceso) metu susidarę burbuliukai, smūgiuodami į metalo paviršių, suardo metalo apsauginę plėvelę, susidaro daug mikroplyšių, ima trupėti mažos dalelės (16 pav.).



16 pav. Kavitacinė korozija
(Šaltinis: Roberge R. P., 1999)

Vandenilinis trapumas – metalo tvirtumo sumažėjimas dėl jame ištirpusio vandenilio (17 pav.).



17 pav. Vandenilinis trapumas
(Šaltinis: Kačerauskas J., 2006)

Metalų korozijos, vykstantčios jonizuojančiai švitinant (neutronai, protonai, α , β , γ spinduliavimas), greitis atmosferos sąlygomis padidėja 100 – 300 kartų. Švitinimas nekeičia korozijos proceso mechanizmo, tačiau turi įtakos korozijos greičiui, kurį įtakoja dar ir šie faktoriai: radiolizės, destruktinis, fotoradiacinis.

Korozinis metalų nuovargis – laipsniškas metalo patvarumo mažėjimas dėl įtrūkių tarp kristalų, veikiant ciklinei apkrovai ir nepalankiai aplinkai. Metalo paviršiuje atsiranda mikroplyšiai (įtrūkimai) ir, veikiant kintamai apkrovai, plinta gilyn, kol gaminys suyra (18 pav.).



18 pav. Korozija dėl metalų nuovargio
(Šaltinis: Roberge R. P., 1999)

Plieno armatūros korozija betone – plieno armatūros, įdėtinių detalių rūdijimas, kuriam vykti būtinos šios sąlygos:

- Metalo paviršiuje turi būti potencialų skirtumas;
- Tarp įvairių skirtingo potencialo metalo paviršiaus plotelių turi būti elektrolito;
- Pakankama depoliarizatoriaus koncentracija.

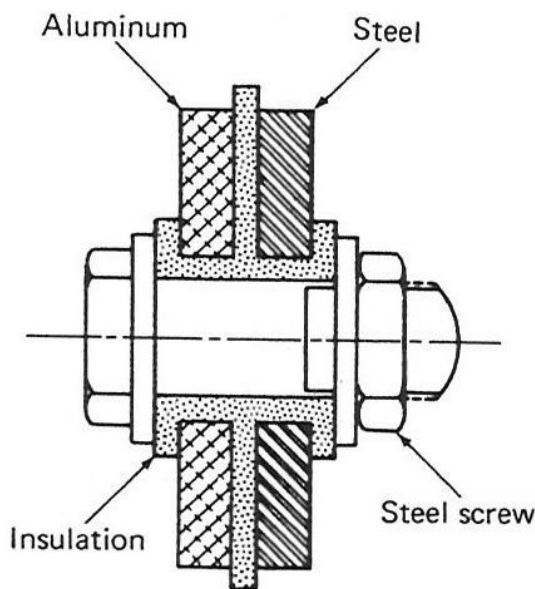
1.1.3. Apsauga nuo korozijos

Pagal D. Knöfel, kontaktuojant korozinei aplinkai ir konstrukciniams metalams, galimi tokie atvejai:

- 1) Metalas yra patvarus, t. y. yra atsparus korozinei aplinkai;
- 2) Metalas yra pasyvus, t. y. yra apsaugotas natūraliu apsauginiu sluoksniu, kuris susidarė prieš pradėdant veikti korozinei aplinkai;
- 3) Metalas pasyvuojasi, t. y., kai jis yra veikiamas korozinės aplinkos, susidaro apsauginis sluoksnis, kuris apsaugo nuo tolimesnės korozijos;
- 4) Metalas yra visiškai nepatvarus korozinėje aplinkoje.

Apsauga nuo korozijos turi prasidėti jau projektavimo metu – turi būti vengiama koroziją sukeliančių sąlygų. Konstrukcijos turi būti tokios, kad jas būtų galima nuvalyti ir nudažyti, kaip galima lengviau, t. y. turi būti užtikrintas geras pasiekiamumas; kai kuriais atvejais tokiam darbui projektavimo metu turi būti numatomos specialios priemonės. Renkantis konstrukcines medžiagas reikia deramai įvertinti būsimą koroziją. Konstrukcijoms, prie kurių yra sudėtinga prieiti, būtina naudoti atsparesnes korozijai arba geriau apsaugotas konstrukcines medžiagas. Kai du metalai yra naudojami kartu, jie turi būti atskirti vienas nuo kito.

Kai du skirtingi metalai naudojami kartu, jie turi būti izoliuojami vienas nuo kito (19 pav.).



19 pav. Ideali dviejų metalų izoliacija
(Šaltinis: Knöfel, D., 1978)

Statant naujus statinius yra svarbu išvengti žalos esamoms apsauginėms dangoms. Jeigu danga visgi pažeidžiama, ji turi būti nedelsiant sutvarkoma. Pavyzdžiui, jeigu karšto cinkavimo danga pažeidžiama, ji gali būti sutvarkyta naudojant cinko dažus. Jeigu viso to laikomasi, tolimesnė korozijos apsauga bus pigesnė.

Statant naujus statinius yra svarbu išvengti žalos esamoms apsauginėms dangoms. Jeigu danga visgi pažeidžiama, ji turi būti nedelsiant sutvarkoma. Pavyzdžiui, jeigu karšto cinkavimo danga pažeidžiama, ji gali būti sutvarkyta naudojant cinko dažus. Jeigu viso to laikomasi, tolimesnė korozijos apsauga būna pigesnė.

Apsauga nuo korozijos siaurąja prasme gali būti klasifikuojama į aktyviają ir pasyviają apsaugą. Aktyvios apsaugos nuo korozijos atveju arba pačios medžiagos, arba korozinė aplinka veikia taip, kad korozija nevyksta. Pasyvios apsaugos nuo korozijos atveju, medžiaga būna apsaugoma nuo korozinės aplinkos poveikio.

Aktyvioji apsauga nuo korozijos

Siekiant užkirsti kelią korozijai ar sumažinti koroziją, lydymo metu galima pridėti legiruojančių priedų. Pagal pastarųjų kiekį plieno sudėtyje, plienas vadinamas mažai legiruotu (<5%), vidutiniškai legiruotu (5 – 10 %) arba gausiai legiruotu (> 10 %).

Metalai gali būti legiruojami kitais metalais arba nemetalais. Vieni legiruojantys priedai sudaro apsauginę korozijos produktų plėvelę, kiti mažina katodinių ar anodinių plotelių aktyvumą.

Dažniausiai naudojami plieną legiruojantys priedai yra: chromas, nikelis, silicis, aliuminis, kobaltas, molibdenas, volframas, titanas, berilis ir kt.

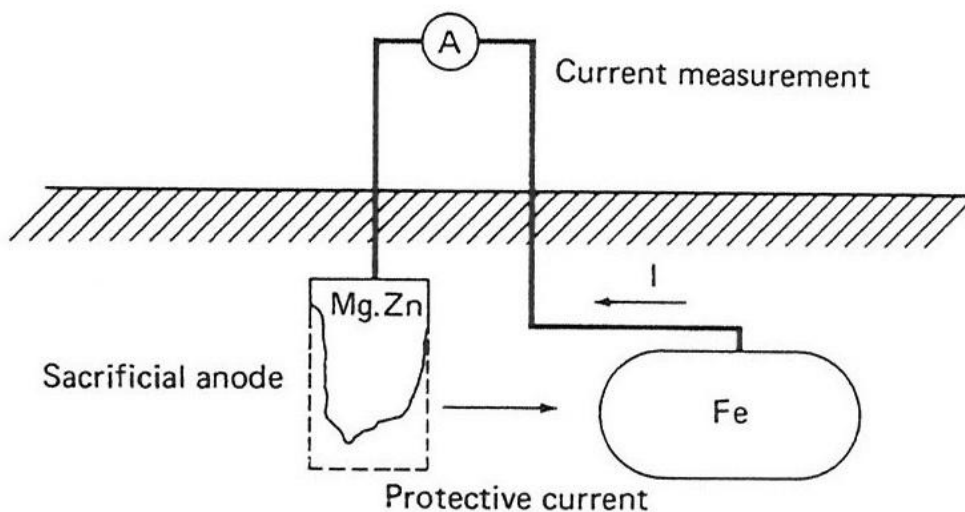
Legiravimas yra efektyvus apsaugos nuo korozijos būdas, tačiau nėra dažnai naudojamas, nes daugelis legiruojančių priedų yra reti ir brangūs.

Viena svarbiausių aktyviosios apsaugos nuo korozijos priemonių – katodinė apsauga. Katodinės apsaugos esmė: daroma prielaida, kad saugomasis objektas yra sąlytyje su elektrolitu (drėgnas dirvožemis, jūros vanduo ir t. t.); susidaro apsauginė srovė, kuri teka priešinga korozijos srovei kryptimi ir yra to paties dydžio; apsauginė srovė perduoda elektronus į metalą, kuris yra apsaugomas; jie metalo paviršiuje jungiasi su reaktyvios aplinkos jonais (deguonies, vandenilio ir t. t.) ir redukuoja juos; elektronų perteklius metalo paviršiuje neleidžia pašalinti teigiamiems metalo jonams nuo saugomo objekto paviršiaus; šiuo atveju apsauginė srovė neleidžia susidaryti korozijos srovei ir kartu pačiai korozijai.

Siekiant apsaugoti objektus, naudojant apsauginę srovę, gali būti naudojamas vienas iš šių metodų:

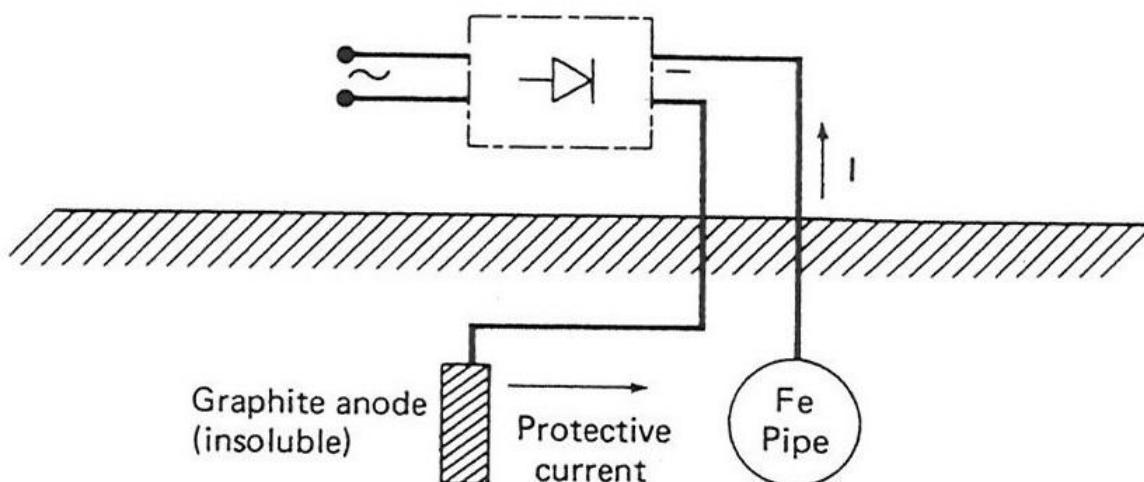
- 1) Siekiant apsaugoti riboto dydžio objektus, esančius gerai laidžioje aplinkoje (pavyzdžiui, požeminiai rezervuarai, užtvankų vartai, laivų korpusai ir t. t.), pirmenybė teikiama galvaniniam elementui t. y. elektrocheminei apsaugai (20 pav.). Elektroneigiamasis metalas (įprastai magnis arba cinkas: anodas) prijungiamas elektra prie elektroteigiamosio metalo, kurį norima apsaugoti (įprastai plienas: katodas). Elektronai teka iš anodo izoliuotu elektros laidininku į katodą, taip apsaugodami metalą nuo korozijos. Cheminiai reiškiniai, kurie vyksta esant elektrocheminiams procesams, dabar vyksta ant anodo, kuris pamažu ištirpsta arba sukoroduoja. Kadangi tokie anodai

pamažu ištirpsta, jie vadinami aukojimo anodais. Paprastai jų tarnavimo laikotarpis yra ne mažiau kaip 10 metų. Dėl ekonominių priežasčių naudojama papildoma pasyvioji apsauga nuo korozijos, konstrukciją nudažant, todėl pasyvioji apsauga naudojama ten, kur pasyvioji apsauga yra žalinga.



20 pav. Katodinė apsauga, naudojant aukojimo anodus
(Šaltinis: Knöfel, D., 1978)

2) Siekiant apsaugoti didelius objektus, pirmenybė teikiama katodinei apsaugai su nuolatine srove, naudojant lygintuvus, maitinamus iš pagrindinės elektros linijos (21 pav.). Šis metodas naudojamas vamzdynams, paklotiems grunte. Vieno apsauginės srovės prietaiso pakanka 30 – 40 km vamzdynų ilgio. Dėl ekonominių priežasčių taip pat naudojama pasyvioji apsauga (pavyzdžiui, vamzdis dengtas plastik). Tai žymiai sumažina srovės poreikį ir su juo susijusias eksploatacijos išlaidas. Norint paskaičiuoti ir sukonstruoti katodinę apsaugą, reikalingos specialios techninės žinios, taip pat reikalinga speciali įranga. Tokius darbus turi atlikti tik kvalifikuotos specializuotos įmonės.



21 pav. Užpiltų vamzdynų katodinė apsauga, naudojant srovę
(Šaltinis: Knöfel, D., 1978)

Pasyvioji apsauga nuo korozijos

Pačios populiariausios apsauginės dangos, skirtos apsaugoti metalą nuo korozinės aplinkos, yra metalinės ir organinės dangos.

Nemetalinės neorganinės dangos (stikliška emalė ant plieno lakštų arba cemento skiedinys, dengiantis vamzdžius) yra retos. Cinko fosfatų arba cinko – geležies fosfatų dangos (fosfatavimas) ant metalinių paviršių, ypač plieno, taip pat nėra labai dažnai naudojamos statybos pramonėje. Vienos fosfatų dangos neužtikrina pakankamos apsaugos nuo korozijos – būtinas papildomas dažymas. Fosfatų dangos dažnai naudojamos plieno apdorojimui automobilių pramonėje.

Metalinės dangos gali būti formuojamos šiais būdais:

- 1) Elektrolizė (pavyzdžiui, galvaninis nikeliavimas);
- 2) Panardinimas į išlydytą metalą (pavyzdžiui karštojo cinkavimo dangos);
- 3) Difuzija (pavyzdžiui, chromavimo difuzija);
- 4) Skysto metalo užpurškimas (pavyzdžiui, cinkavimas užpurškiant);
- 5) Valcuojant plonus sluoksnius ant paviršiaus (pavyzdžiui, auksavimas).

Prieš padengiant dangomis, metalų paviršiai turi būti kruopščiai nuvalomi tiek mechaniškai, tiek chemiškai. Paviršiai turi būti nuriebalinti ir nubeicuoti (Knöfel, 1978).

Siekiant sudaryti galvanines metalines dangas, naudojama elektrolizė. Dengiamasis metalas yra katodas, o dengiantysis – anodas. Metalo druskos tirpalas, naudojamas dangos formavimui, yra elektrolitas (naudojama elektrolizės vonia). Elektrolito katijonai, kurie yra metalo danga, juda link katodo ar saugojamojo metalo ir nusėsta ant jo. Anodas pamažu ištirpsta, ir šiuo būdu metalo jonai patenka į elektrolitą ir į apsauginį sluoksnį. Praktikoje, atidžiai turi būti atidžiai kontroliuojami šie duomenys: elektrolito koncentracija, sudėtis ir temperatūra, priešingu atveju – nesusiformuos tankus ir adheziškas apsauginis sluoksnis. Siekiant pagerinti adheziją, ant metalų dažnai būna galvanizuojami kitų metalų tarpiniai sluoksniai.

Aliuminio atveju elektrolizė yra naudojama apsauginiam oksidų sluoksniui sustiprinti. Aliuminis yra prijungiamas kaip anodas ir, vykstant elektrolizės procesui, anodiškai oksiduojamas. Toks oksido sluoksnis yra daug kartų storesnis už natūralios paviršiaus oksidacijos sluoksnį, yra stiprus ir gali būti permatomas, nepermatomas arba spalvotas. Be apsauginio sluoksnio storio pastebimos įtakos apsauginėms savybėms turi apsauginio sluoksnio tankis, kuris yra reglamentuotas.

Karštojo dengimo dangos yra suformuojamos įmerkiant į išlydytus metalus. Cinko danga, kuri gaunama esant 450°C temperatūrai, yra ypač svarbi. Kai plienas yra panardinamas į cinką, ant plieno paviršiaus susidaro cinko – geležies lydinys, kuris yra padengtas gryno cinko sluoksniu. Šiuo metu cinko dangos, siekiančios 400 – 900 g/m², yra labai populiarios plieninėms konstrukcijoms, kurias veikia atmosfera. Tokių cinku dengtų plienų defektai ir kiti trūkumai gali būti paslėpti užpurškiant arba uždažant dažais, kuriuose yra cinko dulkių.

Daugeliu atveju šio tipo dangos užtikrina pakankamą apsaugą nuo korozijos. Kitais atvejais yra patartina arba būtina naudoti papildomas dažų dangas. Agresyvioje atmosferoje arba agresyviuose gruntuose apsauga yra drastiškai padidinama, kartu naudojant cinko ir dažų dangas. Tokia kombinuota apsauga veikia 1,5 – 2,5 ilgiau, negu šių dangų veikimo trukmės suma, kai dangos veikia atskirai. Ilgaamžiškumo priežastis – išvengiama korozijos po dažų dangomis. Dažoma gali būti gamykloje ant šviežiai cinkuoto paviršiaus arba vėliau ant kai kurių erodavusių paviršių.

Difuzinio apdorojimo procesas yra vadinamas cementavimu. Pavyzdžiui, siekiant gauti chromo dangas, metalinės dalys kaitinamos autoklave su chromo druskomis. Chromas pereina į dujinę fazę ir tada gali difunduoti į metalo paviršių. Netirpi, chromo turinti fazė susidaro mažėjant patenkančio chromo kiekiui iš išorės į vidų. Chromo kiekis įprastai būna ne mažiau kaip 12 %, kai gylis yra 0,1 mm. Atsparumas korozijai yra beveik toks pat kaip ir nerūdijančio chrominio plieno, tačiau gamybos išlaidos yra mažesnės.

Lengvųjų lydinių metalų, tokių kaip cinkas, aliuminis ir kitų, paviršius yra apipurškiamas dulkinės formos medžiagomis, naudojant specialius pistoleto formos prietaisus. Metalų dangos, sudarytos šiuo būdu, įprastai yra labai poringos, todėl beveik visada reikalingas papildomas dažymas.

Organinės dangos, tokios kaip dažai, lakai ir panašios medžiagos yra sudarytos iš rišiklio (pavyzdžiui, sėmenų aliejaus ar chloruoto latekso), pigmentų (organinių ar neorganinių), įprastinių tirpiklių (pavyzdžiui, vaitspirito ir naftos), užpildų ir priedų. Kad danga tarnautų ilgai, turi būti įvykdytos tokios sąlygos:

- 1) Saugomasis paviršius turi būti geros formos;
- 2) Mažiausias dažų sluoksnio storis turi atitikti specifikacijas;
- 3) Tinkami dažai turi būti parinkti darbo metu;
- 4) Dažai turi būti tinkamai panaudoti.

Jeigu bent viena iš šių sąlygų neįvykdoma, tikėtinas dažų dangos gyvavimo laikas, 15 – 20 metų, žymiai sumažėja.

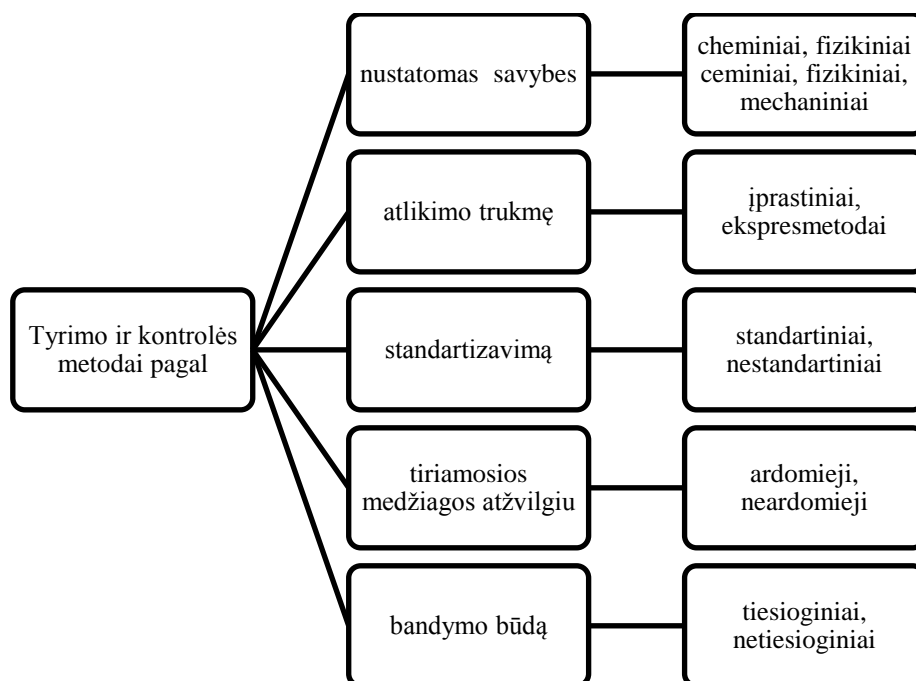
Skirtumai tarp dažų dangų ir apsauginių dangų sluoksnių nėra aiškiai apibrėžti. Pagrindinis dažų pranašumas yra tas, kad jų dangos gali būti pritaikytos paprastesniais metodais (pavyzdžiui, teptuku) plonais sluoksniais. Siekiant gauti gerą apsauginę dangą, yra būtina dengti keliais sluoksniais (Knöfel, 1978).

