VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MEDŽIAGOTYROS IR SUVIRINIMO KATEDRA

Raimondas Skindaras

NERŪDIJANČIO PLIENO X8CrNiTi18-10 SUVIRINTŲJŲ JUNGČIŲ ĮTAKOS VAMZDŽIŲ EKSPLOATACINIAM PATIKIMUMUI TYRIMAS

RELIABILITY ESTIMATION OF X8CrNiTi18-10 STAINLESS STEEL WELDED JOINTS OF PIPE

Baigiamasis magistro darbas

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 62408T205

Pramonės inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2009

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MEDŽIAGOTYROS IR SUVIRINIMO KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

_____
(Parašas)
Algirdas Vaclovas Valiulis
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Raimondas Skindaras

NERŪDIJANČIO PLIENO X8CrNiTi18-10 SUVIRINTŲJŲ JUNGČIŲ ĮTAKOS VAMZDŽIŲ EKSPLOATACINIAM PATIKIMUMUI TYRIMAS

RELIABILITY ESTIMATION OF X8CrNiTi18-10 STAINLESS STEEL WELDED JOINTS OF PIPE

Baigiamasis magistro darbas

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 62408T205

Pramonės inžinerijos studijų kryptis

Vadovas doc. dr. Jonas Bendikas _____ _____
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantė lekt. Angelika Petrėtienė _____ _____
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2009

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Medžiagotyros ir suvirinimo katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. 2
Data 2009-06-15

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas
Pavadinimas **Nerūdijančio plieno X8CrNiTi18-10 suvirintųjų jungčių įtakos vamzdžių eksploataciniam patikimumui tyrimas**
Autorius **Raimondas Skindaras** Vadovas doc. dr. **Jonas Bendikas**

Kalba
[X] lietuvių
[ ] užsienio

Anotacija

Chemijos ir energetikos pramonėje austenitinės klasės chromnikeliniai nerūdijantys plienai dažnai naudojami gaminti ypač atsakingoms konstrukcijoms, kurios dirba agresyviose, žmogaus gyvybei pavojingose aplinkose. Todėl yra keliami ypač aukšti ilgaamžiškumo ir patikimumo reikalavimai. Tyrime pateikiamas vamzdyje, pagamintame iš nerūdijančio austenitinės klasės X8CrNiTi18-10 plieno, atsiradusių įtrūkių tyrimas. Nagrinėjamas vamzdis dirbo 90 000 valandų agresyvioje terpėje, kur veikė aukšta temperatūra (440 °C) ir slėgis (6-7 MPa). Įtrūkių atsiradimo priežasčių įvertinimui buvo atlikti cheminės sudėties, stipruminiai, kietumo bandymai, bei metalografiniai struktūrų tyrimai. Šis tyrimas padės užkirsti kelią galimoms avarijoms, tiksliau prognozuoti ir įvertinti vamzdžių, pagamintų iš šios klasės plieno, eksploatacinį patikimumą - ilgaamžiškumą ateityje.

Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, tyrimo metodika, bandymų rezultatai, išvados, literatūros sąrašas, priedai.

Darbo apimtis: 79 p. teksto, 79 iliustracijos, 5 lentelės, 14 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: X8CrNiTi18-10 plieno įtrūkių atsiradimo tyrimas.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of **Mechanics**
Department of **Materials Science and Welding**

ISBN ISSN
Copies No. 2
Date 2009-06-15

Materials and Welding Engineering study programme bachelor (master) thesis.
Title: **Reliability estimation of X8CrNiTi18-10 stainless steel welded joints of pipe**
Author **Raimondas Skindaras** Academic supervisor doc. dr. **Jonas Bendikas**

Thesis language
[X] Lithuanian
[ ] Foreign (English)

Annotation

Chemistry and energy industry chrome-nickel stainless class of austenitic steels are often used in the production of particular structures responsible, which employs aggressive, dangerous environment of human life. Therefore, it is particularly significant for the durability and reliability requirements. The article provides a tube made of austenitic class X8CrNiTi18-10 steel, cracks resulting from the investigation. Examined the pipe is worked 90 000 hours of aggressive media, with its high temperature and pressure. Cracks in the assessment was made of chemical composition, strength, hardness testing, and metalografiniai structures. This study will help the cross-road for potential emergencies, specifically to predict and assess the pipes made from this class of steel operating reliability and durability of the future.

Structure: the introduction, survey of the related literature, description of the testing methodology, results of the test, conclusions, the list of sources and literature.

Thesis consists of: 79 p. text, 79 pictures, 5 tables, 14 bibliographical entries.

Keywords: Reliability estimation of X8CrNiTi18-10 stainless steel.

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS.....7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....7
ĮVADAS.....10
TEMOS PAGRINDIMAS.....11
2. LITERATŪROS APŽVALGA.....11
2.1 Legiruotų plienų savybės ir legiravimo elementai.....11
2.2 Eksploatacinės gausiai legiruoto plieno savybės ir jų gerinimo būdai.....13
2.3 Atsparumas kaitrai.....15
2.4 Austenitinio plieno suvirinimas.....18
2.5 Šiluminis trapumas, sigmatizicija ir senėjimas.....24
2.6 Austenitinio plieno struktūra terminio poveikio zonoje.....26
2.7 Austenitinio nerūdijančio plieno korozinis atsparumas ir jo gerinimo būdai.....27
2.8 Tarpgrūdelinė korozija.....31
3. BANDYMŲ METODIKA.....33
3.1 Bandymas skvarbiaisiais dažalais.....34
3.2 Cheminės sudėties tyrimas.....34
3.3 Tempimo bandymas.....34
3.4 Smūginio tąsumo bandymas.....35
3.5 Kietumo bandymas.....35
3.6 Mikrokietumo bandymas.....36
3.7 Mikroskopinis tyrimas.....36
3.8 Skaičiavimai baigtinių elementų metodu.....37
4. BANDYMŲ REZULTATAI.....38
4.1 Tyrimas skvarbiaisiai dažalais.....38
4.2 Cheminės sudėties tyrimas.....39
4.3 Tempimo bandymas.....40
4.4 Smūginio tąsumo bandymas.....42
4.5 Kietumo bandymas.....43
4.6 Mikrokietumo bandymas.....44
4.7 Mechaninių savybių rezultatų palyginimas su praktikoje nustatytomis.....46
4.8 Mikrostruktūrų tyrimai.....48
4.8.1 Mikrostruktūrų tyrimai optiniu mikroskopu.....48

4.8.2 Skanuojanti mikroskopija.....52
4.8.3 Mikrostruktūrų tyrimai skanuojančiu elektroniniu mikroskopu.....64
4.9 Skaičiavimai baigtinių elementų metodu.....67
REZULTATŲ APIBENDRINIMAS.....72
IŠVADOS.....73
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....75
PRIEDAI.....76

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Cheminės sudėties tyrimo rezultatai.....39
2 lentelė. Mechaninių savybių bandymo rezultatai.....40
3 lentelė. Smūginio tąsumo bandymo rezultatai.....42
4 lentelė. Kietumo bandymo rezultatai.....43
5 lentelė. Mechaninių savybių bandymo rezultatų įvertinimas pagal EN 10216-5:2004.....44

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Gausiai legiruoto plieno atsparumo valkšnumo įtrūkiams priklausomybė nuo darbinės temperatūros.....14
2 pav. Gausiai legiruoto plieno takumo ribos įtempių ir valkšnumo stiprio priklausomybė nuo darbinės temperatūros.....14
3 pav. Nerūdijančio austenitinio plieno irimas viršijus valkšnumo ribą.....14
4a pav. Valkšnumo pasireiškimas.....16
4b pav. Įtempių įtaka valkšnumui.....16
5 pav. Temperatūros įtaka valkšnumui.....17
6 pav. Tarpgrūdeliniai mikronevientisumai, susidarantys vykstant valkšnumo deformacijai.....18
7 pav. Tarpkristalinės korozijos susidarymo priklausomybė nuo temperatūros ir laikymo joje.....20
8a pav. Austenitinio plieno siūlės struktūra.....20
8b pav. Pagrindinio metalo struktūra.....20
9 pav. Grūdelių augimas ir dispersinių fazių išsiskyrimas eksploatuojant plieną aukštoje temperatūroje.....25
10a pav. Karbidų išsiskyrimas pagal grūdelių ribas ir grūdelių sublokų ribas.....26
10b pav. Karbidų koaguliavimas eksplotuojant plieną aukštoje temperatūroje ilgesnį laiką.....26
11 pav. Sulfidas.....26
12 pav. Metališkasis intarpas.....26
13 pav. Anglies tirpumo piklausomybė nuo temperatūros austenitiniame pliene.....28
14 pav. Karbidai, susidarę ant grūdelių ribų.....28
15 pav. Mikrogalvaninių elementų susidarymas dvifazinėje plieno struktūroje.....28