1.2. Metalo tyrimų ir bandymų metodai

Medžiagų tyrimams ir bandymams naudojami įvairūs metodai. Jais nustatomi medžiagos struktūros parametrai (submikrostruktūra, mikrostruktūra, mezostruktūra, makrostruktūra), būsenos parametrai (tankis, poringumas, tuštumingumas, dispersiškumas), medžiagos sudėtis (cheminė, mineralinė, fazinė), medžiagoje vykstantys procesai (kietėjimo, struktūros formavimo, energijos perdavimo, struktūros virsmų, masės kaitos), fizikinės savybės (veikiant drėgmei, šilumai, dujoms ir vandens garams, aukštai temperatūrai, ugniai, garso bangoms, elektrai, radiacijai), cheminės savybės (cheminis aktyvumas, cheminis atsparumas), mechaninės savybės (stipris, atsparumas smūgiams, deformacijos, kietumas, dilumas, dėvėjimasis, nuovargis), kompleksinės savybės (korozija, senėjimas, ilgalaikiškumas), defektai (vidinės struktūros, intarpai, išoriniai).

Tyrimo ir kontrolės metodų klasifikacija pateikta 22 paveiksle.

Metalui tirti dažniausiai naudojami medžiagų mechaninių savybių tyrimo metodai ir medžiagų struktūros tyrimo metodai. Visos medžiagos tiriamos pagal standartuose nurodytą metodiką (Naujokaitis, 2005).



22 pav. Tyrimo ir kontrolės metodų klasifikacija
(Šaltinis: Elzbutas, 2007)

1.2.1. Mechaninių metalo savybių tyrimo metodai

Tiriant mechanines medžiagų savybes, iš tiriamosios medžiagos gaminami tam tikros formos bandiniai, kurie bandymo mašinoje apkraunami ir deformuojami, dažniausiai iki suirimo.

Taikant medžiagų mechaninių savybių tyrimo metodus tiriamos šios medžiagos savybės: stipris, atsparis smūgiams, atsparis deformacijoms, kietumas, dilumas, dėvėjimasis, nuovargis.

Stipris – išorinių apkrovų veikiamos medžiagos savybė priešintis deformavimuisi ar ardymui.

Dažniausiai metalo stipris tiriamas atliekant tempimo ir gniuždymo bandymus. Taikant šį metodą, bandinys deformuojamas nedideliu pastoviu greičiu.

Kietumas – medžiagos savybė priešintis kietesnės medžiagos skverbimuisi į ją.

Metalo kietumas dažniausiai nustatomas tam tikra jėga įspaudus nustatyto dydžio antgalį – indikatorių ir išmatavus įspaudo plotą arba gylį. Kietumas geriausiai apibūdina medžiagos pasipriešinimą vietinei deformacijai, leidžia spręsti apie jos atsparį dilimui, taip pat susijęs su medžiagos stiprumu ir plastiškumu (Naujokaitis, 2005).

Metalų kietumui nustatyti gali būti naudojami šie metodai:

1. Brinelio metodas,
2. Rokvelo metodas,
3. Vickerso metodas.

Brinelio metodas taikomas nedidelio kietumo metalams, polimeriniams dirbiniams. Nustatant metalo kietumą Brinelio metodu, į jį spaudžiamas grūdintas plieninis rutuliukas. Kietumas pagal Brinelį yra spaudimo jėgos ir įspaudo sferinio paviršiaus ploto santykis. Brinelio kietumas žymimas raidėmis HB ir išreiškiamas kgf/mm^2 . Rutuliuko skersmuo D ir apkrovos dydis parenkami tokie, kad įspaudo skersmuo d būtų: $d = (0,25 \div 0,5)D$. Brinelio metodą galima taikyti tik tada, kai bandinys yra ne mažiau kaip 10 kartų storesnis už įspaudo gylį. Kietumas Brinelio vienetais susijęs su metalo tempimo stiprio riba (Naujokaitis, 2005).

Kietumas pagal Brinelį apskaičiuojamas pagal formulę (Elzbutas, 2007):

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Čia: HB – kietumas pagal Rokvelą;

F – rutuliuko apkrova, kg;

D – rutuliuko skersmuo, mm;

d – įspaudo skersmuo, mm;

Pagal apskaičiuotą kietumo rodiklį HB galima apskaičiuoti plieno ribinį stiprį σ_l (MPa):

$$\sigma_l = 0,35 HB$$

Rokvelo metodas taikomas kietiems metalams, grūdintiems plienams. Nustatant metalo kietumą Rokvelo metodu, į jį spaudžiamas deimantinis kūgis. Kietumas Rokvelo metodu nustatomas taip: iš pradžių įspaudžiama 10 kgf apkrova ir matuojamas įspaudo gylis h_0 , po to sudaroma pagrindinė apkrova ir matuojamas įspaudo gylis h . Tiriant kietas medžiagas, deimantinis kūgis, kurio viršūnės kampas 120° , įspaudžiamas 150 kgf jėga. Šiuo atveju kietumas pagal Brinelį

žymimas HRC ir nustatomas skalėje C (matavimo ribos – nuo 20 iki 65 vienetų). Tiriant labai kietas medžiagas (pvz., kietlydinius) tas pats kūgis išspaudžiamas 60 kgf jėga. Šiuo atveju kietumas pagal Brinelį žymimas HRA ir nustatomas skalėje A (matavimo ribos – nuo 70 iki 85 vienetų). Kietumas išreiškiamas taip (Naujokaitis, 2005):

$$HRC (HRA) = 100 - \frac{h - h_0}{0,002}$$

Čia: $HRC (HRA)$ – kietumas pagal Rokvelą;

h_0 – išpaudo gylis, kai pradinė apkrova 10 kgf;

h – išpaudo gylis, esant pagrindinei apkrovai.

Vikerso metodas taikomas plonasieniams gaminiams tirti, mikrokietumui nustatyti. Nustatant metalo kietumą Vikerso metodu, į jį išspaudžiama keturšonė piramidė, kurios viršūnės kampas tarp priešingų plokštumų – 136° . Kietumas pagal Vickersą skaičiuojamas pagal apkrovą ir išpaudo paviršiaus plotą. Vikerso kietumas žymimas raidėmis HV (Naujokaitis, 2005).

Tarp skirtingais metodais nustatytų kietumo reikšmių nėra tiesioginės priklausomybės (Naujokaitis, 2005).

Dilumas – medžiagos masės ir tūrio sumažėjimas, veikiant trinties apkrovoms. Kuo medžiaga kietesnė, tuo jos dilumas yra mažesnis. Medžiagų dilumas nustatomas bandymo mašinomis: trynimo skrituliu, smėliasrovio aparatu ir kt. Dilumas išreiškiamas bandinio masės nuostolio ir tiriamo bandinio ploto santykiu (Naujokaitis, 2005):

$$D_m = \frac{m - m_1}{A}$$

Čia: m – bandinio masė prieš bandymą, kg;

m_1 – bandinio masė po bandymo, kg;

A – dilinamos medžiagos paviršiaus plotas, m^2 .

Nusidėvėjimas – medžiagos irimas, veikiant kartu trinties ir smūginėms apkrovoms. Medžiagų dilumas nustatomas bandymo mašinomis: sukamuose būgnuose, iš dalies pripildytuose plieninių arba ketinių rutulių). Nusidėvėjimo laipsnis nusakomas santykinu nuostoliu, procentais (Naujokaitis, 2005):

$$R_n = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{m_1}$$

Čia: m_1 – bandinio masė prieš bandymą;

m_2 – bandinio masė po bandymo.

Trapumas – medžiagos savybė suirti staiga be žymesnių plastinių deformacijų. Trapiųjų medžiagų ypatybė yra ta, kad jų stiprio riba tempiant yra žymiai mažesnė už stiprio ribą gniuždant, jos blogai priešinasi smūgiui (Naujokaitis, 2005).

Smūginis tūsumas – medžiagos savybė priešintis suirimui, veikiant smūginei – dinaminei apkrovai. Suirimas gali būti tūsumas, kuriam būdingos plastinės deformacijos, kurios pristabdo irimą, ir trapusis, kuris įvyksta staiga, be plastinių deformacijų. Tos pačios medžiagos suirimas įvairiomis sąlygomis gali būti ir tūsumas, ir trapusis. Medžiagos polinkį trapiajam suirimui nusako smūginio tūsumo charakteristika (Naujokaitis, 2005).

Skaitinės smūginio tūsumo reikšmės nustatomos atliekant smūginio lenkimo bandymus švytuokliniu muštuvu. Bandiniai yra 10×10×55 mm dydžio su tam tikra įpjova. Smūginio tūsumo skaitinė reikšmė apskaičiuojama pagal formulę (Naujokaitis, 2005):

$$KC = K/A$$

Čia: K – suardymui sunaudotas darbas, J;

A – bandinio skerspjūvio ties įpjova ploto vienetą, m².

$$K = F(H - h)$$

Čia: F – muštuvo svorio jėga;

H – jėgos pradinis pakėlimo aukštis;

h – aukštis, iki kurio muštuvas pakilo suardžius bandinį.

Skaitinės smūginio tūsumo reikšmės neįtraukiamos į gaminių stiprio skaičiavimus, tačiau rodo šių gaminių lyginamąjį patikimumą: iš dviejų vienodo stiprio detalių geriau veiks ta, kurios tūsumas yra didesnis (Naujokaitis, 2005).

1.2.2. Metalų struktūros tyrimo metodai

Metalų struktūrai tirti dažniausiai taikomi mikroskopiniai tyrimo metodai, spektrinės analizės metodai ir radiaciniai tyrimo metodai.

Mikroskopiniai tyrimo metodai

Optinės mikroskopijos metodas dažniausiai taikomas tiriant kristalų formas ir dydžius, kristalų augimą ir jų defektus, medžiagų fazinius virsmus, atpažįstant mineralus (Naujokaitis, 2005). Mikroskopinė analizė taip pat naudojama konstrukcinių medžiagų irimo procesams tirti (plyšių identifikavimui) (Elzbutas, 2007).

Optiniu mikroskopu galima stebėti iki 0,2 μm dydžio objektus (Elzbutas, 2007).

Pagal tiriamų medžiagų savybes parenkami specialios konstrukcijos mikroskopai, tam tikri mikroskopijos metodai (Naujokaitis, 2005).

Šviesos lauko metodu tiriami objektai, kurie į juos krintančių spindulių dalį absorbuoja, dalį atspindi ir dalį išsklaido. Šviesų lauką sukuria į tiriamąjį objektą nepatenkantys šalia jo sklindantys spinduliai. Šiuo metodu tiriami neskaidrūs objektai (metalai, jų rūdos ir t.t.). Galima tirti ir skaidrius objektus, tačiau jie turi turėti šviesą absorbuojančių elementų (mineralų, metalo lydinių šlifai ir t.t.).

Fazinio kontrasto metodu tiriami objektai, kurie pakeičia pro jį sklindančios bangos fazę. Pokyčiai dažniausiai fiksuojami fotografinėje plokštelėje. Susidaro fazinis kontrastinis tiriamojo objekto struktūros vaizdas. Šiuo metodu tiriami skaidrūs bespalviai objektai, kurių dalelės yra nevienodo optinio tankio. Tiriamojo objekto struktūros kontrastiškumą galima padidinti naudojant specialius mikroskopo priedus: objektyvus, kondensatorius.

Interferenciniu metodu tiriami objektai, kai kiekvienas šviesos spindulys skaidomas į du – vienas sklinda objektu, o kitas eina šalia. Pirmasis spindulys atsilieka nuo antrojo – spindulių eigos skirtumas nusako tiriamojo objekto optines savybes. Abiems spinduliams susitikus okuliare jie interferuoja. Naudojant šį metodą galima apskaičiuoti tiriamojo objekto sausosios medžiagos masę, jos koncentraciją, objekto storį, spindulių lūžio rodiklį. Šiuo metodu tiriami skaidrūs bespalviai objektai (plonos polimerinės plėvelės).

Poliarizaciniu metodu tiriamieji objektai stebimi poliarizuotoje šviesoje. Šiuo metodu galima tirti mineralus ir metalų lydinius.

Liuminescenciniu metodu tiriami ultravioletiniais arba mėlynaisiais šviesos spinduliais paveikti objektai, švytintys patys arba kai švyti jų sugerti dažai. Šiuo metodu daugiausia tiriami skaidrūs objektai, kurių elementai nevienodai sugeria ultravioletinius spindulius, kuriais apšviečiamas tiriamasis objektas.

Infraraudonųjų spindulių metodu tiriami objektai, kurie yra apšviečiami infraraudonaisiais spinduliais. Tiriamojo objekto atvaizdas matomas tik nufotografuotas arba elektroniniu prietaisu perkeltas į ekraną. Šiuo metodu tiriami neskaidrūs objektai (mineralai, kristalai, stiklai).

Mikroskopijos būdu galima tirti objektų sandarą, fizikines savybes, mineralų, metalų, kristalų, uolienu, cheminių medžiagų sudėtį (Naujokaitis, 2005).

Metalų sandara, grūdelių forma, dydis, fazių skaičius ir išsidėstymas matomas tik labai padidinus (Naujokaitis, 2005).

Tyrimams bandiniai specialiai paruošiami, t. y. daromi mikrošlifai – tiriamos medžiagos gabalėlis perpjaunamas norima kryptimi, pjūvio plokštuma šlifuojama ir poliruojama, o paskui dar ryškinami, dažniausiai išėsdinant poliruotą paviršių rūgštinti (Naujokaitis, 2005).

Elektroninis mikroskopas naudojamas tirti pavienių submikroskopinių dalelių kristalų dydžius ir formą, kristalų augimo ir irimo skystosiose ir kietosiose fazėse procesus, procesus, vykstančius tarp grūdelių, difuzijos procesus reakcijos metu, fazinius virsmus termiškai apdorojant objektą ar jam auštant, deformacijas ir irimo procesus ir kt (Naujokaitis, 2005).

Elektroniniu mikroskopu galima stebėti iki 2 – 5 nm dydžio objektus.

Elektroniniai mikroskopai pagal veikimo principą yra skirstomi į: peršviečiamuosius, emisinius, atspindžio, rastrinius, veidrodinius, šešėlinius (Elzbutas, 2007).

Peršviečiamuoju elektroniniu mikroskopu tiriami labai ploni objektai. Šio mikroskopo elektroninė schema yra analogiška optinio mikroskopo optinei schemai, skirtumas yra tas, kad elektroniniame mikroskope vietoj paprastų optinių lęšių naudojami elektroniniai lęšiai. Peršviečiamojo elektroninio mikroskopo skiriamoji geba yra apie 2 nm.

Emisiniame elektroniniame mikroskope objekto atvaizdą atkuria objekto emituoti elektronai. Emisinio elektroninio mikroskopo skiriamoji geba yra apie 10 nm. Ji yra proporcinga emituotų elektronų energijai ir atvirkščiai proporcinga katodo elektrinio lauko stiprumui.

Atspindžio elektroniniame mikroskope objekto atvaizdą atkuria atspindėti elektronai. Atspindžio elektroninio mikroskopo skiriamoji geba priklauso nuo elektronų atspindžio kampo: jei elektronų atspindžio kampas $\sim 90^\circ$, skiriamoji geba bus maža, jei daug didesnis – skiriamoji geba bus didelė – apie 10 nm.

Rastriniame elektroniniame mikroskope objekto atvaizdas gaunamas naudojant elektroninį zondą (daug kartų sumažintą elektronų šaltinio atvaizdą), kuriuo pereinamas tiriamasis paviršius. Rastrinio elektroninio mikroskopo skiriamoji geba yra apie 10 – 20 nm. Ji priklauso nuo zondo skersmens ir tiriamojo objekto storio.

Veidrodiniu elektroniniu mikroskopu tiriami stambių objektų paviršiai. Objekto atvaizdas gaunamas atspindžio elektronus nukreipus į ekraną. Veidrodinio elektroninio mikroskopo skiriamoji geba yra apie 100 nm. Ji yra proporcinga stabdomojo lauko prie objekto paviršiaus įtampai.

Šešėliniu elektroniniu mikroskopu tiriami ploni objektai. Objekto atvaizdas gaunamas elektroniniu zonu apšvietus objekto paviršių. Nelygumų vietos ekrane vaizduojamos šešėliais. Šešėlinio elektroninio mikroskopo skiriamąją gebą lemia zondo skersmuo ir elektronų difrakcija.

Tyrimams dažniausiai naudojamas peršviečiamieji ir rastriniai elektroniniai mikroskopai.

Naudojant skenuojantį elektroninį mikroskopą galima aptikti pirmuosius plieno irimo židinius, kurių dydis siekia kelis mikronus, mikroplyšius bei valkšnumo poras grūdelių ribose. Naudojant peršviečiantįjį elektroninį mikroskopą galima matyti plienų atskirų porų ir grūdelių formą, dydį bei pasiskirstymo pobūdį, tirti mikrostruktūros degradacijos pradžią, vystymąsi ir pabaigą.

Spektrinės analizės metodai

Rentgeno spinduliai yra skersinės elektromagnetinės prigimties bangos. Šių bangų ilgis $\lambda = 10^{-12} - 10^{-8} m$. Rentgeno spindulius sąlygiškai galima skirstyti į kietuosius, kurių bangos ilgis $\lambda \leq 0,2 \cdot 10^{-9} m$ ir minkštuosius, kurių bangos ilgis $\lambda > 0,2 \cdot 10^{-9} m$ (Elzbutas, 2007).

Rentgeno metodų esmė: pagal atsispindėjusių spindulių difrakcinį vaizdą nustatomos tiriamosios medžiagos struktūrinės charakteristikos. Rentgeno spindulių difrakciją sukelia kristalinės gardelės, molekulės, atomai.

Ožė spektroskopija – elektroninė spektroskopija, tirianti sužadintų atomų energijos lygmenis.

Pagal žadinimo būdą skirstoma:

- elektroninė – sužadinama elektronų pluoštu,
- fotoelektroninė – sužadinama fotonais (dažniausiai UV srities),
- joninė – sužadinama jonų pluoštu.

Ožė elektronų spektroskopiją galima naudoti tiriant medžiagų paviršių, cheminės sudėties skirtumus, elementų pasiskirstymą paviršiuje ir informacijai apie jų cheminį būvį gauti. Naudojant šį metodą galima nustatyti labai mažus elementų kiekius bei tirti specialiai neapdorotus ir pakankamai grubius paviršius.

Rentgenomikroskopija – metodų visuma, kuriais tiriama objekto mikroskopinė sandara panaudojant rentgeno spindulius ir naudojant rentgeno mikroskopą.

Šis metodas taikomas metalų gamyboje, taip pat tiriant plonų dangų ir mažų detalių apdailos kokybę, objektų vidinę sandarą bei kristalų defektus (Naujokaitis, 2005).

Rentgenografinės analizės metodais tiriama (Elzbutas, 2007):

- medžiagos kokybinė, kiekybinė, mineralinė ir fazinė sudėtis (rentgenofazinė analizė);
- kristalinių medžiagų elementariosios gardelės forma, dydis, tipas, simetrija, taip pat geometriniai matmenys (rentgenostruktūrinė analizė);
- kristalų defektai;
- vidiniai defektai bei intarpai (rentgenodefektoskopija);
- medžiagų tekstūra, dispersinių dalelių dydis, jų orientacija ir t. t.

Svarbiausi rentgenostruktūrinės analizės metodai monokristalams tirti yra: Laujės (nejudamas kristalas švitinamas stabdomaisiais rentgeno spinduliais), sukamojo arba virpančiojo kristalo (kristalas švitinamas monochromatiniais rentgeno spinduliais) ir rentgenometrinis (difrakcijos vaizdą fotografiniame filme registruoja goniometras, o difrakcijos dėmių pajuodimą matuoja mikrofotometras).

Polikristalams tirti naudojamas Debajaus ir Šererio metodas. Bandinys, šiuo atveju, yra cilindrinio stulpelio formos ir supresuojamas iš tiriamosios medžiagos miltelių.

Rentgenospektrinė analizė – medžiagos elektroninės sandaros tyrimas pagal emisinius, absorbcinius ar fotoelektronų rentgenospektrus bei jų intensyvumą, kuris priklauso nuo stabdomų dalelių energijos.

Rentgeno spindulių spektrai pagal sužadinimo būdą gali būti (Naujokaitis, 2005):

- stabdomieji – spektrai yra ištisiniai ir susidaro stabdant medžiagoje greitas elektringąsias daleles;

- būdingieji – spektrai yra linijiniai ir susidaro susidūrus medžiagos atomui su didelės energijos elektringąja dalele arba pirminių rentgeno spindulių kvantu ir iš sužadinto atomo vienu iš vidinių sluoksnių (K, L, M, N, O, P) išlėkus elektronui.

Atliekant rentgeno spektrinę analizę, galima nustatyti elementinę medžiagos sudėtį, cheminius ryšius, atomo vidinius energijos lygmenis.

Radiaciniai tyrimo metodai naudojami medžiagų vidinei sandarai tirti. Tyrimams gali būti naudojamas α , β , γ dalelių spinduliavimas, neutronų bei protonų srautas. Mažiausiai skvarbūs – α spinduliai, šiek tiek skvarbesni – β spinduliai, skvarbiausi – γ spinduliai, kurie yra tokios pačios prigimties kaip ir rentgeno spinduliai. Neutronų, protonų bei α ir β dalelių srautams būdingas dalelinis spinduliavimas. Pastarosios dalelės (α ir β) dujinėje aplinkoje sužadina jonizaciją, todėl jų srautai naudojami medžiagoms tirti dujinės analizės metodu (Elzbutas, 2007).

2. EKSPERIMENTINĖ DALIS

2.1. Eksperimentų metodika

2.1.1. Metalo paviršiaus būklės vizualinė analizė

Metalo paviršiaus būklės tyrimas buvo atliekamas dvejopai: aprašant tiriamųjų objektų paviršiaus būklę pagal „plika“ akimi matomus defektus ir mikroskopu.

Mikroskopinis tyrimas buvo atliktas, naudojant Celestron skaitmeninį mikroskopą (23 pav.). Šis mikroskopas jungiamas USB laidu prie kompiuterio, kurio ekrane, naudojant specialią programinę įrangą, galima matyti tiriamojo objekto vaizdą, kurį galima priartinti iki 150 kartų bei nufotografuoti arba nufilmuoti su 1,3 megapikselių raiškos kamera. Celestron mikroskope taip pat įmontuotas LED apšvietimas.



23 pav. Celestron skaitmeninis mikroskopas

(Pritaikyta: <http://www.celestron.com/c3/product.php?CatID=81&ProdID=557>)

Tyrimo eiga:

1. Mikroskopas pastatomas tiesiai virš tiriamojo objekto.
2. Naudojant fokusavimo rankenėlę, ekrane gaunamas aiškus vaizdas.
3. Naudojant fotografavimo mygtuką, vaizdas nufotografuojamas.

Pastaba: Priklausomai nuo priartinimo, mikroskopo padėtį su stovo pagalba reikia keisti.

2.1.2. Metalo tyrimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu

Metalo tyrimui buvo naudojamas FEI Quanta 200 FEG skenuojantis elektroninis mikroskopas (24 pav.).



24 pav. Skenuojantis elektroninis mikroskopas

FEI Quanta 200 FEG, tai aukštos skiriamosios gebos skenuojantis elektroninis mikroskopas su Šotki tipo elektronų patranka. Jis gali dirbti tiek aukšto vakuumo, tiek žemo vakuumo režimuose. Juo galima analizuoti bandinius, kurie įprastuose mikroskopuose yra problemiški dėl krūvio efekto, degazuoja ar turi savyje drėgmės. Elektronus greitinančią įtampą galima keisti nuo 200 V iki 30 kV, elektronų srovę iki 100 nA. Didžiausia mikroskopu pasiekiami skiriamoji geba: 1,2 nm (aukštame vakuumo, 30 kV, antriniai elektronai (SE)) (1 lentelė). Mikroskopas komplektuojamas su daugybe detektorių, veikiančių skirtingo slėgio vakuumo: Everhardt-Thornley SE ir BSE (aukštas vakuumas), LFD SE (žemas vakuumas), GSED SE (ESEM vakuumas), puslaidininkinis diodas BSE (aukštas ir žemas vakuumas), IR-CCD (vaizdo kameros stebėjimui). Mikroskopo vakuumo sistema yra sudaryta iš turbomolekulinio siurblio (angl. turbo molecular pump – TMP) (240 l/s), dviejų joninių geterinių siurbių (angl. ion getter pump – IGP) ir dviejų mechaninių rotacinių siurbių (angl. pre-vacuum pump – PVP). Mikroskopo darbinis atstumas: 2-10 mm. Bandinio

staliukas valdomas keturiomis motorizuotomis pavartomis (X, Y, Z ± 25 mm (atsikartojamumas 2 μ m), R 3600, T -15° – iki $+75^\circ$ (rankinis valdymas). Mikroskopas valdomas kompiuteriu per 32-bit grafinę vartotojo sąsają Windows XP aplinkoje. Didžiausia galima nuotraukų skiriamoji geba 4096 x 3536 taškai (TIFF (8- arba 16-bit), BMP, JPEG). Dinaminius eksperimentus galima filmuoti (avi formatu) (<http://www.personalas.ktu.lt/~tomtamu/SEM/sem.htm>).

1 lentelė. Mikroskopo skiriamoji geba naudojant skirtingus darbinis režimus

Aukštas vakuumas (High-vacuum)	Žemas vakuumas (Low-vacuum)	Dar žemesnis vakuumas (ESEM)
Skiriamoji geba		
- 1.2 nm prie 30 kV (SE) - 2.5 nm prie 30 kV (BSE) - 3.0 nm prie 1 kV (SE)	- 1.5 nm prie 30 kV (SE) - 2.5 nm prie 30 kV (BSE) - 3.0 nm prie 3 kV (SE)	- 1.5 nm prie 30 kV (SE)
Būdingas slėgis		
$< 6e^{-4}$ Pa	10 iki 130 Pa	10 iki 4000 Pa

Skenuojančiame elektroniniame mikroskope (SEM) yra įmontuotas naujos kartos Bruker firmos rentgeno spindulių energijos dispersijos spektrometras XFlash 4030, kuris šalia vaizdinimo galimybių leidžia atlikti cheminės mikro analizės tyrimus. Spektrometras leidžia kiekybiškai ir kokybiškai įvertinti bandinio sudėtį detektuojant cheminius elementus nuo Boro⁵ iki Americio⁹⁵ pasirinktame taške (1 mm³ tūryje) arba bandinio plote nustatyti paviršiaus atskirų cheminių elementų pasiskirstymo žemėlapi (http://www.personalas.ktu.lt/~tomtamu/SEM/info.htm).

Bruker AXS Microanalysis GmbH QUANTAX EDS sistemą sudaro Bruker XFlash® 4030 rentgeno spindulių energijos dispersijos detektorius, signalų procesorius, valdiklis ir ESPRIT duomenų analizės programinė įranga. EDS silicio slinkties detektorius (angl. Silicon Drift Detectors - SDD) užtikrina 133 eV (Mn K_a) energijos skiriamąją gebą esant 100000 cps duomenų kaupimo greičiui (2 lentelė).

2 lentelė. EDS detektoriaus skiriamoji geba ir kitos savybės

XFlash® 4030	
Aktyvus detektoriaus plotas [mm ²]	30
Didžiausia energijos skiriamoji geba esant 100000 cps [eV]	Mn K _a ≤ 133
	F K _a ≤ 73
	C K _a ≤ 66
Elementų detektavimo ribos	B (5) to Am (95)
Didžiausias įeinančių signalų greitis [cps]	1.000.000
Didžiausias išeinančių signalų greitis [cps]	400.000

Didelis detektoriaus plotas (30 mm²) ir greitaveika leidžia šį detektorių naudoti kintamo slėgio mikroskopuose tiriant nelaidžius bandinius esant mažoms elektronų srovėms. EDS yra valdomas kompiuteriu per 32-bit grafinę vartotojo sąsają Windows XP aplinkoje, kuriame yra

įdiegtas valdiklis (PCI plokštė „IO-Scan“), atliekanti SEM skanavimo valdymą, SEM detektoriaus parodymų nuskaitymą ir EDS detektoriaus valdymą bei duomenų įvedimą/išvedimą į signalų apdorojimo įrenginį („SVE III“). EDS matavimų metu SEM greitinančiosios įtampos nustatymai, darbinis atstumas, automatinio/išorinio skanavimo valdymas yra atliekamas naudojant DCOM protokolą (EDS ir SEM valdantys kompiuteriai sujungti į tinklą). EDS matavimai ir rezultatų analizė yra atliekama programa ESPRIT (<http://www.personalas.ktu.lt/~tomtamu/SEM/eds.htm>).

2.1.3. Metalo kietumo bandymas

Metalo kietumo bandymas buvo atliekamas Vickerso metodu. Vickerso kietumo bandymas atliekamas pagal standartą *LST EN ISO 6507-1:2006 „Metalai. Vickerso kietumo bandymas. 1 dalis. Bandymo metodas“*.

Vickerso kietumo bandymas buvo atliktas naudojant universalią Zwick/Roell ZHJ 250 bandymų mašiną (25 pav.). Šis įrenginys komplektuojamas su įvairiais indentoriais, todėl kietumą galima nustatyti ir kitais metodais (Brinelio, Rokvelo). Bandymai gali būti atliekami naudojant iki 25 kG (250 N) krūvį, nors kompiuteris gali perskaičiuoti ir į 30 kG. Įrenginyje yra integruotas kompiuteris, kurio pagalba galima pasirinkti kietumo matavimo skalę (HB, HR, HV ar pan.), nustatyti medžiagos stiprį.

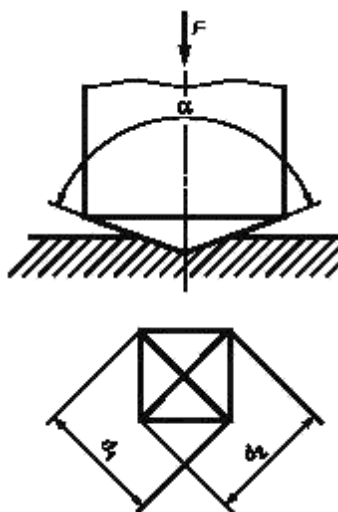


25 pav. Zwick/Roell ZHJ 250 bandymų mašina

Bandymo metu buvo naudojama 30 kG apkrova bei indentorius – keturbriaunė deimantinė piramidė, kurios viršūnės kampas tarp priešingų plokštumų – 136° .

Bandymo eiga:

1. Bandinys dedamas ant stalelio.
2. Stalelis keliamas kol atsiremia į atramą.
3. Paleidžiamas prietaiso mechanizmas.
4. Virš bandinio atsikus mikroskopo objektyvui, reguliuojamom rankenėlėm išmatuojamas įspaudos dydis (d_1 ir d_2), pagal kurį prietaiso kompiuteris parodo Vickerso kietumo ir stiprio reikšmes, taip pat Vickerso kietumo reikšmę, konvertuotą į Brinelio kietumo reikšmę.
5. Bandymas kartojamas keletą kartų iš abiejų bandinio pusių. Bandymo duomenys fiksuojami lentelėje.



26 pav. Apkrovos pridėjimo schema
(Šaltinis: LST EN ISO 6507-1)

Ekperimentui buvo naudotas nuo Šventosios uosto šiaurinio molo liekanose rasto varžto – inkarinio strypo atpjautas ir nušlifluotas (tam, kad įspaudas būtų taisyklingos formos ir geriau matytųsi) plieninis apie 30 mm skersmens ir 15 mm storio bandinys (27 pav.).



27 pav. Bandinio vaizdas iš viršaus ir iš priekio

2.1.4. Metalo tempimo bandymas

Metalo tempimo bandymas atliekamas pagal standartą *LST EN ISO 6892-1:2009 „Metalai. Tempimo bandymai. 1 dalis. Bandymo kambario temperatūroje metodas“*.

Metalo tempimo bandymas buvo atliktas naudojant Zwick/Roell Z100 bandymų mašiną (28 pav.) su kompiuterine sąsaja. Šis įrenginys suteikia galimybę apkrauti bandinį iki 100 kN apkrova, bandymo greitis gali būti nuo 0,0005 iki 600 mm/s.



28 pav. Zwick/Roell Z100 bandymų mašina

Vadovaujantis minėtu standartu, buvo pagaminti 5 mm skersmens plieno bandiniai (29 pav.) iš Šventosios uosto šiaurinio molo liekanose rasto varžto ir šiuolaikinio plieno.



29 pav. Bandinys iš Šventosios molo varžto

Taip pat buvo padaryti bandiniai (30, 31 pav.) iš artilerijos aikštelių pakloto plieno.



30 pav. Bandinys iš artilerijos aikštelių pakloto plieno Nr. 1



31 pav. Bandinys iš artilerijos aikštelių pakloto plieno Nr. 2

Bandymo eiga:

1. Išmatuojami bandinių skerspjūvio matmenys (plotis ir storis), o jei bandiniai apskrito skerspjūvio – skersmuo (dvejomis tarpusavyje statmenomis kryptimis).
2. Apskaičiuojami bandinių skerspjūvio plotai A_0 . Apskrito skerspjūvio bandinių plotas A_0 paskaičiuojamas pagal dvejomis kryptimis nustatytų skersmenų vidurkį.
3. Pradiniai duomenys surašomi į lentelę.
4. Bandinys įstatomas į griebtus ir centruojamas, kad jėga būtų suteikiama kiek įmanoma mažesniu ekscentricitetu.
5. Bandinys bandomas iki nutrūkimo.
6. Nubraižoma įtempių ir deformacijų kreivė.
7. Nustatomi charakteristiniai stipriai: pagal takumo ribą f_y ir pagal stiprumo ribą f_u .

2.1.5. Metalo rentgenografinė analizė

Metalo rentgenografinė analizė atliekama pagal standartą *LST EN 444:1998 „Neardomieji bandymai. Metalinių medžiagų radiografinio tyrimo rentgeno ir gama spinduliuote bendrieji reikalavimai“*.

Rentgeno spinduliuotės difrakcinė analizė atlikta su Rusijoje pagamintu rentgeno spindulių difraktometru DRON-5, naudojant $Cu K \alpha$ spinduliuotę ir Ni filtrą. Minėtas įrenginys yra modernizuotas (su kompiuterine sąsaja). Rentgeno spindulių detektoriaus sukimosi žingsnis $0,02^\circ$, sukimo kampas 2θ (2Θ) – nuo 3 iki 70° . Impulsų intensyvumo matavimo trukmė – $0,5$ s, įtampa – apie 30 kV, srovės stiprumas – apie 20 mA. Tiriamos medžiagos identifikuotos pagal kompiuterinę PDF – 2 DATA duomenų bazę (JAV). Visi bandiniai tirti miltelių metodu: tiriamoji medžiaga buvo grūstuvėliu susmulkinta į $5 - 50 \mu m$ skersmens miltelius ir supresuota į „tabletę“.

Bandymo eiga:

1. Tiriamoji medžiaga susmulkinama ir gauti milteliai supresuojami į tabletę.
2. Bandinys įtvirtinamas laikiklyje.
3. Bandinys veikiamas rentgeno spinduliais.
4. Užrašoma ir iššifruojama tiriamosios medžiagos rentgenograma.
5. Identifikuojama medžiaga.

2.1.6. Metalo optinė emisinė analizė

Metalo optinė emisinė analizė atliekama pagal standartą *LST CR 10320:2006 „Mažai legiruotų plienų optinė emisinė analizė (įprastinis metodas). C, Si, S, P, Mn, Cr, Ni ir Cu nustatymo metodas“*.

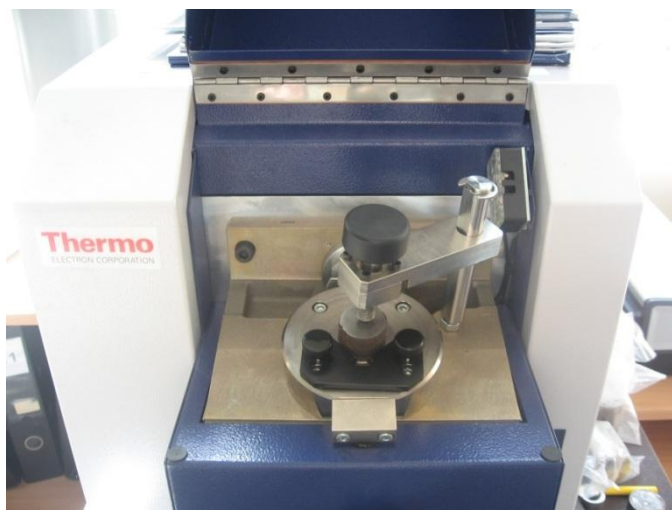
Metalo optinė emisinė analizė buvo atlikta naudojant Thermo Scientific ARL QuantoDesk optinės emisinės analizės spektroskopą (32 pav.) su kompiuterine sąsaja. Šiuo įrenginiu galima atlikti įvairių metalų cheminę analizę, kuri atliekama naudojant argono dujas.



32 pav. ARL QuantoDesk įrenginys

Bandymo eiga:

1. Tiriamasis objektas įtvirtinamas įrenginyje į tam skirtą vietą (33 pav.).
2. Uždaromas įrenginio gaubtas.
3. Naudojant kompiuterį pradedamas bandymas.
4. Bandymas kartojamas kelis kartus, keičiant tiriamojo objekto padėtį. Gaunami rezultatai fiksuojami kompiuterio ekrane.



33 pav. Bandinio įtvirtinimas įrenginyje

2.2. Eksperimentų rezultatai

2.2.1. Metalo paviršiaus būklės vizualinės analizės rezultatai

Tarp Melnragės ir Girulių rasto varžto paviršiaus būklė

Pajūryje tarp Melnragės ir Girulių buvo rastas korodavęs varžtas. Šis varžtas buvo parsivežtas į laboratoriją, apžiūrėtas, pasvertas ir išmatuotas. Matavimai buvo atlikti tiek prieš nuvalant rūdis, tiek nuvalius jas. Per visą varžto ilgį matosi susidarę daugybė korozijos produktų (34 pav.).



34 pav. Inkarinis varžtas prieš nuvalant susidariusius korozijos produktus

Ypač daug korozijos produktų yra susidarę varžto viršutinėje (35 pav.), vidurinėje (36 pav.) ir apatinėje (37 pav.) dalyje.



35 pav. Korozijos produktai inkarinio varžto viršutinėje dalyje



36 pav. Korozijos produktai inkarinio varžto vidurinėje dalyje



37 pav. Korozijos produktai inkarinio varžto apatinėje dalyje

Kadangi varžto įsriegta dalis buvo aplipusi betonu (38 pav.) ir abiejuose varžto galuose yra po metalinę plokštelę, tai tikėtina, kad šis varžtas buvo naudojamas kaip inkarinis.



38 pav. Įsriegta inkarinio varžto dalis

Prieš atliekant matavimus varžtas buvo pasvertas – jo svoris nenuvalius susidariusių korozijos produktų buvo 3833 g. Po to buvo atliekami matavimai nenuvalius korozijos produktų nuo varžto. Nustatyta, kad varžto ilgis kartu su korozijos produktais yra ~745 mm, o skersmuo, dėl susidariusių korozijos produktų, svyruoja nuo 24 iki 54 mm. Viršutinės poveržlės (plokštelės) storis, nenuvalius rūdžių, siekia iki 57 mm, o matmenys 100 × 110 mm. Varžto galvos matmenys nenuvalius korozijos produktų: 45 ÷ 72 mm, aukštis – 23 ÷ 43 mm. Apatinės poveržlės (plokštelės) matmenys yra 65 ÷ 74 mm, aukštis – 6 ÷ 23. Apatinėje inkarinio varžto dalyje šiek tiek matoma veržlė, tačiau dėl susidariusių korozijos produktų jos išmatuoti neįmanoma.

Atlikus matavimus, varžtas buvo nuvalytas (39 pav.) nuo susidariusių korozijos produktų. Tam tikslui buvo naudojamas metalinis plaktukas. Korozijos produktai nusivalė palyginti nesunkiai. Po to dar kartą buvo atliekami varžto matavimai. Nustatyta, kad varžto ilgis yra ~721 mm, o skersmuo visame varžto ilgyje skiriasi: viršutinėje varžto dalyje apie 28 mm, vidurinėje – apie 24 mm, apatinėje – apie 23 mm.



39 pav. Inkarinis varžtas nuvalius susidariusius korozijos produktus

Varžto galva yra keturkampė: matmenys – 42×42 mm, o aukštis – $20 \div 24$ mm. Tiesa, bevalant korozijos produktus, dalis varžto galvos nuskilo (40 pav.). Apžiūrėjus matosi, kad varžto galva buvo sukorodavusi iš vidaus, todėl tikėtina, kad čia pasireiškusi tarpkristalinė korozija. Kadangi nesimato sriegių, greičiausiai varžto galva buvo užpresuota arba išlieta išvien su varžtu.



40 pav. Nuskilusi inkarinio varžto galvos dalis

Viršutinės plokštelės – poveržlės (41 a) matmenys, nuvalius korozijos produktus, yra 100×100 mm, o aukštis – $5 \div 7$ mm. Beje ši plokštelė (kaip ir apatinė), nuvalius korozijos produktus, pradėjo laisvai slankioti. Apatinės plokštelės – poveržlės (41 b) matmenys yra $(57 \div 59) \times (62 \div 65)$ mm, aukštis – $4 \div 6$ mm.



41 pav. Inkarinio varžto plokštelės nuvalius rūdis

Nuvalius korozijos produktus pradėjo matytis apatinė varžlė, kurios iki to laiko nebuvo matyti. Tai šešiakampė varžlė, kurios matmenys yra 32×29 mm, o aukštis apie 17 mm. Inkarinio varžto įsriegtos dalies ilgis yra apie 65 mm, o varžto skersmuo toje dalyje – apie 18 mm. Beje, įsriegtoje inkarinio varžto dalyje pastebėtas kūgiškumas (42 pav.).



42 pav. Įsriegtos varžto dalies kūgiškumas

Nuvalius korozijos produktus, ant varžto buvo pastebėta susidariusių plyšelių ant varžto galvos ir apatinėje varžto dalyje (43 pav.). Apatinėje varžto dalyje esančio plyšelio ilgis yra apie 12 mm, plotis – apie 4 mm, gylis – apie $1 \div 2$ mm. Matomai čia bus pasireiškusi plyšinė korozija. Per visą varžto ilgį yra gana smarkiai pasireiškusi pitingo (taškinė) korozija. Tiesa, viršutinėje varžto dalyje kiek mažiau.



43 pav. Inkarinio varžto korozija

Nuvalius nuo varžto korozijos produktus ir atlikus matavimus varžtas buvo pasvertas. Nustatyta, kad jo svoris, nuvalius korozijos produktus – 3235 g. Taigi svoris sumažėjo apie 16%.

Šventosios uosto šiaurinio molo liekanose rasto varžto būklė

Šventosios uosto šiaurinio molo liekanose (tarp supuvusių medinių polių ir molo sutvirtinimo akmenų, periodiškai bangų užliejamoje kranto dalyje, 44 pav.) buvo rastas korodavęs varžtas – inkarinis strypas. Sprendžiant iš jo padėtis radimvietėje, šis varžtas buvo panauotas suveržti medinius molo polių. Jis buvo paimtas, atsivežtas į laboratoriją, apžiūrėtas, išmatuotas ir panaudotas fizikiniams, metalotyriniams bei korozijos produktų tyrimams.



44 pav. Inkarinio varžto padėtis radimvietėje

Iš pažiūros panašūs varžtai buvo panaudoti ir kituose Šventosios uosto moluose, todėl jis laikytinas būdingoju konstrukciniu šių statinių elementu. Pavyzdžiui, tokie varžtai dar išlikę pietiniame uosto mole, kur buvo panaudoti medinio, rieduliais užpildyto molo antstato konstrukcijų tvirtinimui prie skersinių sijų (45 pav.).



45 pav. Šventosios uosto pietinio molo griuvėsiai

Išmatavus korodavusį varžtą nustatyta, kad jo ilgis – apie 640 mm, viename jo gale yra stačiakampė galvutė su laisvai strypu slankiojančia, tikėtina, stačiakampe, bet jau korodavusiomis kraštinėmis plokštele (poveržle), o srieginėje dalyje – užsukta veržlė. Korodavusio strypo su veržle ir plokštele (poveržle) masė buvo 4257 g. Vėliau, pašalinus rūdis, jo masė sumažėjo apie 11 proc. Apie 3 ÷ 6 mm storio rūdžių luobelė varžto – strypo paviršiuje sutrūkinėjusi, jos paviršius nelygus, dominuoja 2 ÷ 4 mm gylio išilginiai plyšiai. Šios luobelės storis yra nevienodas – po veržle ir kur dar buvo išlikusi sveika mediena – mažesnis, jūros vandens ir atmosferos poveikiui atvirose vietose – storesnis. Apie 60 parų varžtą su poveržle išlaikius sausoje aplinkoje, kambario temperatūroje, ši metalo korozijos produktų luobelė palyginti lengvai atsiskiria, tik kai kur ją teko padaužyti lengvu metaliniu plaktuku. Tačiau srieginėje varžto dalyje prie plokštelės – poveržlės ir po veržle korozijos produktus pavyko pašalinti ir veržlė ėmė sukiotis tik varžtą kelias savaites išlaikius žibale bei paveikus skvarbiuoju rūdžių surišėju „Penetrating Oil MoS2“.