16 pav. Chromo pasiskirstymo, neatsparaus tarpkristalinei korozijai chromnikelinio plieno grūdelyje schema.....28
17 pav. Tarpkristalinė korozija austenitiniame pliene.....29
18 pav. Nerūdijančio plieno tarpkristalinė korozija.....30
19 pav. X8CrNiTi18-10 plieno, turinčio skirtingą anglies kiekį, karbidinės fazės susidarymo pradžios priklausomybė.....32
20 pav. Įtrūkių vietos ir formos nustatymas skvarbiaisiais dažalais senajame vamzdyje.....38
21 pav. Įtrūkių vietos ir formos nustatymas skvarbiaisiais dažalais senajame vamzdyje.....38
22 pav. Įtrūkių vietos ir formos nustatymas skvarbiaisiais dažalais senajame vamzdyje.....38
23 pav. $R_{P0,2}$ ir R_m gautų bandymo reikšmių tarp seno ir naujo vamzdžių grafinis atvaizdavimas..41
24 pav. A_5 gautų bandymo reikšmių tarp seno ir naujo vamzdžių grafinis atvaizdavimas.....41
25 pav. Mikrokietumas išilgai vamzdžio ašies.....44
26 pav. Mikrokietumas išilgai vamzdžio sienelės storio.....45
27 pav. Seno vamzdžio mikrostruktūra.....47
28 pav. Naujo vamzdžio mikrostruktūra.....47
29 pav. Seno vamzdžio mikrostruktūra.....47
30 pav. Naujo vamzdžio mikrostruktūra.....47
31 pav. Seno vamzdžio mikrostruktūra.....48
32 pav. Naujo vamzdžio mikrostruktūra.....48
33 pav. Seno vamzdžio mikrostruktūra.....48
34 pav. Naujo vamzdžio mikrostruktūra.....48
35 pav. Seno vamzdžio mikrostruktūra.....48
36 pav. Seno vamzdžio mikrostruktūra.....48
37 pav. Naujo vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra.....49
38 pav. Naujo vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra.....49
39 pav. Naujo vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra.....50
40 pav. Naujo vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra.....50
41 pav. Seno vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra.....50
42 pav. Seno vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra.....50
43 pav. Seno vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra.....50
44 pav. Suvirinimo siūlės mikrostruktūra.....51
45 pav. Suvirinimo siūlės mikrostruktūra.....51
46 pav. Suvirinimo siūlės mikrostruktūra.....51
47 pav. Suvirinimo siūlės mikrostruktūra.....51
48 pav. Pagrindinių legiravimo elementų kitimas vidiniame seno vamzdžio paviršiuje.....53

49 pav. Pagrindinių legiravimo elementų pakitimas vidiniame naujo vamzdžio paviršiuje.....54
50 pav. Pagrindinių legiravimo elementų pakitimas išoriniame seno vamzdžio paviršiuje.....55
51 pav. Pagrindinių legiravimo elementų pakitimas išoriniame naujo vamzdžio paviršiuje.....56
52 pav. Intarpų analizė senajame vamzdyje.....57
53 pav. Intarpų analizė naujajame vamzdyje.....58
54 pav. TiN lūžio paviršiuje, gautame po smūginio tąsumo bandymo, senajame vamzdyje.....59
55 pav. TiN lūžio paviršiuje, gautame po smūginio tąsumo bandymo, naujame vamzdyje.....60
56 pav. Besiformuojantys įtrūkiai senajame vamzdyje išilgai, pagal grūdų ribas ant metalografinio bandinio skerspjūvio.....61
57 pav. Besiformuojantys įtrūkiai senajame vamzdyje išilgai, pagal grūdų ribas ant metalografinio bandinio skerspjūvio.....61
58 pav. Besiformuojantys įtrūkiai senajame vamzdyje išilgai, pagal grūdų ribas ant metalografinio bandinio skerspjūvio.....61
59 pav. Įtrūkio topografija, padidinta 50 kartų.....62
60 pav. Įtrūkio paviršiaus topografija, padidinta 200 kartų.....62
61 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 15 000 kartų.....63
62 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 15 000 kartų.....63
63 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 25 000 kartų.....63
64 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 25 000 kartų.....63
65 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 25 000 kartų.....64
66 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 25 000 kartų.....64
67 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 25 000 kartų.....64
68 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 25 000 kartų.....64
69 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 50 000 kartų.....64
70 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 50 000 kartų.....64
71 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 50 000 kartų.....65
72 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 50 000 kartų.....65
73 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 100 000 kartų.....65
74 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 100 000 kartų.....65
75 pav. Geometrinis modelis su apkrovomis ir apribojimais.....67
76 pav. Geometrinio modelio padalijimas į baigtinius elementus.....68
77 pav. Įtempiai pagal X ašį.....69
78 pav. Apskritiminiai įtempiai.....69
79 pav. Išilginiai įtempiai.....70