Varžto galvutės matmenys prieš pašalinant rūdis – 41,8 x 48,0 mm, aukštis – apie 21 ÷ 25 mm atitinkamai žemiausioje ir aukščiausioje vietose. Pašalinus kelių milimetrų storio rūdžių sluoksnį, išlikusio varžto metalo galvutės matmenys sumažėjo. Varžto – strypo sriegis, nuvalius rūdis, pasirodė nukentėjęs palyginti nedaug, ypač toje vietoje, kur buvo užsukta veržlė, jis palyginti stambus (46 pav.).



46 pav. Varžto – strypo srieginė dalis

Jo skersmens ir sriegio žingsnio būta M32x3,5 mm, tačiau dėl metalo korozijos varžto skersmuo šioje vietoje sumažėjo iki 31 mm. Srieginės varžto dalies ilgis – apie 45 mm, užsibaigia jis netaisyklingos formos kūginiu galu (47 pav.). Panašu, kad šis galas, gaminant strypo – varžto ruošinį, buvo tiesiog nulaužtas.



47 pav. Srieginės varžto dalies kūginis galas

Apie 30 mm aukščio (prieš pašalinant rūdis – apie 32 – 33 mm aukščio) šešiabriaunė veržlė yra kūginės formos: viršutinėje dalyje – 42,8 mm pločio, apatinėje dalyje – jau 48,5 mm pločio (matuojant briaunų plotį – atitinkamai 59,2 ir 53,0 mm). Prieš rūdžių pašalinimą, veržlės kūgiškumą pastebėti buvo sunku, o jos plotis buvo apie $50 \div 52$ mm. Pašalinus rūdžių sluoksnį, veržlės kūgiškumas tapo akivaizdesnis (48 pav.), tačiau galima spėti, kad tai yra netolygios korozijos pasekmė: dalis veržlės buvo įsukta (įsiskverbę) į polių medieną, kuri jį apsaugojo nuo korozijos; kita, mediena nepadengta veržlės dalis patyrė intensyvesnį jūros vandens ir atmosferos poveikį, todėl korodavo sparčiau. Šia prielaida apie mažai tikėtiną veržlės kūgiškumą galima pasitikėti ir todėl, kad tokiu atveju jai užveržti būtų reikėję specialaus veržliarakčio.



48 pav. Varžto veržlė pašalinus rūdžių sluoksnį

Laisvai slankiojančios plokštelės – poveržlės forma dėl korozijos tapo netaisyklinga (49 pav.), storis korozijos mažiausiai paveiktose vietose (po varžtu) – apie 7 ÷ 8 mm, varžto strypo kiaurymė – apie 36 mm skersmens.



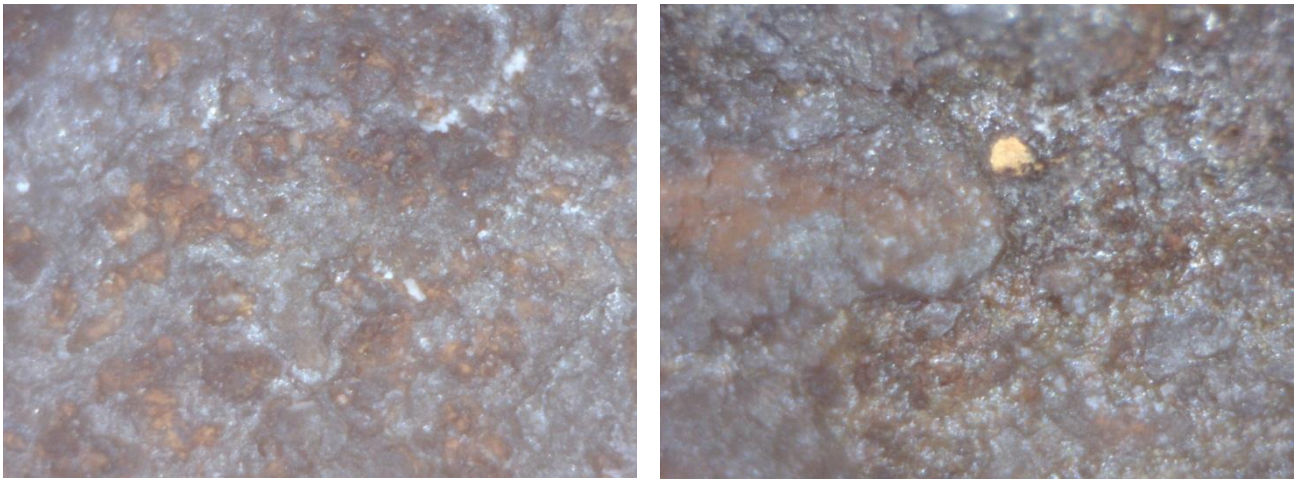
49 pav. Varžto plokštelė – poveržlė

Sprendžiant pagal poveržlės (plokštelės) kiaurymės skersmenį, varžto strypo skersmens nesrieginėje dalyje būta apie 35 mm. Dėl metalo korozijos strypo skersmuo suplonėjo – storičiausioje vietoje (po galvute, kur būta plokštelės, mažiausiai korozijos paveiktoje vietoje) beliko 33 mm skersmens metalo strypas, o daugiausiai korozijos paveiktose strypo vietose (apie 15 cm atstumu nuo galo su sriegiu arba apie 8 cm nuo sriegio pradžios) jo skersmuo sumažėjo iki 25 – 27 mm, tačiau ir čia varžto strypas išsvagotas iki 2 – 3 mm gylio grioveliais. Ar jie korozinės prigimties – abejotina, nes strypo skerspjūvyje akivaizdžiai matomas kūgiškumas (tikėtino valcavimo požymiai).

Šio varžto paviršius taip pat buvo apžiūrėtas mikroskopu. Žemiau pateiktos varžto paviršiaus fotografijos (50, 51 pav.), padarytos šiuo prietaisu. Pateiktuose paveiksluose aiškiai matomi metalo paviršiaus taškinės korozijos židiniai.



50 pav. Varžto paviršiaus vaizdas per mikroskopą priartinus apie 10 – 40 kartų



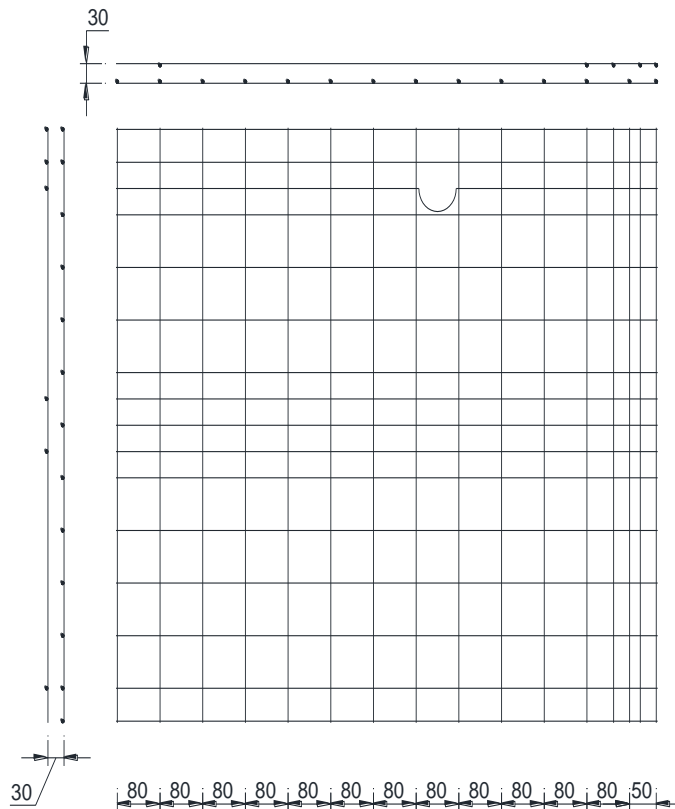
51 pav. Varžto paviršiaus vaizdas per mikroskopą priartinus apie 150 kartų

Apie 12 mėn. sausoje aplinkoje išlaikytos strypo dalies ilgis 38,5 cm, masė – 2534,1 g (su rūdžių sluoksniu). Lengvu metaliniu plaktuku nudažius rūdis, šio masė sumažėja iki 2287,1 (apie 11 proc.).

Remiantis rašytiniais šaltiniais (Šimoliūnas, 1933; Žaromskis, 1998) nustatyta, kad šio varžto skersmuo yra 32 mm, o amžius – 75 metai.

Armatūros tinklo fragmento būklė

Armatūros tinklo fragmentas (53 pav.) buvo paimtas iš gelžbetoninių durų armatūros tinklo (52 pav.), kurios buvo naudojamos Pajūryje esančioje artilerijos baterijoje.



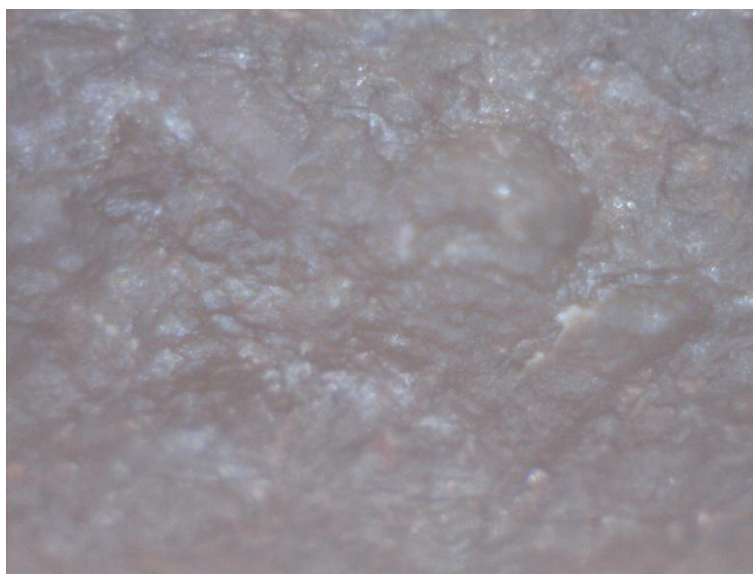
52 pav. Gelžbetoninių durų armatūros tinklas



53 pav. Armatūros tinklo fragmentas

Strypo fragmentas buvo apžiūrėtas ir išmatuotas. Nustatyta, kad jo ilgis yra apytiksliai 92 mm, o skersmuo svyruoja nuo 2 iki 5 mm. Armatūros galuose pastebėtas žymus suplonėjimas – šiose vietose jos skersmuo yra apie 1 – 2 mm. Akivaizdu, kad armatūros strypas yra stipriai pažeistas korozijos. Armatūra yra pažeista ištisinės netolygios korozijos, daugiausia – per strypo vidurį ir jo galuose.

Šis armatūros tinklo fragmentas taip pat buvo apžiūrėtas mikroskopu. Žemiau yra pateikta fotografija (54 pav.), padaryta šiuo prietaisu.



54 pav. Armatūros strypo vaizdas per mikroskopą

Iš tiesų ištisinė armatūros korozija betone nevyksta, nes šarminėje betono terpėje plienas yra pasyvioje būsenoje. Susidarančios plieno paviršiuje apsauginės oksidų plėvelės lėtina geležies tirpimą ir pakankamai ilgai apsaugo armatūrą nuo korozijos. Kai plieninė armatūra depasyvuojasi, tuomet ji pradeda koroduoti.

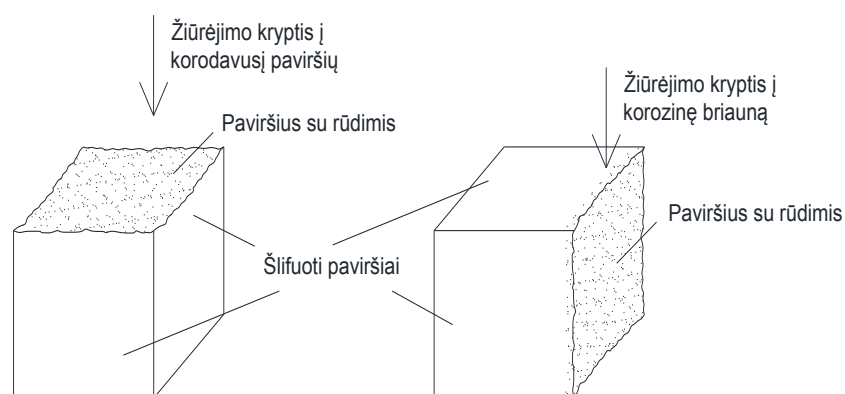
Depasyvasijos priežastys gali būti tokios:

1. Mechaniniai betono pažeidimai (betono sluoksnis nebedengia armatūros);
2. Kai betonas yra rūgščioje terpėje, vyksta betono sluoksnio neutralizacija;
3. Agresyvių korozinių terpių poveikis betonui. Ypač pavojingos savo sudėtyje turinčios chlorido jonų. Tuomet net ir esant $\text{pH} > 12$ pažeidžiamos apsauginės oksidų plėvelės.

Šiuo atveju didžiausią įtaką armatūros korozijai galėjo turėti mechaniniai betono pažeidimai (betonas toje vietoje, iš kur buvo paimtas armatūros fragmentas, iš priekio visiškai nedengė armatūros) ir, žinoma, agresyvi jūrinė aplinka, kurioje yra labai didelė chlorido jonų koncentracija.

2.2.2. Metalo tyrimo skenuojančiu elektroniniu mikroskopu rezultatai

Šio tyrimo metu buvo tiriamas sukorodavęs paviršius ir bandinio briauna (55 pav.).



55 pav. Žiūrėjimo schema

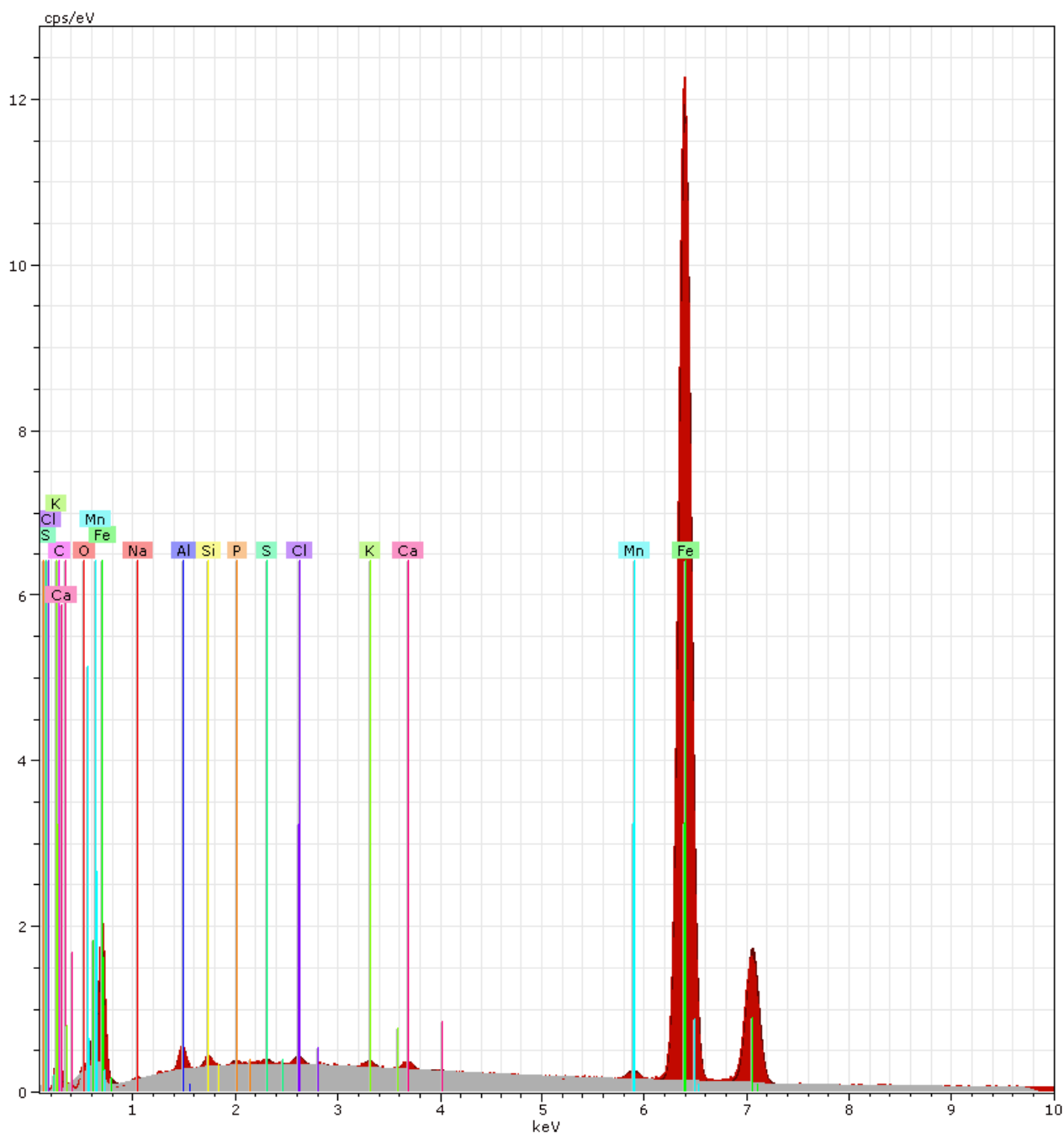
Bandinio sukorodavusio paviršiaus tyrimui buvo naudojamas LFD tipo detektorius, 20 kV elektronus greitinanti įtampa, 3,5 elektronų pluošto skersmuo, 11,4 mm darbinis atstumas, 1000 kartų artinimas. Nustačius šiuos įrenginio parametrus buvo gautas sukorodavusio paviršiaus vaizdas (56 pav.).



56 pav. Sukorodavusio paviršiaus vaizdas priartinus 1000 kartų

Padarytoje nuotraukoje matyti netolygus korodavęs paviršius, akivaizdūs korozijos židiniai.

Siekiant nustatyti korodavusio paviršiaus cheminę sudėtį, su skenuojančiame elektroniniame mikroskope (SEM) įmontuoto rentgeno spindulių energijos dispersijos spektrometro pagalba buvo gautas spektras (57 pav.) bei atlikta cheminė mikro analizė (3 lentelė).



57 pav. Korodavusio paviršiaus spektrograma

Iš gautos spektrogramos matyti, kokie cheminiai elementai pasiskirstę ant korodavusio paviršiaus.

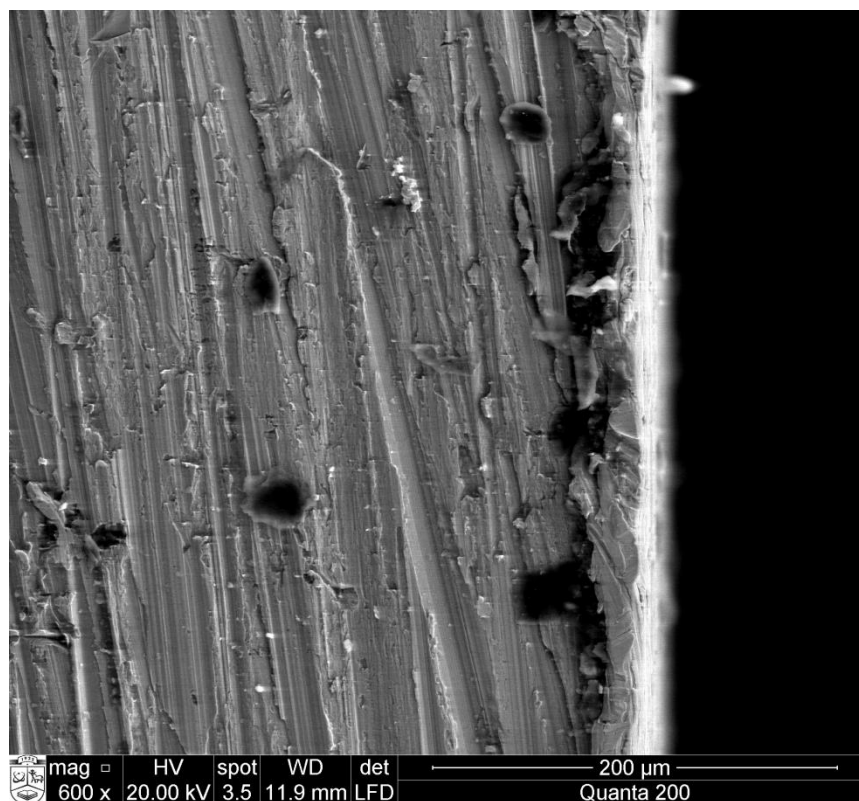
Kitame puslapyje pateiktoje lentelėje pateikti cheminės mikroanalizės rezultatai.

3 lentelė. Korodavusio paviršiaus cheminės mikroanalizės rezultatai

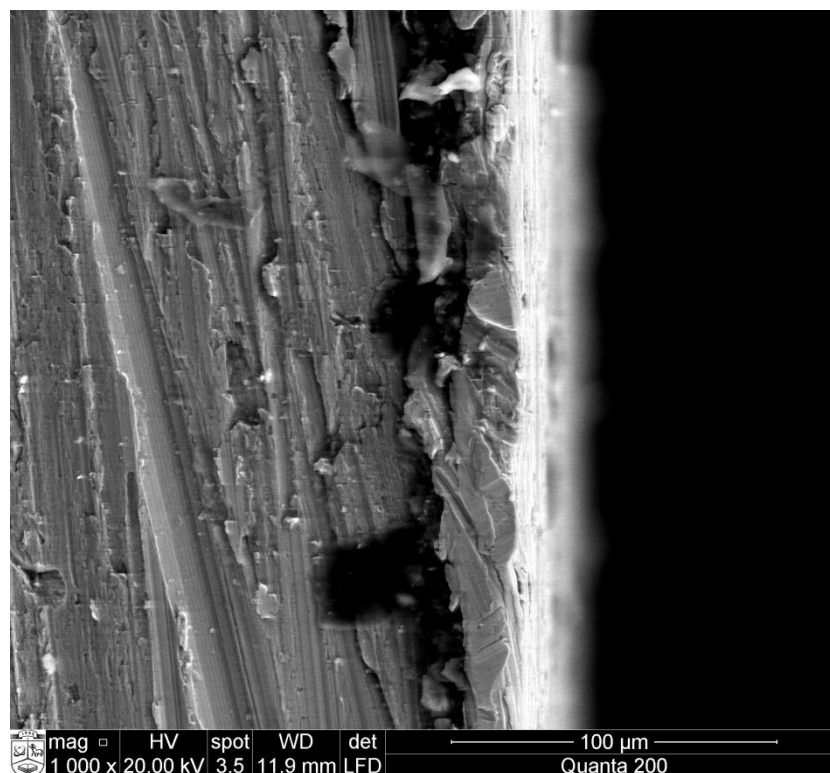
Elementas	Series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Deguonis	K-series	0,266787	0,26684	0,860657	0,086778
Geležis	K-series	95,20166	95,22083	87,98622	2,548014
Aliumininis	K-series	0,884761	0,884939	1,692502	0,071107
Manganas	K-series	0,635639	0,635767	0,597183	0,080601
Anglis	K-series	1,498025	1,498327	6,437393	0,738248
Silicis	K-series	0,281717	0,281774	0,517727	0,039372
Fosforas	K-series	0,144935	0,144964	0,241518	0,032804
Siera	K-series	0,127561	0,127586	0,205325	0,031464
Chloras	K-series	0,234786	0,234833	0,341816	0,034953
Kalcis	K-series	0,282685	0,282742	0,364054	0,035565
Kalis	K-series	0,205716	0,205757	0,271568	0,033244
Natris	K-series	0,215595	0,215639	0,484032	0,045012
	Suma:	99,97987	100	100	

Iš gautų rezultatų matyti, kad pliene be įprastų elementų (geležies, anglies, aliuminio, mangano, silicio, fosforo, sieros) yra ir pašalinių priemaišų: deguonies, chloro, kalcio, kalio ir natrio. Deguonis čia greičiausiai yra korozijos produktų (rūdžių) sudedamoji dalis, o chloras sudaro junginius su kalciumu, kaliumu bei natriu. Šie junginiai galėjo atsirasti dėl jūros vandens poveikio.

Tiriant bandinio briauną buvo naudojamas 600 kartų (58 pav.) ir 1000 kartų (59 pav.) priartinimas.



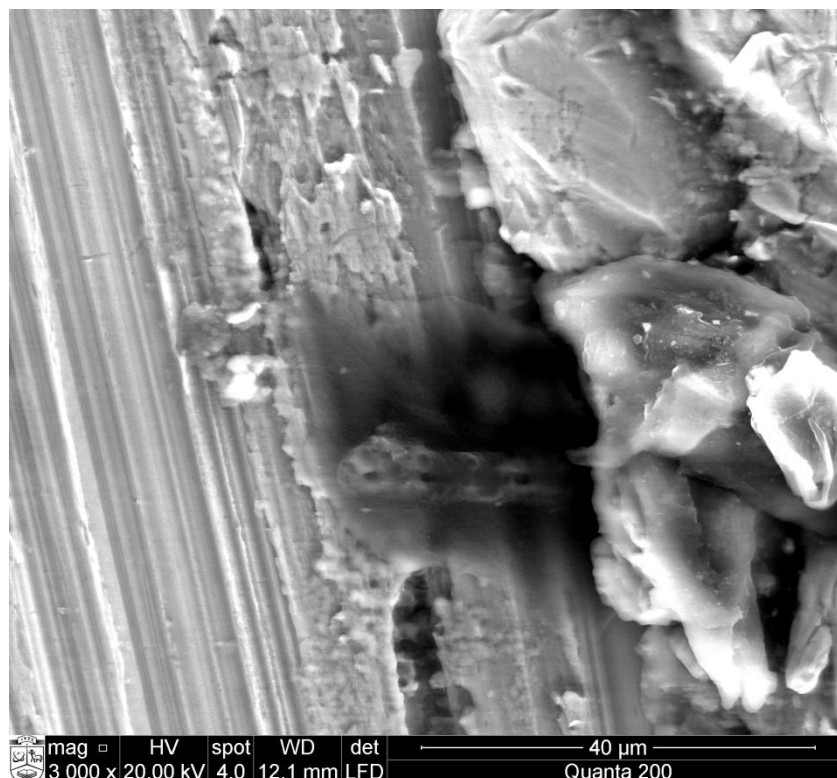
58 pav. Bandinio briaunos vaizdas priartinus 600 kartų



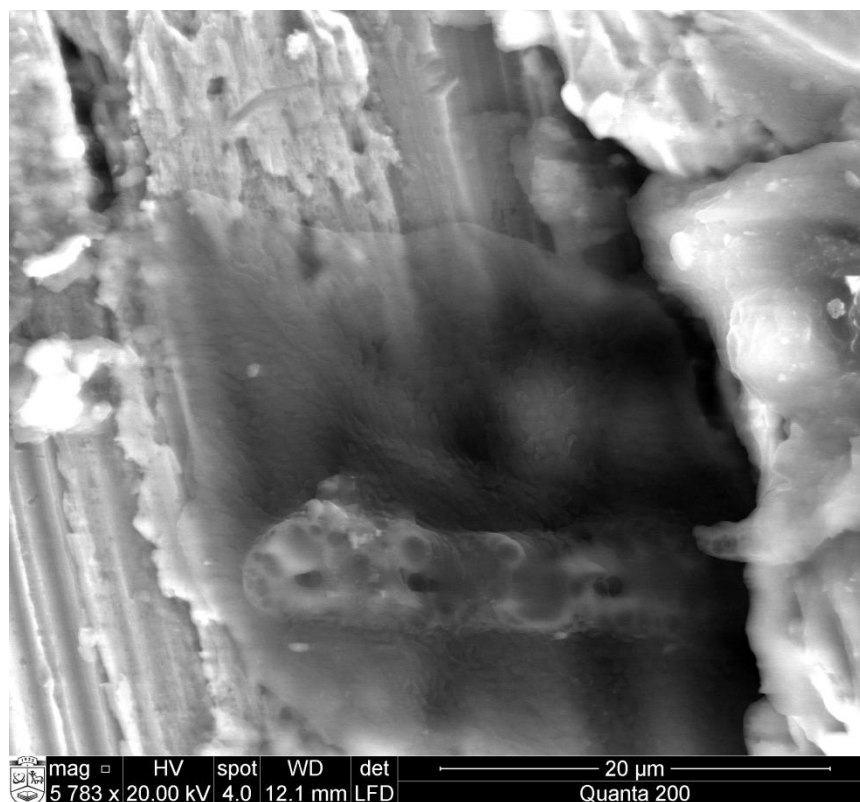
59 pav. Bandinio briaunos vaizdas priartinus 1000 kartų

Iš gautų nuotraukų matyti ne tik netolygus paviršius, kuris susidarė dėl šlifavimo proceso, bet ir duobutės – tikėtina, kad tai taškinės (pitingo) korozijos židiniai.

Korozijos židinyje prie duobutės buvo apžiūrėtas priartinus vaizdą 3000 kartų (60 pav.) ir apie 6000 kartų (61 pav.).



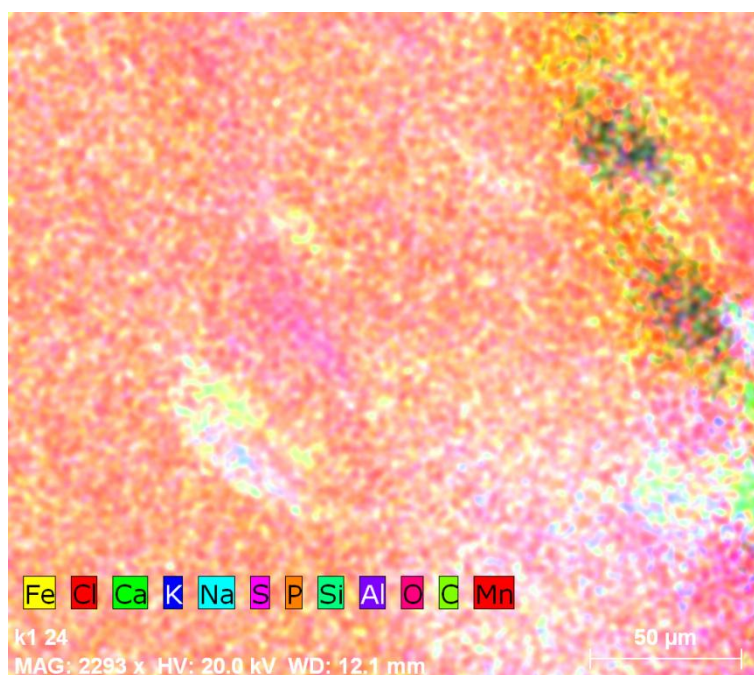
60 pav. Korozijos židinyje prie duobutės priartinus 3000 kartų



61 pav. Korozijos židinis prie duobutės priartinus apie 6000 kartų

Pateiktose nuotraukose dar aiškiau matomi korozijos židiniai.

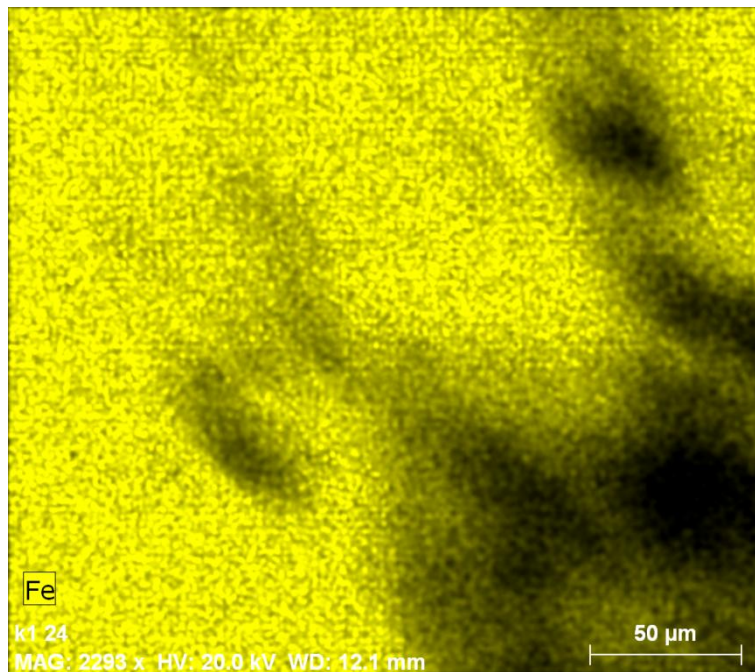
Siekiant išsiaiškinti, kokiais cheminiais elementais išsidėstę korozijos židinyje prie duobutės, buvo sudarytas cheminių elementų pasiskirstymo žemėlapis (62 pav.).



62 pav. *Fe, Cl, Ca, K, Na, S, P, Si, Al, O, C, Mn* pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės

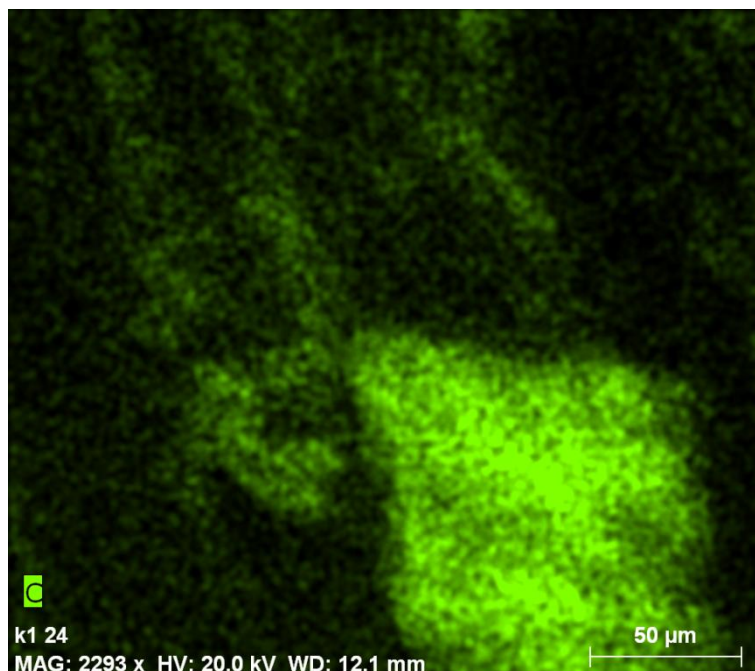
Kaip matyti paveiksle, nors daugelyje vietų cheminiai elementai pasiskirstę tolygiai, visgi yra kelios vietos, kur yra susidariusios tam tikrų cheminių sąnaupos arba yra elementų sumažėjimas.

Siekiant tiksliau išsiaiškinti, kurie cheminiai elementai yra pasiskirstę netolygiai, buvo padaryta cheminių elementų pasiskirstymo žemėlapių (63 – 74 pav.) su atskirais cheminiais elementais.



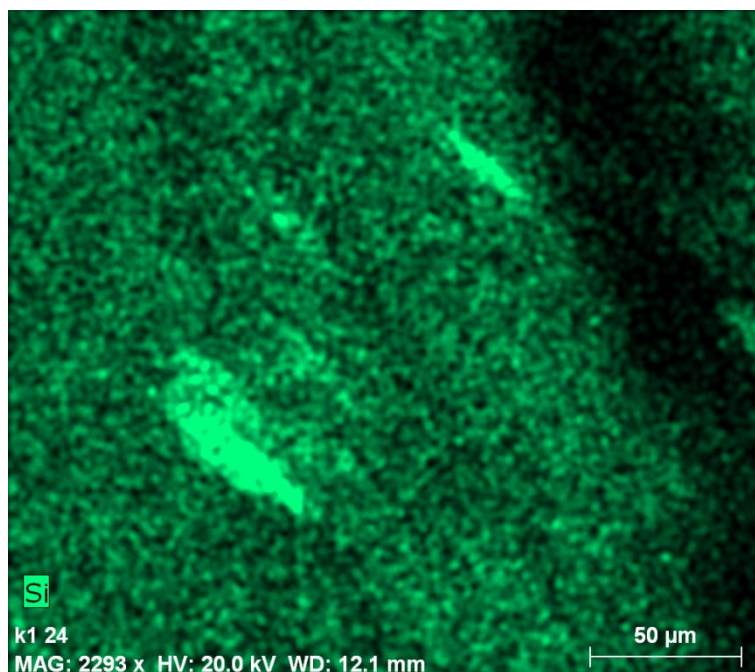
63 pav. Geležies (*Fe*) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės

Geležies (*Fe*) pasiskirstymo žemėlapyje (63 pav.) matyti, kad geležis pasiskirsčiusi ne itin tolygiai – vietomis matomas geležies sumažėjimas.



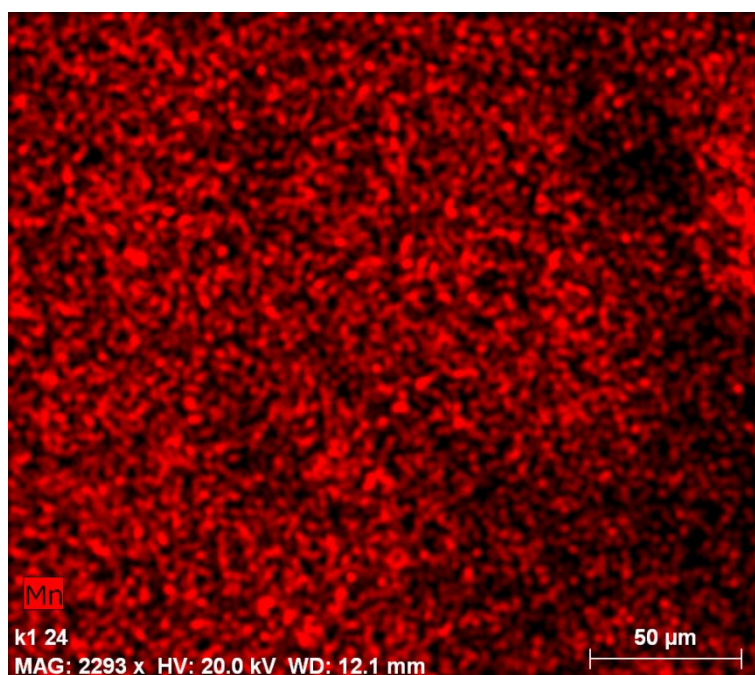
64 pav. Anglies (*C*) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės

Anglies (*C*) pasiskirstymo žemėlapyje (64 pav.) matyti, kad anglis pasiskirsčiusi labai nevienodai – vienoje vietoje yra labai didelė anglies sanakaupa.



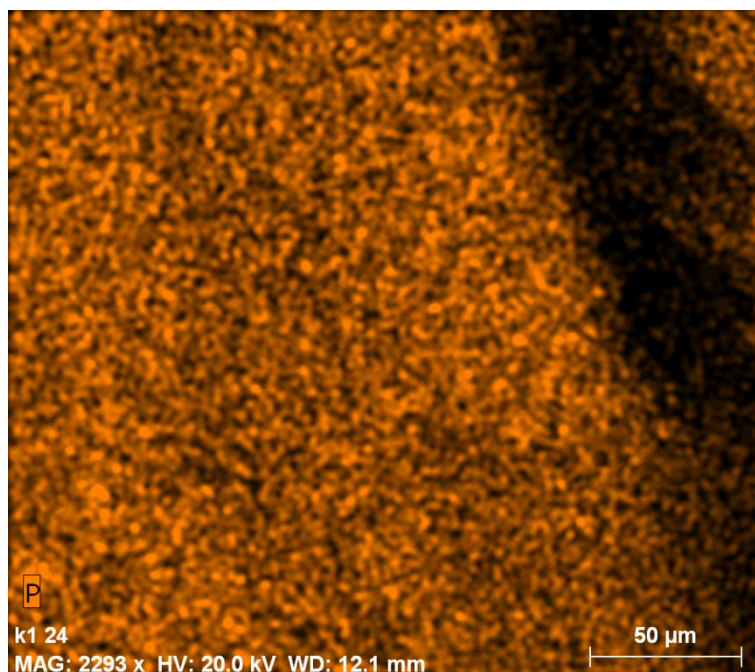
65 pav. Silicio (*Si*) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės

Silicio (*Si*) pasiskirstymo žemėlapyje (65 pav.) matyti, kad silicis taip pat pasiskirstęs ne itin tolygiai – vietomis silicio yra labai mažai, vietomis nedidelės sankaupos.



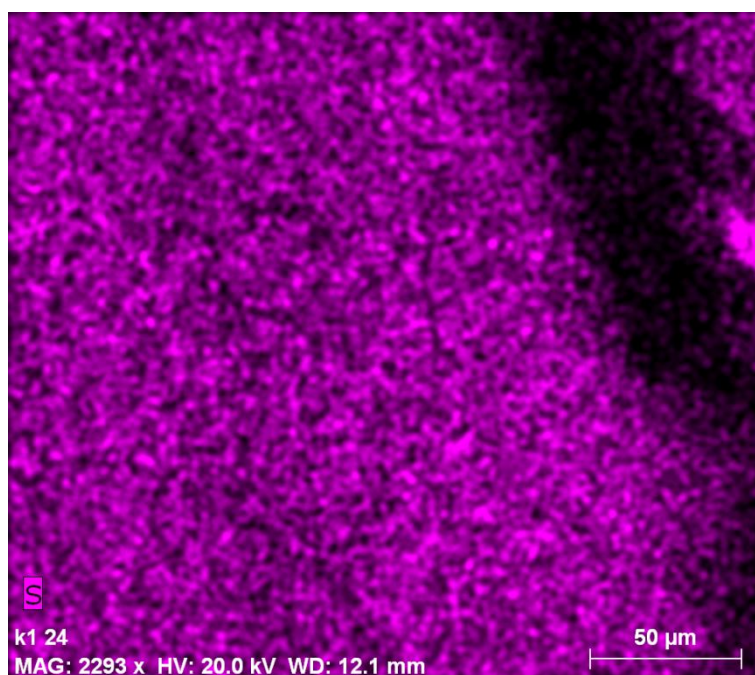
66 pav. Mangano (*Mn*) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės

Mangano (*Mn*) pasiskirstymo žemėlapyje (66 pav.) matyti, kad manganas pasiskirstęs gana tolygiai – pastebimų sankaupų nėra, vietomis nežymus sumažėjimas.



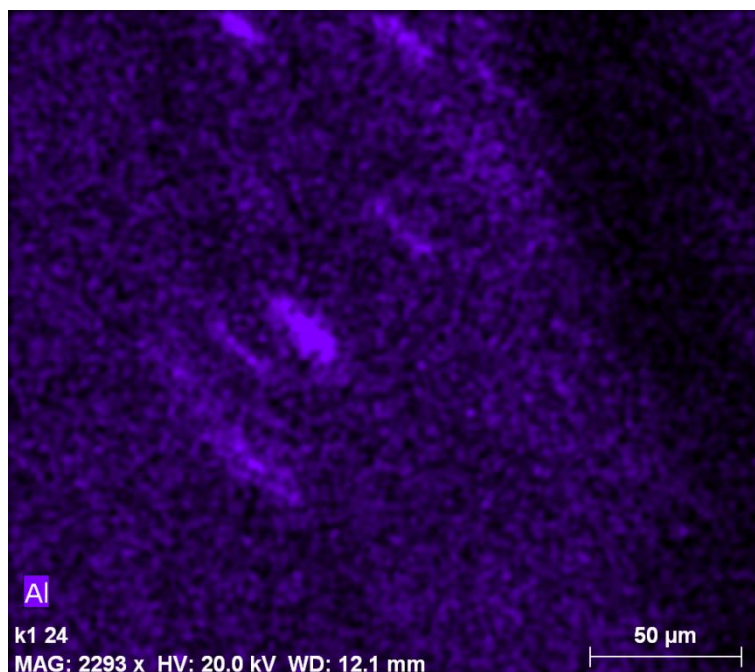
67 pav. Fosforo (*P*) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės

Fosforo (*P*) pasiskirstymo žemėlapyje (67 pav.) matyti, kad fosforas pasiskirstęs ne itin tolygiai – vienoje vietoje matomas žymus fosforo sumažėjimas.