ĮVADAS

Chemijos ir energetikos pramonėje austenitinės klasės chromnikeliniai nerūdijantieji plienai dažnai naudojami gaminti ypač svarbioms konstrukcijoms, kurios dirba agresyviose, žmogaus gyvybei pavojingose aplinkose. Todėl yra keliami ypač aukšti ilgaamžiškumo ir patikimumo reikalavimai. Tyrime pateikiamas vamzdis, pagamintas iš chromnikelinio austenitinės klasės, stabilizuoto titanu X8CrNiTi18-10 plieno, atsiradusių įtrūkių tyrimas. Šiam plienui atitikmuo pagal europos standartą EN 10088-1 „Sąrašas nerūdijančių plienų“ yra X6CrNiTi18-10. Tai analogiškas plienas rusiškui, kurį reglamentuoja standartas GOST 5633-61

Tiriamasis objektas sudarytas iš dviejų tarpusavyje suvirintų austenitinės klasės vamzdžių. Prie senojo vamzdžio Ų219x8 mm, kuris buvo eksploatuotas 90 000 valandų, privirintas naujas vamzdis Ų219x10 mm. Vamzdyno metalą eksploatavimo metu veikia termomechaninės apkrovos bei koroduojanti agresyvi aplinka. Termines apkrovas sukelia nuolat veikianti aukšta t=440 °C temperatūra. Mechanines apkrovas sukelia darbinės terpės slėgis sistemos viduje, kuris yra lygus p=6-7 MPa. Esant tokioms eksploatacinėms sąlygoms dažnai susiduriama su labai aktualia problema, - įtrūkių susidarymu. Šis tyrimas padės tiksliau prognozuoti ir įvertinti vamzdžių, pagamintų iš šios klasės plieno, eksploatacinį patikimumą - ilgaamžiškumą ateityje. Tam, kad įvertinti įtrūkių atsiradimo priežastis, buvo atlikti cheminės sudėties, mechaninių savybių, kietumo bandymai, metalografiniai struktūrų tyrimai bei skaičiavimai baigtinių elementų metodu.

Eksploatuojant vamzdynus ilgą laiką, vyksta nežymūs pakitimai vamzdyne: mažėja vamzdyno sienelių storis, vyksta plieno struktūriniai pakitimai, virsmai, kurie priveda prie mechaninių savybių pablogėjimo, medžiagos degradacijos ir panašiai. Austenitiniai plienai yra gausiai legiruoti chromu, nikeliu ir kitais elementais. Ilgą laiką eksploatuotame aukštoje temperatūroje tokiame pliene ant grūdelių ribų, o ypač jų sandūroje, išsiskiria chromo karbidai ar kitokie junginiai. Tai sukelia tarpkristalinę koroziją kuri plinta grūdelių ribomis į medžiagos gilumą. Šie korozijos produktai silpnina arba visai suardo tarpatominius ryšius tarp grūdų. Suirus tarpgrūdeliniam ryšiui susidaro papildomi įtempiai, kurie lengviau deformuoja medžiagą ir taip susidaro įtrūkiai. Į visa tai bus atkreipiamas didžiausias dėmesys tiriant įtrūkių susidarymo priežastis vamzdyje.