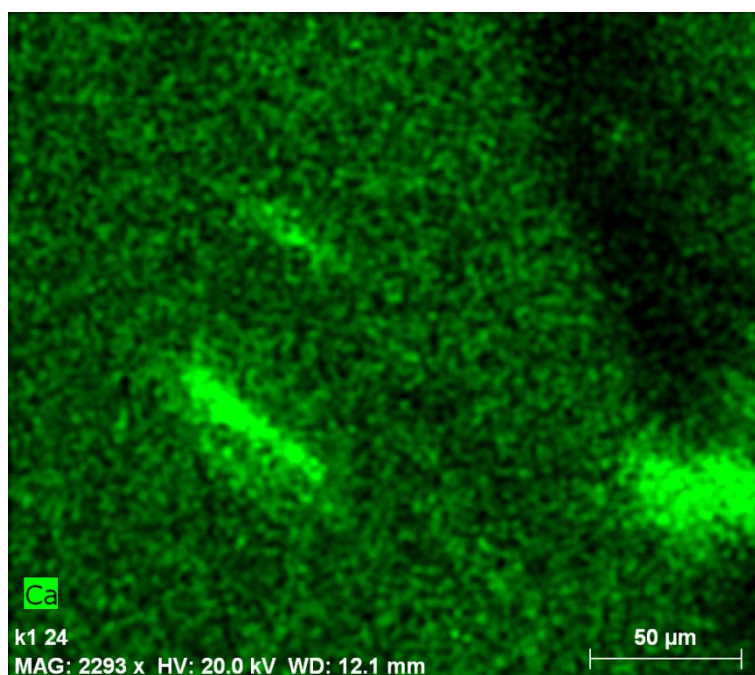
68 pav. Sieros (*S*) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės

Sieros (*S*) pasiskirstymo žemėlapyje (68 pav.) matyti, kad siera pasiskirsčiusi taip pat ne itin tolygiai – pasiskirstymas panašus į fosforo – vienoje vietoje matomas žymus sieros sumažėjimas.



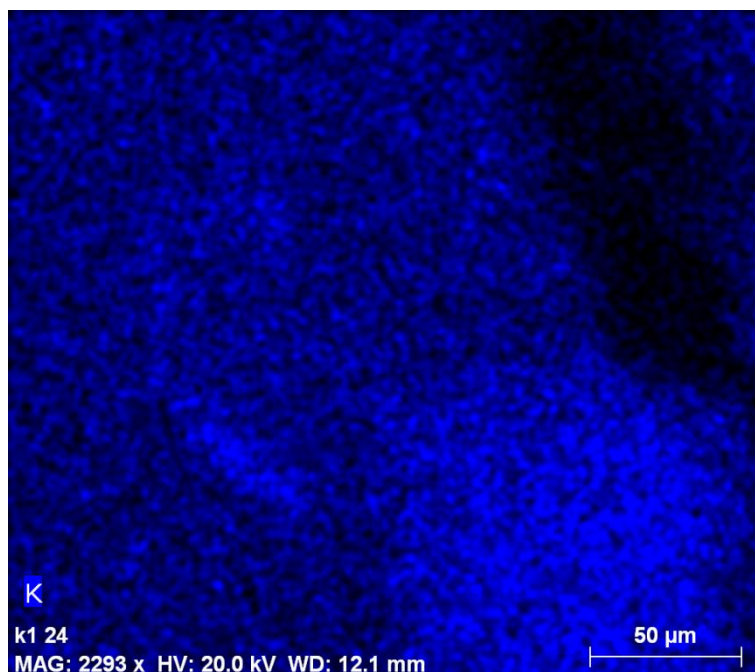
69 pav. Aliuminio (*Al*) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės

Aliuminio (*Al*) pasiskirstymo žemėlapyje (69 pav.) matyti, kad aliuminis pasiskirstęs nevienodai – vienoje vietoje aliuminio yra labai mažai, vietomis matomos nedidelės sankaupos.



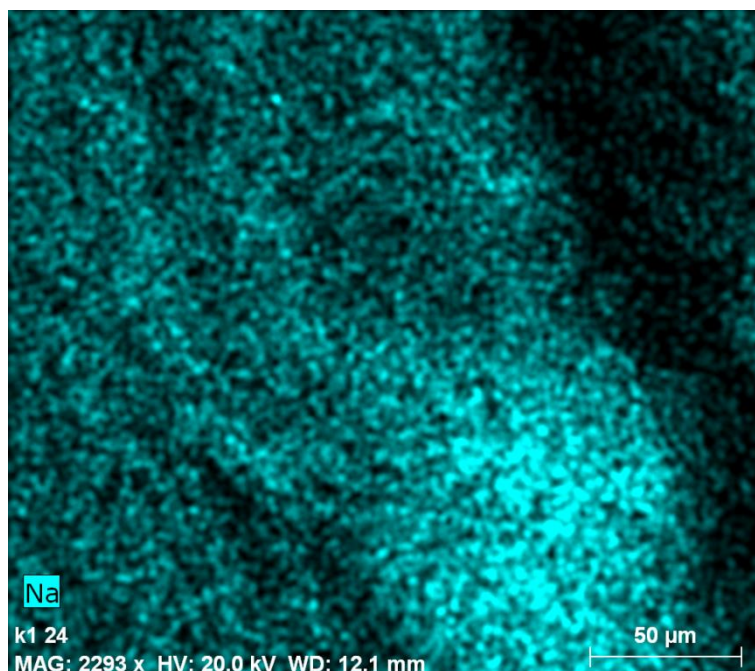
70 pav. Kalcio (*Ca*) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės

Kalcio (*Ca*) pasiskirstymo žemėlapyje (70 pav.) matyti, kad kalcis pasiskirstęs netolygiai – vienoje vietoje pastebimas kalcio sumažėjimas, keliose vietose matomos nedidelės sankaupos.



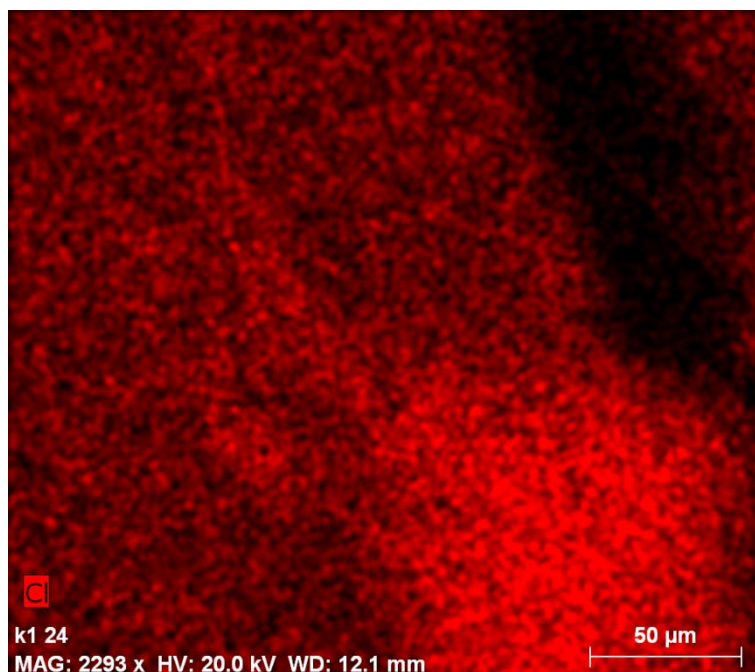
71 pav. Kalio (*K*) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės

Kalio (*K*) pasiskirstymo žemėlapyje (71 pav.) matyti, kad kalis pasiskirstęs netolygiai – vienoje vietoje matomas žymus kalio sumažėjimas, taip pat pastebima didelė kalio sankaupa (toje pačioje vietoje, kaip ir anglies).



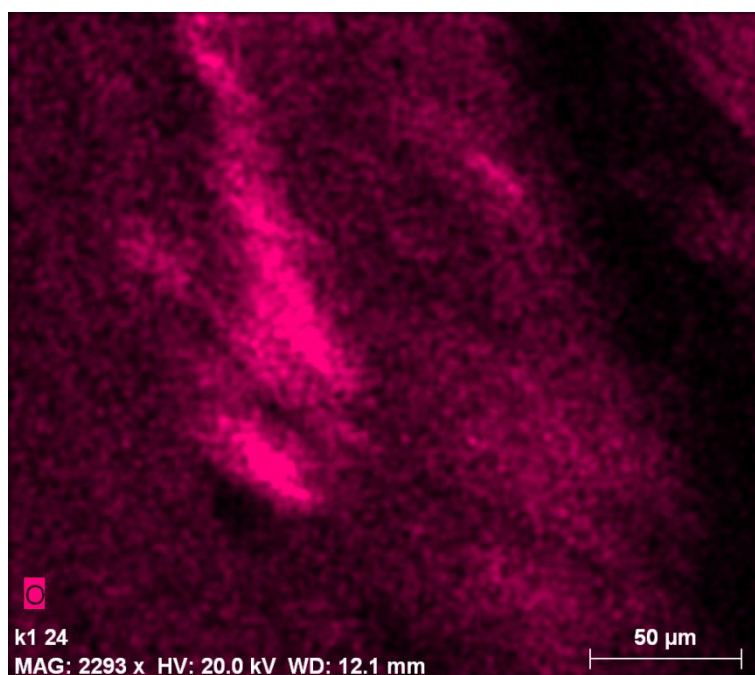
72 pav. Natrio (*Na*) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės

Natrio (*Na*) pasiskirstymo žemėlapyje (72 pav.) matyti, kad natrius taip pat pasiskirstęs netolygiai – tose pačiose vietose, kaip ir anglies bei kalio, matomos natrio sankaupos bei žymus elemento sumažėjimas.



73 pav. Chloro (*Cl*) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės

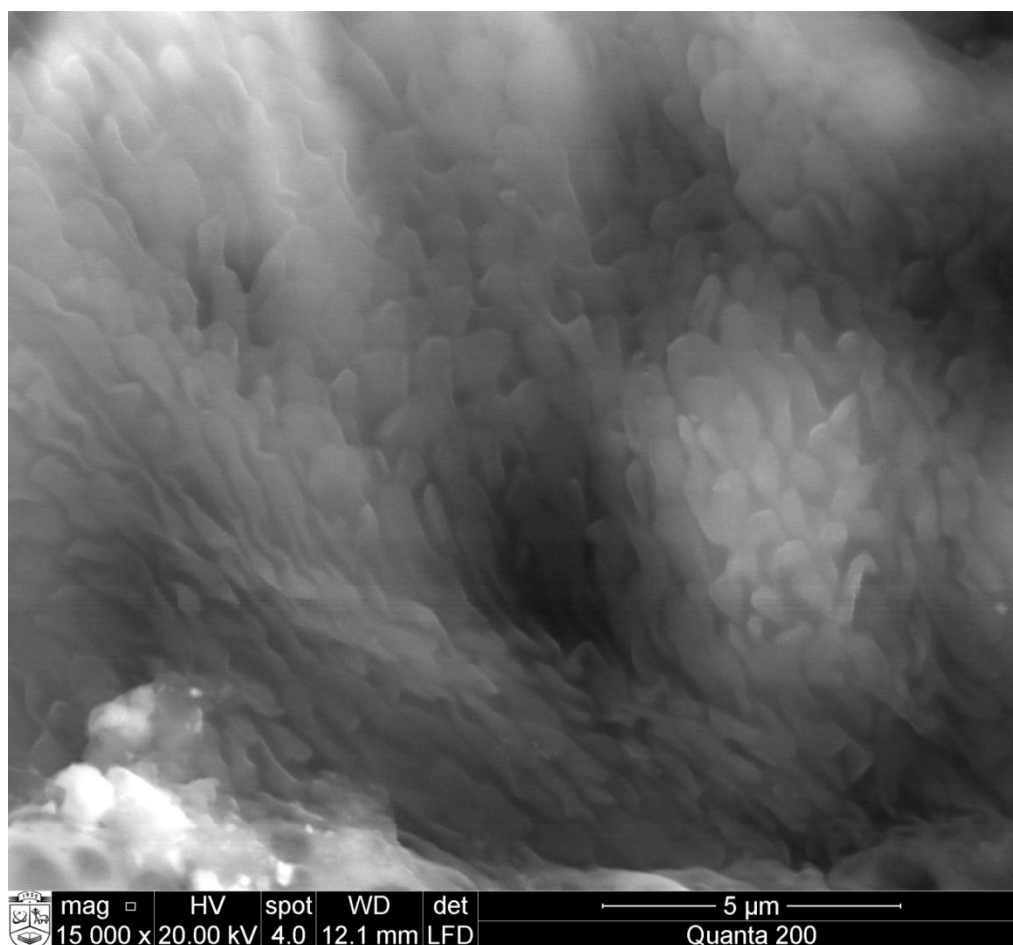
Chloro (*Cl*) pasiskirstymo žemėlapyje (73 pav.) matyti, kad chloro pasiskirstymas yra netolygus – labai panašus į anglies, kalio bei natrio pasiskirstymą.



74 pav. Deguonies (*O*) pasiskirstymo žemėlapis korozijos židinyje prie duobutės

Deguonies (*O*) pasiskirstymo žemėlapyje (74 pav.) matyti, kad deguonis pasiskirstęs itin netolygiai – vienoje vietoje matoma didelė sanaupta deguonies, vietomis jos yra mažesnės, taip pat vietomis pastebimas žymiai mažesnis kiekis deguonies.

Tyrimas buvo pakartotas ir pačioje duobutėje – korozijos židinyje, tačiau šį kartą buvo naudojamas 15000 kartų priartinimas (75 pav.).

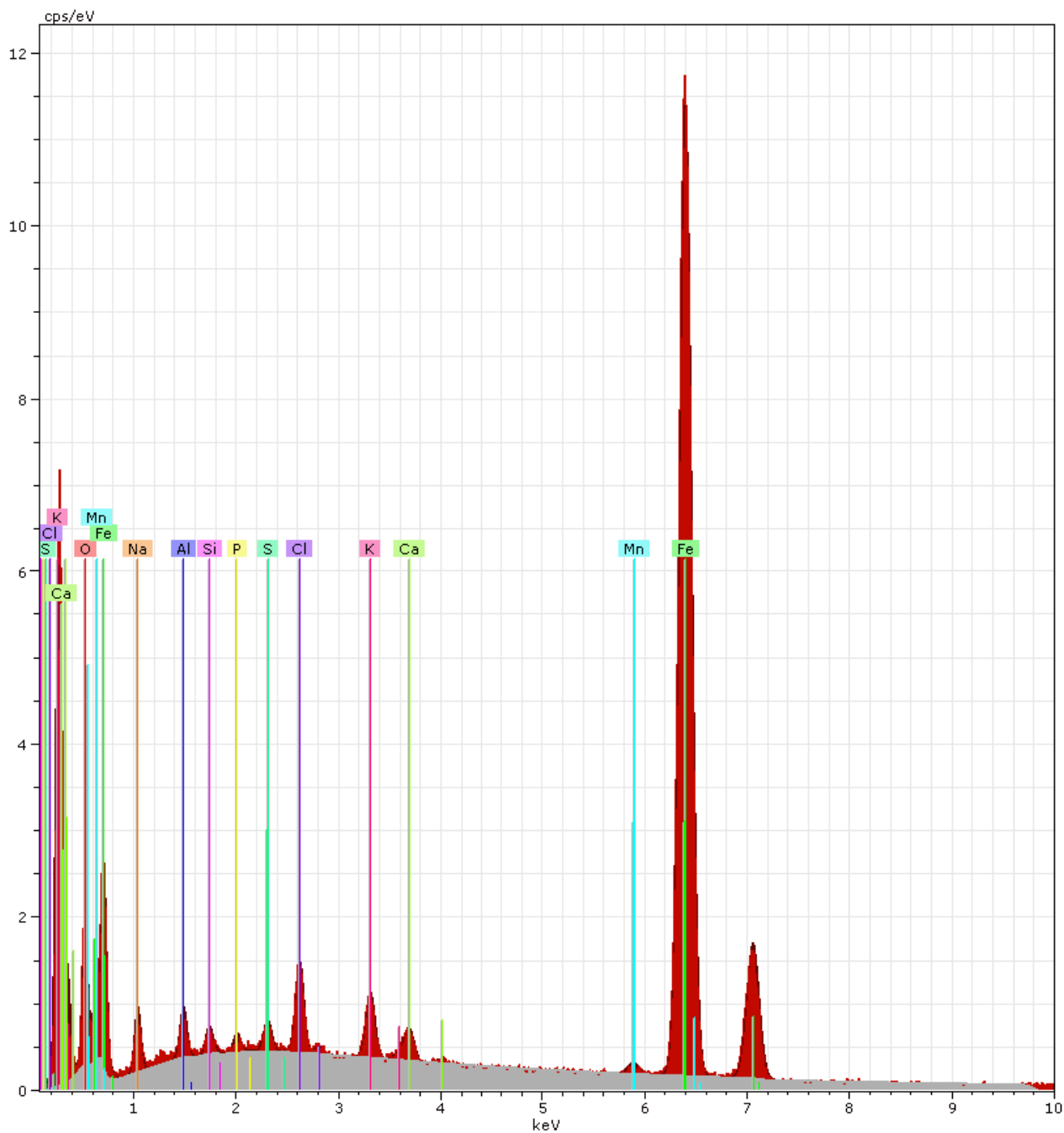


75 pav. Korozijos židinis duobutėje priartinus 15000 kartų

Siekiant nustatyti, korozijos židinio duobutėje cheminę sudėtį, su skenuojančiame elektroniniame mikroskope (SEM) įmontuoto rentgeno spindulių energijos dispersijos spektrometro pagalba buvo gautas spektras (76 pav.) bei atlikta cheminė mikro analizė (4 lentelė).

4 lentelė. Korozijos židinio duobutėje cheminės mikroanalizės rezultatai

Elementas	Series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Deguonis	K-series	6,791098	7,957195	21,2501	0,998283
Geležis	K-series	67,87959	79,53517	60,85048	1,831909
Aliuminis	K-series	1,242978	1,456409	2,306329	0,091098
Manganas	K-series	0,571697	0,669863	0,520976	0,08397
Silicis	K-series	0,495203	0,580234	0,882725	0,050369
Fosforas	K-series	0,378705	0,443732	0,612113	0,043968
Natris	K-series	3,320639	3,890825	7,231222	0,254423
Siera	K-series	0,585555	0,686101	0,914213	0,050048
Chloras	K-series	1,7816	2,087518	2,515854	0,089127
Kalis	K-series	1,438785	1,685839	1,84231	0,073008
Kalcis	K-series	0,859523	1,007111	1,073683	0,054886
	Suma:	85,34538	100	100	



76 pav. Korozijos židinio duobutėje spektrograma

Iš gautos spektrogramos matyti, kokie cheminiai elementai pasiskirstę duobutėje esančiame korozijos židinyje.

Iš gautų rezultatų matyti, kad pliene be įprastų elementų (geležies, aliuminio, mangano, silicio, fosforo, sieros) yra ir pašalinių priemaišų: deguonies, chloro, kalcio, kalio ir natrio. Deguonis čia greičiausiai yra korozijos produktų (rūdžių) sudedamoji dalis, o chloras sudaro junginius su kalciumu, kaliumu bei natriu. Šie junginiai galėjo atsirasti dėl jūros vandens poveikio.

Palyginus gautus rezultatus su korodavusio paviršiaus cheminės mikroanalizės rezultatais matyti, kad korozijos židinyje yra žymiai mažesnis geležies kiekis, o anglies iš viso neaptikta. Taip pat pastebimas daugelio cheminių elementų padidėjimas.

5 lentelė. Cheminės mikroanalizės rezultatų palyginimas

Elementas	Korodavęs paviršius	Korozijos židinyje duobutėje
Deguonis	0,266787	6,791098
Geležis	95,20166	67,87959
Aliumininis	0,884761	1,242978
Manganas	0,635639	0,571697
Anglis	1,498025	-
Silicis	0,281717	0,495203
Fosforas	0,144935	0,378705
Siera	0,127561	3,320639
Chloras	0,234786	0,585555
Kalcis	0,282685	1,7816
Kalis	0,205716	1,438785
Natris	0,215595	0,859523
Suma:	99,97987	85,34538

2.2.3. Metalo kietumo bandymo rezultatai

Atlikus metalo kietumo bandymą, buvo gauti tokie rezultatai:

6 lentelė. Kietumo bandymo rezultatai

Eil. Nr.	Skalė	Vikerso kietumas HV, kG/mm ²	Brinelio kietumas HB, kG/mm ²	Plieno stipris f, MPa
1	HV30	140,4	133,4	466,9
2	HV30	140,8	133,8	468,3
3	HV30	140,3	133,3	466,6
4	HV30	144,6	132,5	463,8
5	HV30	148,3	135,7	474,9
6	HV30	141,0	129,4	453,0
7	HV30	148,2	135,6	474,5

Pastaba. 1 kG/mm² ≈ 10 MPa

Žemiau (7 lentelė) pateikti kietumo bandymo rezultatai, apdoroti programa STATISTICA.

7 lentelė. Kietumo bandymo rezultatų statistiniai duomenys

Pavadinimas	Statistiniai duomenys					
	Imtis	Vidurkis	Min	Max	Dispersija	Standartinis nuokrypis
Vikerso kietumas HV, kG/mm ²	7	143,3714	140,3000	148,3000	13,26905	3,642670
Brinelio kietumas HB, kG/mm ²	7	133,3857	129,4000	135,7000	4,51810	2,125581
Ribinis plieno stipris f _u , MPa	7	466,8571	453,0000	474,9000	54,43619	7,378089

Iš lentelės matyti, kad vidutinė Vikerso kietumo reikšmė yra 143 kG/mm², Brinelio kietumo – 133 kG/mm², o vidutinė ribinio plieno stiprio reikšmė – f_u = 467 MPa.