TEMOS PAGRINDIMAS

Vamzdžiai iš austenitinės klasės plieno dėl savo gerų mechaninių, korozinių savybių, patvarumo aukštoje temperatūroje, naudojami chemijos ir energetikos pramonėje, kur veikia agresyvios, aukšto slėgio ir aukštatemperatūrės terpės. Dėl to įvykus avarijoms ne tik kyla gaisrai, užteršiama gamta pavojingais produktais, įmonės patiria didelius nuostolius, bet ir pasiglemžiamas didžiausias turtas – žmogaus gyvybė. Todėl šioms atsakingoms konstrukcijoms yra keliami ypač aukšti ilgaamžiškumo ir patikimumo reikalavimai. Veikiant dideliam slėgiui, aukštai temperatūrai ir agresyviai korozinei terpei, šiose pramonės šakose dažnai susiduriama su labai aktualia problema, - įtrūkių susidarymu vamzdynuose. Tai išaukia greitą ir neprognozuojamą konstrukcijos suirimą. Todėl labai svarbu ieškoti atsakymų, nustatyti įtrūkių atsiradimo priežastis ir prevencines priemones, kurios padėtų išvengti didelių nelaimingų atsitikimų ir brangaus remonto ateityje. Šis tyrimas padės užkirsti kelią galimoms avarijoms, tiksliau prognozuoti ir įvertinti vamzdžių, pagamintų iš austenitinės klasės plieno, eksploatacinį patikimumą ir ilgaamžiškumą.

2. LITERATŪROS APŽVALGA

Nerūdijantys austenitinės klasės plienai yra plačiai naudojami chemijos ir energetikos pramonėje. Šie plienai eksploatuojami dažniausiai aukštoje temperatūroje, kur veikia dideli slėgiai ir agresyvi korozinė terpė. Patikimumas – tai gaminio geba dirbti be sutrikimų, defektų, nustatytą laikotarpį. Kad įvertiniti austenitinės klasės plienų patikimumą, eksploatuojant aukštose temperatūrose ir agresyviose terpėse, reikia išmanyti pliene vykstančius procesus veikiant šiems parametrams. Tai valkšnumo procesai, mecaninių savybių ir struktūros kitimas ilgai eksplotuojant plieną aukšoje temperatūroje, korozinis atsparus, austenitinių plienų suvirinamumą ir panašiai. Visa tai apžvelgsime šiame skyriuje. Tai leis kokybiškai atlikti įtrūkių atsiradimo priežasčių tyrimą ir palyginti su praktikoje anksčiau gautais rezultatais.

2.1 Legiruotų plienų savybės ir legiravimo elementai.

Nerūdijančiais plienais vadinami geležies lydinių grupė – tai geležies-chromo-nikelio lydiniai. Gausiai legiruotam plienui priklauso lydiniai, kuriuose geležis sudaro per 45 %, visų kitų legiravimo elementų suma yra didesnė kaip 10 %, o vieno legiravimo elemento kiekis – ne mažesnis kaip 8 %. Nerūdijantiesiems austenitiniams plienams svarbiausias legiravimo elementas yra chromas, kurio pliene turi būti per 12 %, taip pat austenizuojantis elementas Ni. Atsižvelgiant į darbo sąlygas, plienams gali būti keliami įvairūs reikalavimai: atsparumas korozijai, patvarumas ir

atsparumas kaitrai, aukštas valkšnumo atsparumas, vidinės struktūros stabilumas, atsparumas kavitacijai ir kt. Plienas X8CrNiTi18-10 yra universalus, kadangi yra atsparus korozijai ir kaitrai. Svarbiausi šio plieno legiravimo elementai yra chromas ir nikelis. Be šių elementų yra legiruojama C, Si, Mo, Nb, V, Ti, Al, Cu, Mn, ir kitais elementais. Šie elementai suteikia plienui stiprumo, atsparumo kaitrai, įvairioms korozijos rūšims, keičia plieno šiluminio plėtimosi koeficientą, lydymosi temperatūrą, smūginį tąsumą. [3]

Chromas yra svarbiausias nerūdijančių austenitinių plienų legiravimo elementas. Šis elementas suteikia plienui bazinį korozinį atsparumą. Didėjant chromo kiekiui pliene, didėja jo korozinis atsparumas, taip pat jo atsparumas aukštatemperatūrei oksidacijai.

Nikelis yra austenizuojantis elementas, todėl nuo jo kiekio priklausoaustenitinės struktūros stabilumas įvairiose temperatūrose. Nikelis didina plieno atsparumą tempimui ir lenkimui, mažina korozinį greitį, didina stiprį, sudarydamas metališkuosius junginius medžiagoje.

Molibdenas dina plieno atsparumą bendrąjai ir vietinei korozijai, mechaninį stiprį ir yra stiprus feritizuojantis elementas. Jis skatina antrinių fazių susidarymą austenitiniuose plienuose. Dėl susidarančių molibdeno karbidų didėja plieno kietumas.

Varis yra struktūrą austenizuojantis elementas, didinantis plieno korozinį atsparumą. Taip pat plienuose gali sudaryti metališkuosius junginius, kurie didina plieno stiprumą.

Manganas naudojamas siekiant padidinti nerūdijančių plienų aukštatemperatūrį stiprį. Jis veikia austenito santykį keičiantis temperatūrai. Žemoje temperatūroje manganas stabilizuoja austenitą, o aukštoje temperatūroje – feritą. Manganas didina azoto tirpumą pliene ir naudojamas prireikus, kad austenitiniame pliene būtų daugiau azoto. Jis taip pat suriša sierą ir šalina karštinio trapumo reiškinį. Pagrindinis šio elemento trūkumas tas , kad jis skatina augti austenito grūdelius, esant aukštesnei temperatūrai.

Silicis didina plieno aukštatemperatūrį oksidacinį atsparumą, stiprumą ir takumo ribą.

Anglis yra stiprus austenizuojantis elementas ir skatina austenitinės struktūros susidarymą. Anglis labai padidina plieno mechaninį stiprumą, tačiau didėjant anglies kiekiui labai mažėja plieno tarpgrūdelinis atsparumas korozijai. Anglis labai mažina lenkimo stiprumą bei korozinį atsparumą ir didina kietumą, o tuo pačiu stiprumą. Didėjant kietumui ir stiprumui, smūginis tąsumas mažėja.

Titanas yra stiprus feritizuojantis ir karbidus sudarantis elementas. Jis mažina anglies poveikį plienui ir skatina feritinės struktūros susidarymą. Titanas gerina nerūdijančio plieno smūginį tąsumą ir atsparumą korozijai, nes dėl titano pliene mažėja įterpimo kietųjų tirpalų kiekis. Sudarymas metališkuosius junginius didina plieno stiprumą ir kietumą. Legiruotuose mažaangliuose plienuose titanas sudaro daugelį cheminių junginių, kurie riboja grūdo dydį, sukelia didspersinį kietėjimą, taip pat formuoja sulfidinius intarpus. Titanas yra stiprus dezoksidatorius, todėl jis naudojimas tik kokybiškuose ramaus stingimo (dezoksiduotame aliuminiu) pliene. Jis yra

naudingas, jeigu jis sudaro kitokius negu titano oksidas junginius. Esant mažam titano kiekiui apie austenito grūdelį susidaro titano nitrido dalelės (TiN), kurios stabdo austenitinio grūdelio augimą. Didėjant titano kiekiui, iš pradžių didėja titano, turinčio mangano sulfidų (Mn, Ti) S kiekis. Dar labiau didinant titano kiekį, susidaro rutulinės formos titano karbosulfidai $Ti_4C_2S_2$ ir titano karbidai (TiC). Titano karbidų dalelės ypač didina kietumą plieno.

Niobis, kaip ir titanas, yra karbidus sudarantis elementas. Jis gerina austenitinio plieno tarpgrūdelinei korozijai atsparumą ir mechanines plieno savybes aukštoje temperatūroje.

Aliuminis gerina plieno oksidacinį atsparumą. Naudojamas karščiui atspariems plienams legiruoti. Jis taip pat sujungia azotą, sudarydamas nitridus, susmulkina grūdelius, ir todėl didina atsparumą nuovargiui, tąsumą žemoje temperatūroje, mažina senėjimo efektą.

Vanadis didina plieno kietumą, nes sudaro kietus vanadžio karbidus.