2.2.4. Metalo tempimo bandymo rezultatai

Iš pradžių buvo nustatyti pradiniai bandinių skerspjūvio matmenys, kurie pateikti 8 lentelėje.

8 lentelė. Pradiniai bandinių duomenys (Šventosios molo varžtas)

Bandinys	Skerspjūvio matmenys, mm		Skerspjūvio plotas A_0 , mm^2
	Skersmuo d_1 , mm	Skersmuo statmena kryptimi d_2 , mm	
1	5,0	5,0	19,63
2	5,0	5,0	19,63
3	5,0	5,0	19,63

Apskaičiuojame bandinio skerspjūvio plotą:

$$A_0 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (5,0)^2}{4} = 19,63 \text{ mm}^2$$

Atlikto bandymo rezultatai pateikti 9 lentelėje.

9 lentelė. Tempimo bandymų rezultatai (Šventosios molo varžtas)

Bandinys	Bandymų rezultatai						
	$F_{p0,2}$	F_m	F_f	$f_{p0,2}$	f_m	ΔL	$\varepsilon_{\%}$
1	6490	8760	4290	331	446	11,3	12,0
2	6580	8740	4320	335	445	11,6	12,5
3	6550	8710	4250	334	444	10,2	11,0

Apskaičiuojame takumo ribą:

$$f_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{A_0} = \frac{6490}{19,63} = 330,62 \approx 331 \text{ MPa}$$

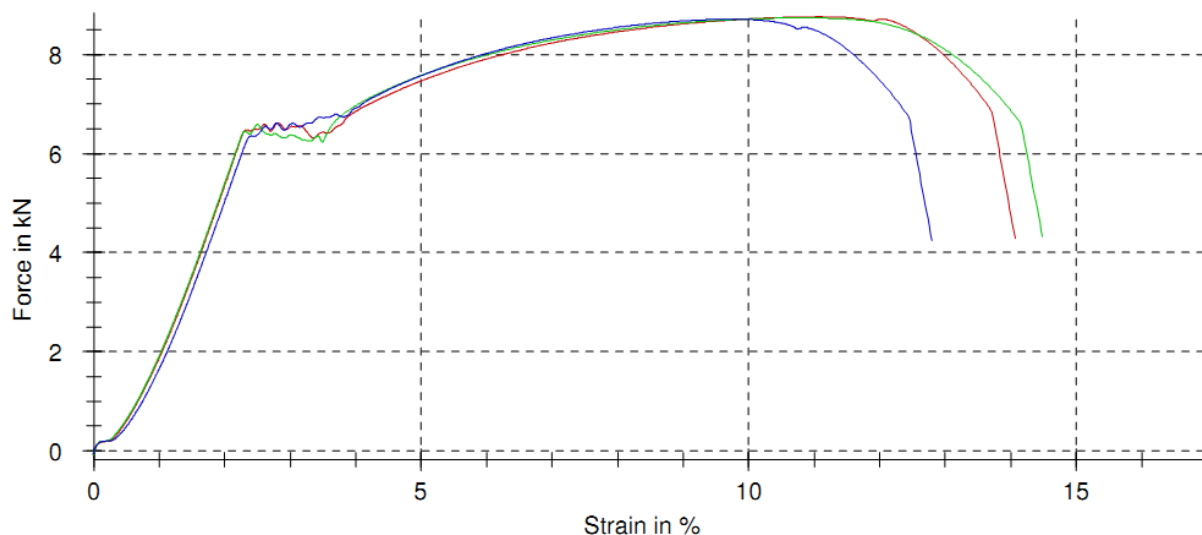
Kitų bandinių takumo riba apskaičiuojama analogiškai.

Apskaičiuojame stiprumo ribą:

$$f_m = \frac{F_m}{A_0} = \frac{8760}{19,63} = 446,25 \approx 446 \text{ MPa}$$

Kitų bandinių stiprumo riba apskaičiuojama analogiškai.

Atlikus bandymus, buvo gautos įtempių – deformacijų kreivės (77 pav.).



77 pav. Įtempių – deformacijų kreivės (Šventosios molo varžtas)

Žemiau (10 lentelė) pateikti tempimo bandymo rezultatai, apdoroti programa STATISTICA.

10 lentelė. Tempimo bandymo rezultatų statistiniai duomenys (Šventosios molo varžtas)

Kintamieji	Statistiniai duomenys					
	Imtis	Vidurkis	Min	Max	Dispersija	Standartinis nuokrypis
$F_{p0,2}$, N	3	6540,000	6490,000	6580,000	2100,000	45,82576
F_m , N	3	8736,667	8710,000	8760,000	633,333	25,16611
F_f , N	3	4286,667	4250,000	4320,000	1233,333	35,11885
$f_{p0,2}$, MPa	3	333,333	331,000	335,000	4,333	2,08167
f_m , MPa	3	445,000	444,000	446,000	1,000	1,00000
dL , mm	3	11,033	10,200	11,600	0,543	0,73711
$\epsilon_{\%}$, %	3	11,833	11,000	12,500	0,583	0,76376

Iš lentelės matyti, kad vidutinė jėga ties takumo riba $F_{p0,2} = 6540$ N, vidutinė jėga ties stiprumo riba $F_m = 8737$ N, vidutinė jėga suirimo metu $F_f = 4287$ N, vidutinė takumo riba $f_{p0,2} = 333$ MPa, vidutinė stiprumo riba $f_m = 445$ MPa, vidutinis pailgėjimas $\Delta L = 11,03$ mm, o santykinis pailgėjimas $\epsilon_{\%} = 12,0$ %.

Tempimo bandymas su artilerijos aikštelių pakloto (pabūklų pagrindo) Nr. 1 buvo atliekamas analogiškai.

Taigi iš pradžių buvo atliekami bandinių skerspjūvių matavimai, kurie pateikti 11 lentelėje.

11 lentelė. Pradiniai bandinių duomenys (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 1)

Bandinys	Skerspjūvio matmenys, mm		Skerspjūvio plotas A_0 , mm ²
	Skersmuo d_1 , mm	Skersmuo statmena kryptimi d_2 , mm	
1	9,5	9,5	70,88
2	10,0	10,0	78,54
3	10,0	10,0	78,54
4	9,2	9,1	65,76
5	9,5	9,5	70,88
6	9,7	10,0	76,20
7	9,5	9,5	70,88
8	9,8	10,0	76,98
9	9,8	10,0	76,98
10	10,0	10,0	78,54

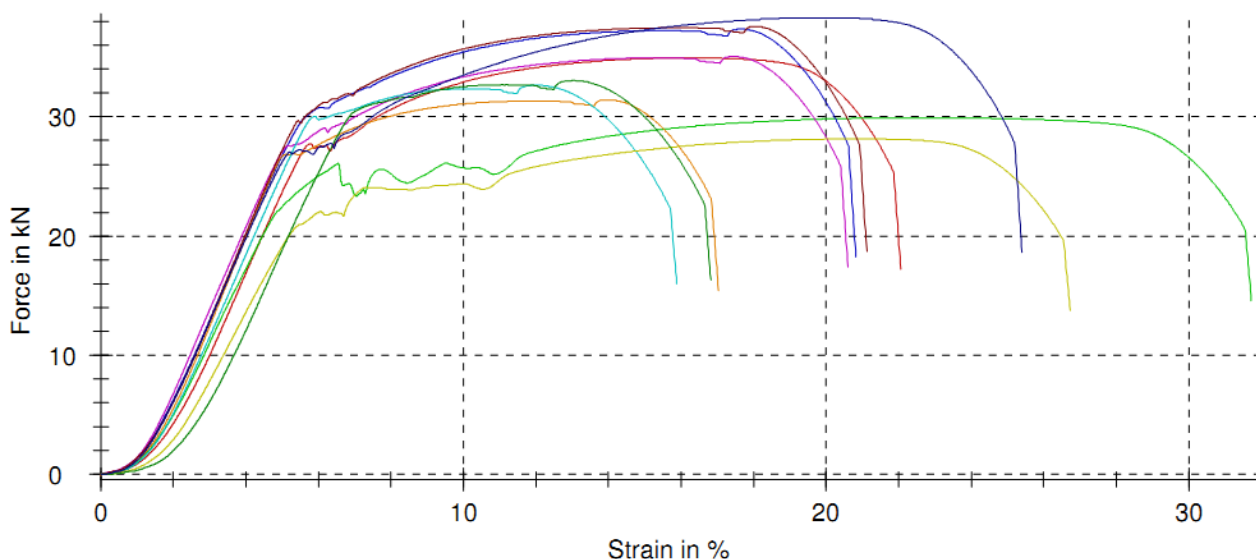
Bandinių skerspjūvio plotas buvo apskaičiuotas analogiškai, kaip ir ankstesniais atvejais.

Atlikto bandymo rezultatai pateikti 12 lentelėje.

12 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 1)

Bandinys	Bandymų rezultatai						
	$F_{p0,2}$	F_m	F_f	$f_{p0,2}$	f_m	ΔL	$\varepsilon\%$
1	27700	34900	17200	391	492	28,7	20,5
2	22200	29900	14600	283	381	41,2	29,5
3	29800	37300	18200	379	475	27,1	19,5
4	26900	31400	15400	409	477	22,1	15,5
5	27400	35000	17400	387	494	26,8	19,0
6	30000	32700	16000	394	429	20,6	14,0
7	20900	28100	13700	295	396	34,8	25,0
8	29600	37600	18700	385	488	27,5	19,5
9	29700	33000	16300	386	429	21,9	15,5
10	27000	38300	18600	344	488	33,0	24,5

Atlikus bandymus buvo gautos įtempių – deformacijų kreivės (78 pav.).



78 pav. Įtempių – deformacijų kreivės (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 1)

Žemiau (13 lentelė) pateikti tempimo bandymo rezultatai, apdoroti programa STATISTICA.

13 lentelė. Tempimo bandymo rezultatų statistiniai duomenys (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 1)

Kintamieji	Statistiniai duomenys					
	Imtis	Vidurkis	Min	Max	Dispersija	Standartinis nuokrypis
$F_{p0,2}$, N	10	27120,00	20900,00	30000,00	10184000	3191,238
F_m , N	10	33820,00	28100,00	38300,00	11655111	3413,958
F_f , N	10	16610,00	13700,00	18700,00	2918778	1708,443
$f_{p0,2}$, MPa	10	365,30	283,00	409,00	1893	43,510
f_m , MPa	10	454,90	381,00	494,00	1807	42,506
dL, mm	10	28,37	20,60	41,20	42	6,445
eps%, %	10	20,25	14,00	29,50	24	4,866

Iš lentelės matyti, kad vidutinė jėga ties takumo riba $F_{p0,2} = 27120 N$, vidutinė jėga ties stiprumo riba $F_m = 33820 N$, vidutinė jėga suirimo metu $F_f = 16610 N$, vidutinė takumo riba

$f_{p0,2} = 365 \text{ MPa}$, vidutinė stiprumo riba $f_m = 455 \text{ MPa}$, vidutinis pailgėjimas $\Delta L = 28,37 \text{ mm}$, o santykinis pailgėjimas $\varepsilon_{\%} = 20,5 \%$.

Tempimo bandymas taip pat buvo atliekamas su artilerijos aikštelių pakloto (pabūklų pagrindo) plienu Nr. 2.

Kaip ir ankstesniais atvejais, iš pradžių buvo išmatuoti bandinių skerspjūvio matmenys, kurie pateikti 14 lentelėje.

14 lentelė. Pradiniai bandinių duomenys (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 2)

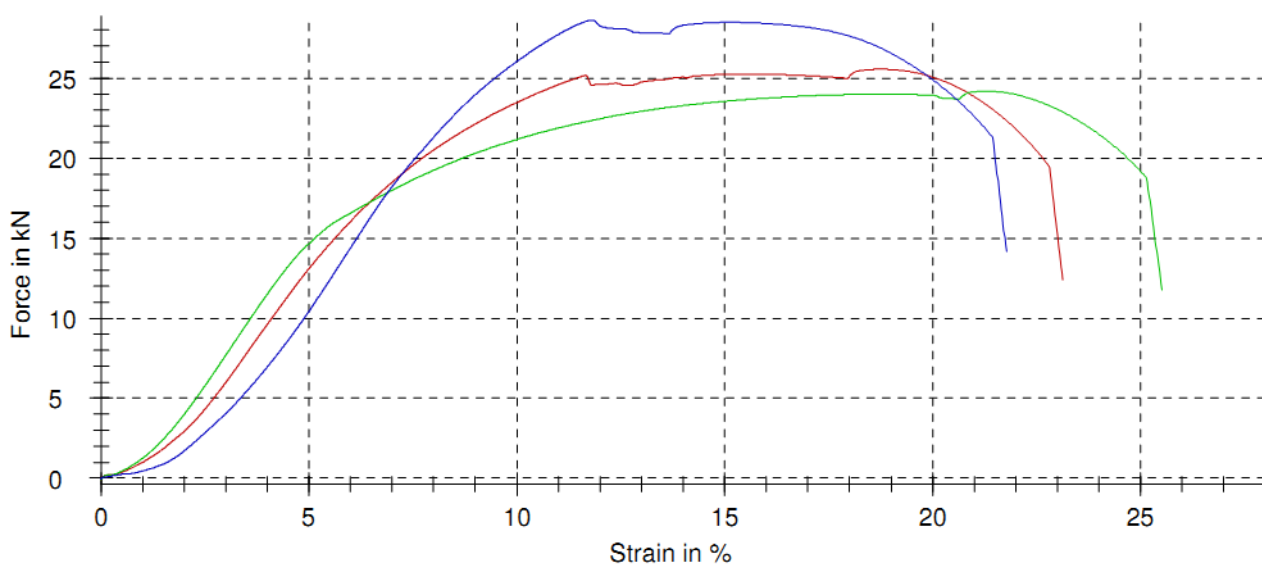
Bandinys	Skerspjūvio matmenys, mm		Skerspjūvio plotas A_0 , mm^2
	Skersmuo d_1 , mm	Skersmuo statmena kryptimi d_2 , mm	
1	7,0	7,0	38,48
2	8,5	8,5	56,75
3	8,3	8,3	54,11

Atlikto tempimo bandymo rezultatai pateikti 15 lentelėje.

15 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 2)

Bandinys	Bandymų rezultatai						
	$F_{p0,2}$	F_m	F_f	$f_{p0,2}$	f_m	ΔL	$\varepsilon_{\%}$
1	24800	25600	12400	644	665	20,8	16,0
2	14600	24200	11800	257	426	20,4	16,5
3	20400	28600	14100	377	529	17,4	14,5

Atlikus bandymus buvo gautos įtempių – deformacijų kreivės (79 pav.).



79 pav. Įtempių – deformacijų kreivės (Artilerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 2)

Žemiau (16 lentelė) pateikti tempimo bandymo rezultatai, apdoroti programa STATISTICA.

16 lentelė. Tempimo bandymo rezultatų statistiniai duomenys (Artillerijos aikštelių pakloto plienas Nr. 2)

Kintamieji	Statistiniai duomenys					
	Imtis	Vidurkis	Min	Max	Dispersija	Standartinis nuokrypis
$F_{p0,2}$, N	3	19933,33	14600,00	24800,00	26173333	5115,988
F_m , N	3	26133,33	24200,00	28600,00	5053333	2247,962
F_f , N	3	12766,67	11800,00	14100,00	1423333	1193,035
$f_{p0,2}$, MPa	3	426,00	257,00	644,00	39243	198,098
f_m , MPa	3	540,00	426,00	665,00	14371	119,879
dL , mm	3	19,53	17,40	20,80	3	1,858
$\epsilon_{\%}$, %	3	15,67	14,50	16,50	1	1,041

Iš lentelės matyti, kad vidutinė jėga ties takumo riba $F_{p0,2} = 19333 \text{ N}$, vidutinė jėga ties stiprumo riba $F_m = 26133 \text{ N}$, vidutinė jėga suirimo metu $F_f = 12767 \text{ N}$, vidutinė takumo riba $f_{p0,2} = 426 \text{ MPa}$, vidutinė stiprumo riba $f_m = 540 \text{ MPa}$, vidutinis pailgėjimas $\Delta L = 19,53 \text{ mm}$, o santykinis pailgėjimas $\epsilon_{\%} = 15,5 \%$.

Palyginimui tempimo bandymas buvo atliktas ir su šiuolaikiniu plienu.

Taigi iš pradžių buvo išmatuoti bandinių skerspjūvio matmenys, kurie pateikti 17 lentelėje.

17 lentelė. Pradiniai bandinių duomenys (Šiuolaikinis plienas)

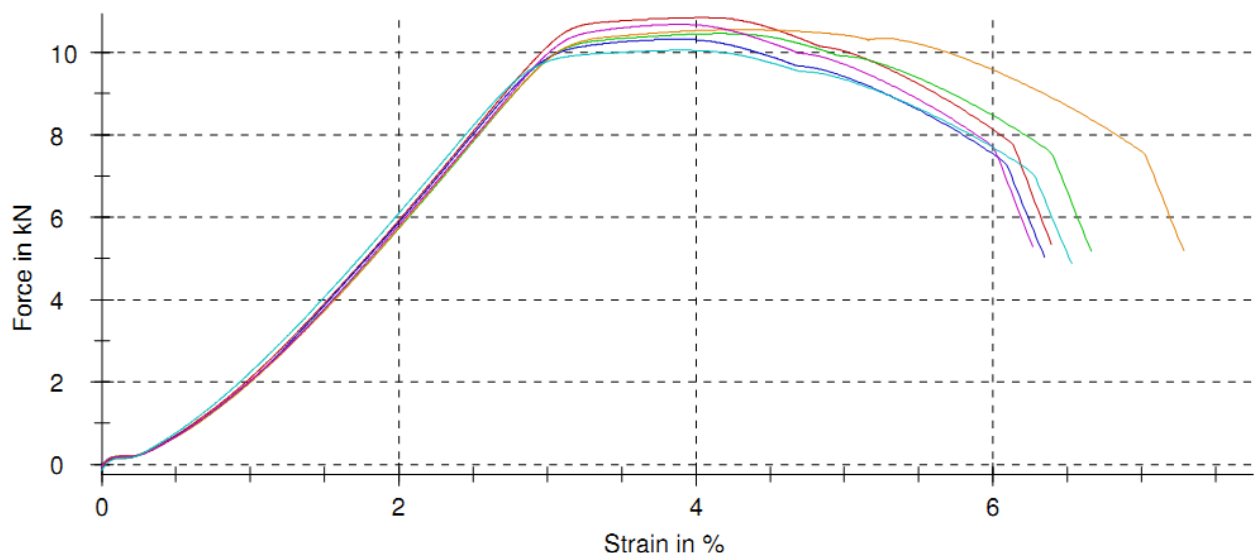
Bandinys	Skerspjūvio matmenys, mm		Skerspjūvio plotas A_0 , mm^2
	Skersmuo d_1 , mm	Skersmuo statmena kryptimi d_2 , mm	
1	4,8	5	18,86
2	4,8	4,8	18,10
3	4,7	4,7	17,35
4	4,8	4,8	18,10
5	4,8	4,8	18,10
6	4,8	4,8	18,10

Atlikto tempimo bandymo rezultatai pateikti 18 lentelėje.

18 lentelė. Bandymų rezultatai (Šiuolaikinis plienas)

Bandinys	Bandymų rezultatai						
	$F_{p0,2}$	F_m	F_f	$f_{p0,2}$	f_m	ΔL	$\epsilon_{\%}$
1	10700	10800	5340	567	573	5,8	5,5
2	10300	10500	5170	569	580	6,0	6,0
3	10100	10300	5030	582	594	5,7	5,5
4	10300	10600	5190	569	586	6,6	6,5
5	10500	10700	5290	580	591	5,6	5,5
6	9870	10100	4870	545	558	5,9	6,0

Atlikus bandymus buvo gautos įtempimų – deformacijų kreivės (80 pav.)



80 pav. Įtempių – deformacijų kreivės (Šiuolaikinis plienas)

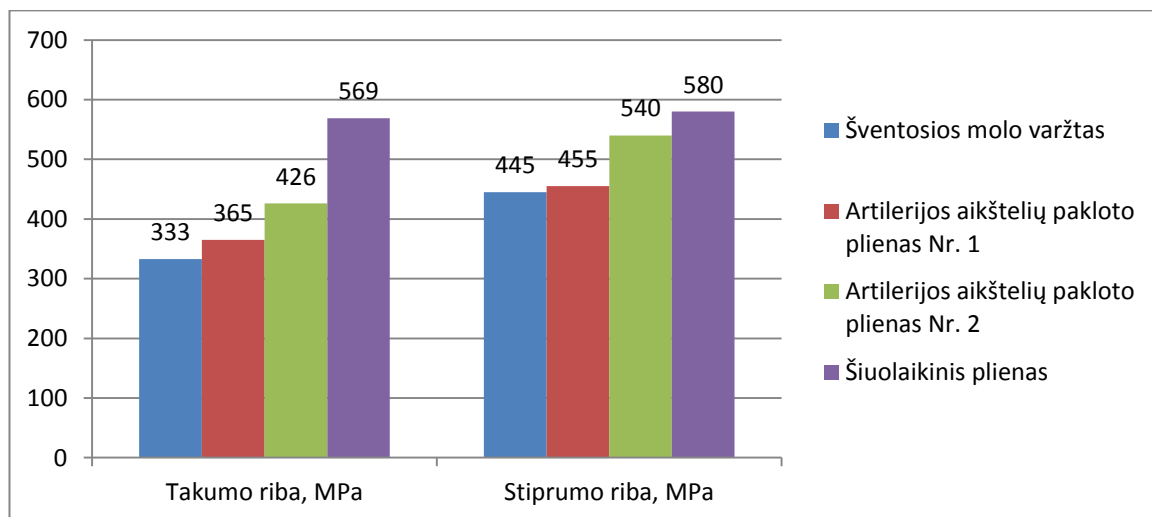
Žemiau (19 lentelė) pateikti tempimo bandymo rezultatai, apdoroti programa STATISTICA.

19 lentelė. Tempimo bandymo rezultatų statistiniai duomenys (Šiuolaikinis plienas)

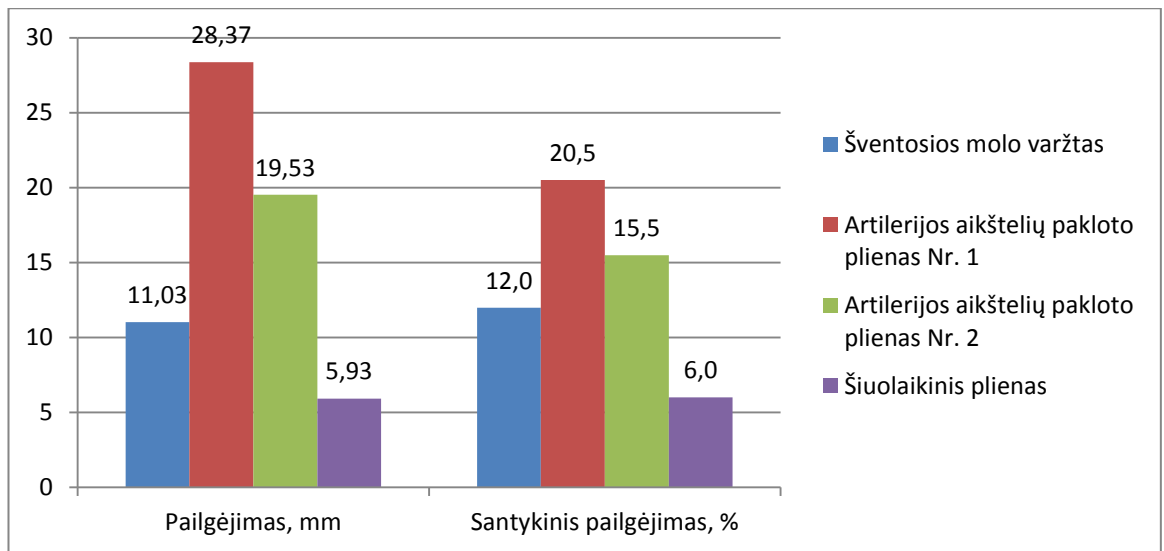
Kintamieji	Statistiniai duomenys					
	Imtis	Vidurkis	Min	Max	Dispersija	Standartinis nuokrypis
$F_{p0,2}$, N	6	10295,00	9870,00	10700,00	84950,00	291,4618
F_m , N	6	10500,00	10100,00	10800,00	68000,00	260,7681
F_f , N	6	5148,33	4870,00	5340,00	30096,67	173,4839
$f_{p0,2}$, MPa	6	568,67	545,00	582,00	173,87	13,1859
f_m , MPa	6	580,33	558,00	594,00	177,07	13,3066
dL, mm	6	5,93	5,60	6,60	0,13	0,3559
$\epsilon_{\%}$, %	6	5,83	5,50	6,50	0,17	0,4082

Iš lentelės matyti, kad vidutinė jėga ties takumo riba $F_{p0,2} = 10295 \text{ N}$, vidutinė jėga ties stiprumo riba $F_m = 10500 \text{ N}$, vidutinė jėga suirimo metu $F_f = 5148 \text{ N}$, vidutinė takumo riba $f_{p0,2} = 569 \text{ MPa}$, vidutinė stiprumo riba $f_m = 580 \text{ MPa}$, vidutinis pailgėjimas $\Delta L = 5,93 \text{ mm}$, o santykinis pailgėjimas $\epsilon_{\%} = 6,0 \%$.

Apibendrinant tempimo bandymų rezultatus, buvo sudarytos diagramos (81, 82 pav.).



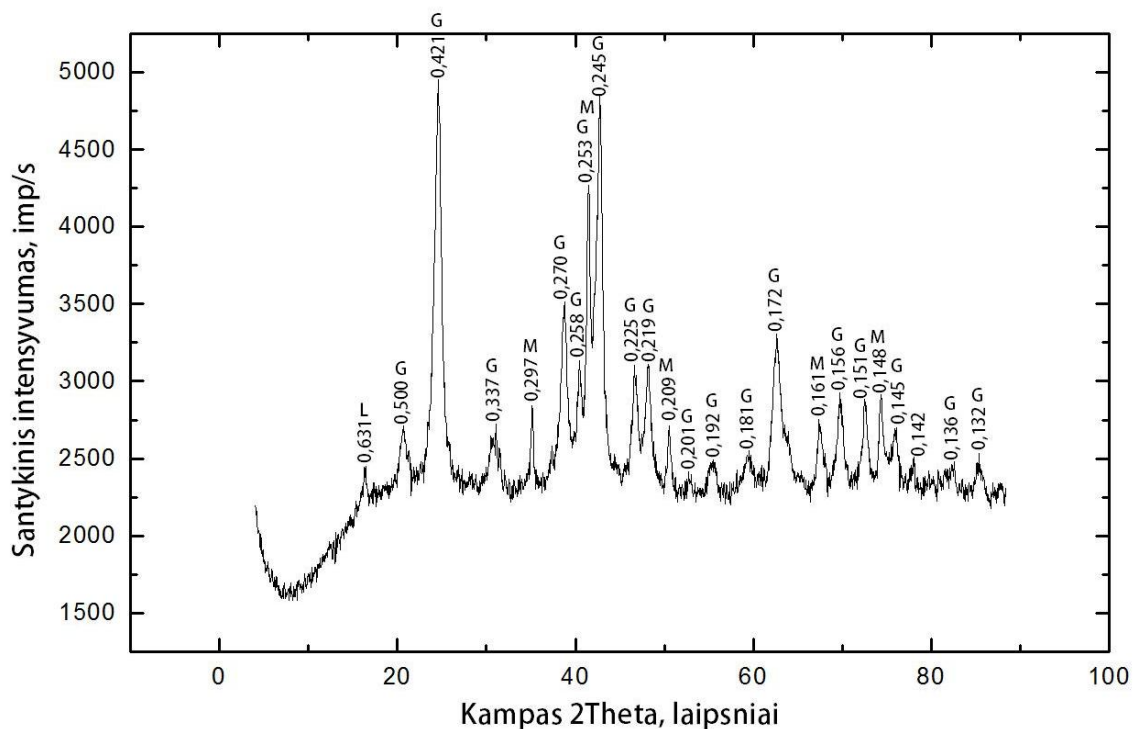
81 pav. Skirtingų metalų takumo ir stiprumo ribų palyginamoji diagrama



82 pav. Skirtingų metalų deformacijų (pailgėjimo) palyginamoji diagrama

2.2.5. Metalo rentgenografinės analizės rezultatai

Sprendžiant pagal rentgenodifrakcinės analizės duomenis (83 pav.) varžto rūdžių sluoksnyje dominuoja geležies oksidacijos produktai – mineralai giotitas $\alpha\text{-FeO(OH)}$ (rentgenogramoje šio oksihidroksido smailės pažymėtos raide „G“), kiek mažiau – magnetito Fe_3O_4 (smailės pažymėtos „M“ raide), taip pat yra nedaug kitos kristalinės formos oksihidroksido lepidokrito $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ (smailės pažymėtos „L“ raide). Giotitas varžto rūdžims suteikia gelsvai rudą spalvą, lepidokritas – intensyvesnę geltoną, o magnetitas – lemia tamsų (juodą) rūdžių atspalvį.



83 pav. Varžto rūdžių rentgenograma

Pagal analogiją su gamtiniais geležies rūdos mineralais galima teigti, kad giotitas ir lepidokritas dūlėjimo procesų metu galėjo susidaryti iš magnetito bei tiesioginės varžto metalo oksidacijos drėgnoje ir deguonimi turtingoje aplinkoje metu. Junginių su chloru tarp korozijos produktų neaptikta, nors neabejotina, kad jūros vandenyje varžto metalo korozijos mechanizmas turėjo būti elektrocheminis, o vandenyje esantys chloro jonai – trukdyti susidaryti pasyvinančiai metalo plėvelei.

2.2.6. Metalo optinės emisinės analizės rezultatai

Šventosios molo varžtas

Žemiau pateikti Šventosios uosto šiaurinio molo liekanose rasto varžto optinės emisinės analizės rezultatai.

20 lentelė. Optinės emisinės analizės rezultatai (Šventosios molo varžtas)

Elementas	1 Bandymas	2 Bandymas	3 Bandymas	4 Bandymas	Vidurkis	Standartinis nuokrypis
<i>Fe</i>	98,91	98,91	98,87	98,87	98,89	0,0240
<i>C</i>	0,0375	0,0391	0,0450	0,0386	0,0400	0,0034
<i>Si</i>	0,0264	0,0336	0,0275	0,0277	0,0288	0,0033
<i>Mn</i>	0,5860	0,5948	0,5972	0,6134	0,5978	0,0114
<i>P</i>	0,0220	0,0316	0,0324	0,0327	0,0297	0,0051
<i>S</i>	0,0533	0,0491	0,0576	0,0630	0,0558	0,0060
<i>Cr</i>	0,0203	0,0195	0,0202	0,0189	0,0197	0,0007
<i>Ni</i>	0,0426	0,0381	0,0382	0,0403	0,0398	0,0022
<i>Mo</i>	0,0117	0,0137	0,0150	0,0191	0,0149	0,0031
<i>Cu</i>	0,0792	0,0830	0,0834	0,0844	0,0825	0,0022
<i>Al</i>	0,0256	0,0093	0,0331	0,0144	0,0206	0,0108
<i>Ti</i>	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,0000
<i>V</i>	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,0013
<i>Co</i>	0,0150	0,0154	0,0155	0,0152	0,0153	0,0002
<i>Nb</i>	0,0634	0,0603	0,0642	0,0576	0,0614	0,0030
<i>W</i>	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,0000

Iš gautų rezultatų matyti, kad pliene yra 98,89 % geležies (*Fe*) ir 0,04 % anglies (*C*); nuolatinių žalingų priemaišų: 0,0297 % fosforo (*P*) ir 0,0558 % sieros (*S*); nuolatinių naudingų priemaišų: 0,0288 % silicio (*Si*) ir 0,5978 % mangano (*Mn*); legiruojančių priedų: 0,0197 % chromo (*Cr*), 0,0398 % nikelio (*Ni*), 0,0149 % molibdeno (*Mo*), 0,0825 % vario (*Cu*), 0,0206 % aliuminio (*Al*), mažiau kaip 0,01 % titano (*Ti*), mažiau kaip 0,005 % vanadžio (*V*), 0,0153 % kobalto (*Co*), 0,0614 % niobio (*Nb*) ir mažiau kaip 0,05 % volframo (*W*).

Atsižvelgiant į anglies kiekį pliene nustatyta, kad tai neanglingasis plienas, atsižvelgiant į kenksmingų priemaišų kiekį – paprastasis plienas, o atsižvelgiant į legiruojančių priedų kiekį – mažai legiruotas plienas.

Šiuolaikinis plienas

Optinės emisinės analizės tyrimas buvo atliktas ir su šiuolaikiniu plienu. Šio tyrimo rezultatai pateikti 21 lentelėje.

Iš pateiktų rezultatų matyti, kad pliene yra 99,10 % geležies (Fe), 0,1143 % anglies (C); nuolatinių žalingų priemaišų: mažiau kaip 0,005 % fosforo (P) ir mažiau kaip 0,005 % sieros (S); nuolatinių naudingų priemaišų: 0,2794 % silicio (Si) ir 0,3109 % mangano (Mn); legiruojančių priedų: 0,0238 % chromo (Cr), 0,0180 % nikelio (Ni), mažiau kaip 0,005 % molibdeno (Mo), mažiau kaip 0,01 % vario (Cu), 0,0119 % aliuminio (Al), mažiau kaip 0,01 % titano (Ti), mažiau kaip 0,005 % vanadžio (V), 0,0098 % kobalto (Co), 0,0231 % niobio (Nb) ir mažiau kaip 0,05 % volframo (W).

21 lentelė. Optinės emisinės analizės rezultatai (Šiuolaikinis plienas)

Elementas	1 Bandymas	2 Bandymas	3 Bandymas	Vidurkis	Standartinis nuokrypis
<i>Fe</i>	99,10	99,06	99,15	99,10	0,0429
<i>C</i>	0,1198	0,1276	0,0956	0,1143	0,0167
<i>Si</i>	0,2813	0,2945	0,2624	0,2794	0,0161
<i>Mn</i>	0,3124	0,3119	0,3084	0,3109	0,0022
<i>P</i>	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,0000
<i>S</i>	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,0000
<i>Cr</i>	0,0238	0,0245	0,0233	0,0238	0,0006
<i>Ni</i>	0,0179	0,0178	0,0183	0,0180	0,0002
<i>Mo</i>	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,0016
<i>Cu</i>	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,0000
<i>Al</i>	0,0082	0,0217	0,0058	0,0119	0,0086
<i>Ti</i>	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,0004
<i>V</i>	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,0009
<i>Co</i>	0,0098	0,0101	0,0095	0,0098	0,0003
<i>Nb</i>	0,0219	0,0242	0,0231	0,0231	0,0012
<i>W</i>	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,0000

Atsižvelgiant į anglies kiekį pliene nustatyta, kad tai mažanglis plienas, atsižvelgiant į kenksmingų priemaišų kiekį – geresnės kokybės plienas, o atsižvelgiant į legiruojančių priedų kiekį – mažai legiruotas plienas.

Palyginus Šventosios molo varžto ir šiuolaikinio pieno optinės emisinės analizės rezultatus (22 lentelė), nustatyta, kad šiuolaikinis pienas yra anglingesnis, jame žymiai mažiau nuolatinių žalingų priemaišų (fosforo ir sieros), daugiau nuolatinės naudingosios priemaišos silicio (tačiau gerokai mažiau mangano), taip pat šiuolaikiniame pliene yra mažiau legiruojančių priedų.

22 lentelė. Šventosios molo varžto ir šiuolaikinio pieno palyginimas

Elementas	Šventosios molo varžtas	Šiuolaikinis pienas
<i>Fe</i>	98,89	99,10
<i>C</i>	0,0400	0,1143
<i>Si</i>	0,0288	0,2794
<i>Mn</i>	0,5978	0,3109
<i>P</i>	0,0297	< 0,005
<i>S</i>	0,0558	< 0,005
<i>Cr</i>	0,0197	0,0238
<i>Ni</i>	0,0398	0,0180
<i>Mo</i>	0,0149	< 0,005
<i>Cu</i>	0,0825	< 0,01
<i>Al</i>	0,0206	0,0119
<i>Ti</i>	< 0,01	< 0,01
<i>V</i>	< 0,005	< 0,005
<i>Co</i>	0,0153	0,0098
<i>Nb</i>	0,0614	0,0231
<i>W</i>	< 0,05	< 0,05

IŠVADOS

1. Metalų cheminė bei elektrocheminė korozija, apsauga nuo korozijos, taip pat metalų tyrimų ir bandymų metodai buvo aprašyti teorinėje dalyje.

2. Buvo atlikta metalų paviršiaus būklės vizualinė analizė. Nustatyta, kad Šventosios molo varžtas, Girulių – Melnragės varžtas, bei armatūros tinklas buvo paveikti taškinės (pitingo) korozijos. Girulių – Melnragės varžtas vietomis buvo paveiktas plyšinės korozijos ir, tikėtina, tarpkristalinės korozijos. Nuvalius korozijos produktus, Šventosios molo varžto svoris sumažėjo apie 11 %, o Girulių – Melnragės varžto – apie 16 %. Šventosios molo varžto skersmuo per 75 metus vietomis sumažėjo apie du milimetrus, o vietomis net apie septynis milimetrus. Armatūros tinklo skersmuo per 72 metus vietomis sumažėjo apie tris milimetrus, o vietomis net apie penkis milimetrus. Remiantis šiais rezultatais nustatyta, kad vidutinis korozijos greitis jūrinėje aplinkoje yra 0,034 – 0,081 mm/metus. Literatūroje (Šulčius, 2006) nurodomas 0,108 mm/metus.

3. Metalų (Šventosios molo varžto) korodavusio paviršiaus bei tyrimų metu rastų korozijos židinių cheminė sudėtis buvo nustatyta FEI Quanta 200 FEG skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM). Nustatyta, kad korozijos židinyje yra žymiai mažesnis geležies kiekis, šiek tiek mažesnis mangano kiekis, o anglies iš viso neaptikta. Taip pat pastebimas deguonies, aliuminio, silicio, fosforo, sieros, natrio, chloro, kalio bei kalcio padidėjimas. Chloro, natrio, kalio bei kalcio elementai rodo jūrinės aplinkos poveikį, o didelis deguonies kiekis, kuris yra korozijos produktų sudėtinė dalis, korozinę aplinką.

4. Metalų (Šventosios molo varžto) kietumo bandymas buvo atliktas Vikerso metodu. Nustatyta, kad metalo Vikerso kietumas yra 143HV, Brinelio kietumas – 133HB.

5. Metalų (Šventosios molo varžto, artilerijos aikštelių pakloto plieno, šiuolaikinio plieno) takumo ir stiprumo ribos bei deformacijos buvo nustatytos tempimo bandymu. Nustatyta, kad Šventosios molo varžto takumo riba $f_{p0,2} = 333 \text{ MPa}$, stiprumo riba $f_m = 445 \text{ MPa}$, santykinis pailgėjimas $\varepsilon\% = 12,0 \%$; artilerijos aikštelių pakloto plieno Nr. 1 takumo riba $f_{p0,2} = 365 \text{ MPa}$, stiprumo riba $f_m = 455 \text{ MPa}$, santykinis pailgėjimas $\varepsilon\% = 20,5 \%$; artilerijos aikštelių pakloto plieno Nr. 2 takumo riba $f_{p0,2} = 426 \text{ MPa}$, stiprumo riba $f_m = 540 \text{ MPa}$, santykinis pailgėjimas $\varepsilon\% = 15,5 \%$; šiuolaikinio plieno takumo riba $f_{p0,2} = 569 \text{ MPa}$, stiprumo riba $f_m = 580 \text{ MPa}$, santykinis pailgėjimas $\varepsilon\% = 6,0 \%$.

6. Rentgenografinė varžto rūdžių analizė buvo atlikta rentgeno spindulių difraktometru DRON-5. Tyrimo metu nustatyti korozijos produktai (giotitas, magnetitas, lepidokritas) rodo jūrinės aplinkos poveikį.

7. Cheminė metalų (Šventosios molo varžto, šiuolaikinio plieno) analizė buvo atlikta optinės emisinės analizės spektroskopu ARL QuantoDesk. Nustatyta, kad Šventosios molo plienas yra

neanglingasis, paprastas, mažai legiruotas, o šiuolaikinis plienas yra mažanglis, geresnės kokybės, mažai legiruotas. Nustatyta, kad šiuolaikinis plienas yra anglingesnis, jame žymiai mažiau nuolatinių žalingų priemaišų (fosforo ir sieros), daugiau nuolatinės naudingosios priemaišos silicio (tačiau gerokai mažiau mangano), taip pat šiuolaikiniame pliene yra mažiau legiruojančių priedų.

LITERATŪRA

1. Aušrienė M. Metalų korozija ir sauga. – Klaipėda: KU leidykla, 2002. – 137 p.
2. Baltušnikas A. et al. Karštyje stiprių plienų degradavimo įvertinimas metalų struktūros tyrimo metodais // Energetika (2009). T.55. Nr.1. – p. 47 – 52
3. Celestron Handheld Digital Microscope [Žiūrėta 2011 m. balandžio 3 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.celestron.com/c3/product.php?CatID=81&ProdID=557>>.
4. EDX aprašas [Žiūrėta 2011 m. gegužės 18 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.personalas.ktu.lt/~tomtamu/SEM/eds.htm>>.
5. Elzbutas H. Statybinių medžiagų savybių ir struktūros ypatybių tyrimo metodai: mokomoji knyga. – Kaunas: Vitae Litera, 2007. – 148 p.
6. Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstrassen. – Berlin: Ernst, 2004. – 664 p.
7. ISO 9223:1992 (en). Metalų ir lydinių korozija. Aplinkos koroziškumo klasifikacija. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 1992.
8. Kačerauskas J. Kad metalai tarnautų ilgiau. – Vilnius: Kronta, 2006. – 143 p.
9. Knöfel, D. Corrosion of building materials. – Florence: Van Nostrand Reinhold, 1978. – 107 p.
10. LST CR 10320:2006. Mažai legiruotų plienų optinė emisinė analizė (įprastinis metodas). C, Si, S, P, Mn, Cr, Ni ir Cu nustatymo metodas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2006.
11. LST EN 444:1998. Neardomieji bandymai. Metalinių medžiagų radiografinio tyrimo rentgeno ir gama spinduliuote bendrieji reikalavimai. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 1998.
12. LST EN ISO 6507-1:2006. Metalai. Vickerso kietumo bandymas. 1 dalis. Bandymo metodas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2006.
13. LST EN ISO 6892-1:2009. Metalai. Tempimo bandymai. 1 dalis. Bandymo kambario temperatūroje metodas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009.
14. Naujokaitis A. Medžiagų mokslas: mokomoji knyga. – Vilnius: Technika, 2005. – 264 p.
15. Pyrantas J. Katodinė ir anodinė metalų sauga nuo korozijos. – LŽŪU leidybos centras, 2000
16. Roberge R. P. Handbook of Corrosion Engineering. – New York: McGraw-Hill, 1999. – 1072 p.
17. SEM aprašas [Žiūrėta 2011 m. gegužės 18 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.personalas.ktu.lt/~tomtamu/SEM/sem.htm>>.
18. Skominas V., Šližys R. Metalai, oras, vanduo. – Vilnius: Mokslas, 1973

19. Šimoliūnas J. Šventosios uostas: istorija, ekonominė reikšmė, uosto statyba. – Kaunas: [s.n.], 1933. – 180 p.
20. Šulčius A. Metalų korozija ir sauga. – Kaunas: Technologija, 2006. – 298 p.
21. Teikiamos analitinės paslaugos [Žiūrėta 2011 m. gegužės 18 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.personalas.ktu.lt/~tomtamu/SEM/info.htm>>.
22. Wang X. et al. Alloy elements effect on anti-corrosion performance of low alloy steels in different sea zones // Materials Letters 62 (2008). – p. 1291 – 1293
23. Žaromskis R. Šventosios uostas. – Vilnius: Petro ofsetas, 1998. – 50 p.
24. Герасименко А. А. Защита от коррозии, старения и биоповреждения машин, оборудование и сооружение. – Москва: Машиностроение. Т. I,II, 1987. – 688 с.
25. Семенова И. В. т.д. Коррозия и защита от коррозии. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.