Tarpkristalinei korozijai austenitiniuose plienuose išvengti dedama titano arba niobio 5-10 kartų daugiau, negu pliene yra anglies. Tokie plienai vadinami stabilizuotais. Nestabilizuotą plieną eksplotuojant aukštesnėje kaip 500 °C temperatūroje, grūdelių ribose išsiskiria chromo karbidai ir padidėja plieno polinkis tarpkristalinei korozijai. [3]

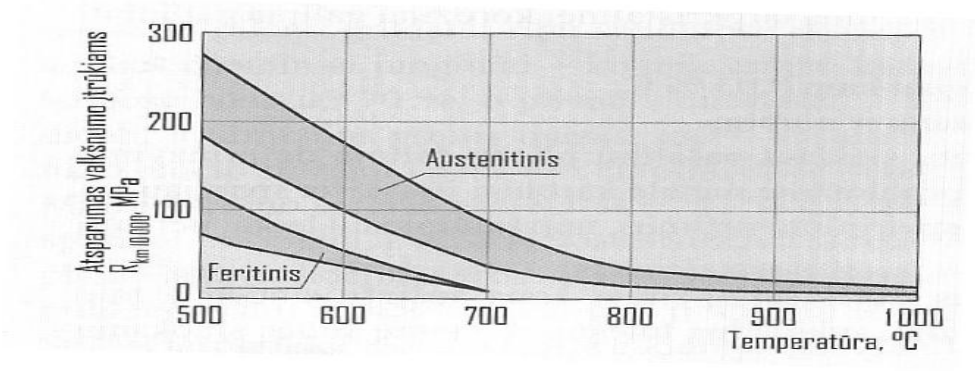
2.2 Eksploatacinės gausiai legiruoto plieno savybės ir jų gerinimo būdai

Gausiai legiruotas plienas, priklausomai nuo cheminės sudėties, gali būti naudojamas aukštoje ir žemoje temperatūroje. Šiose temperatūrose plieną dažnai veikia ilgalaikės statinės ar kintamosios apkrovos, korozija, erozija, kavitacija ir kiti veiksniai. Plieno stiprumui aukštoje temperatūroje apibūdinti, be ribinio stiprumo ir takumo, taikomi specialieji mechaninio stiprumo aukštoje temperatūroje kriterijai. Plieno atsparumas kaitrai dažniausiai nustatomas pagal ribinį valkšnumą, ilgaliakį stiprumą ir nuovargio ribą. Esant ciklinei apkrovai nerūdijantysis plienas gali suirti veikiant apkrovai, kuri būna mažesnė negu stiprio riba.

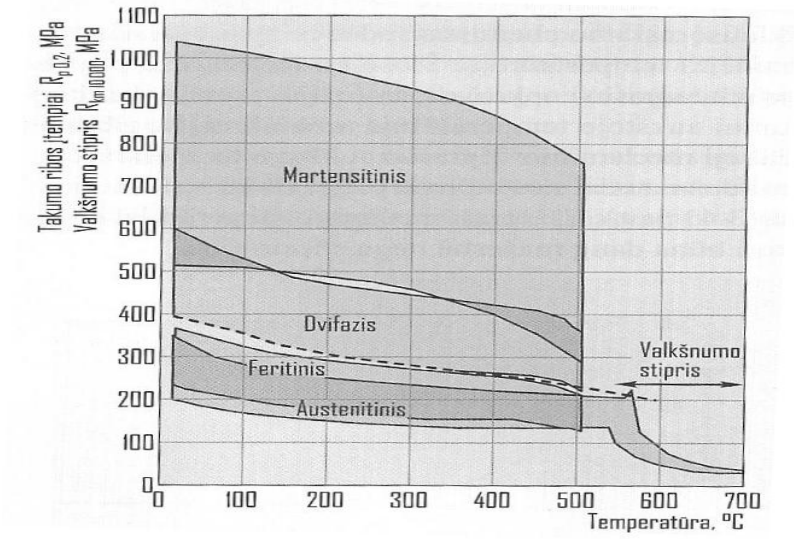
Atsparumas nuovargiui. Konstrukcijos atsparumas nuovargiui priklauso nuo apkrovos ciklų skaičiaus ir veikiančių įtempių amplitudės. Suvirintojoje jungtyje įtempių amplitudei daug reikšmės turi suvirintojo sujungimo geometriniai parametrai (rumbelės aukščio ir siūlės pločio santykis, įtempių koncentratoriai). Plieno nuovargio ribos ir tempimo stiprio santykis priklauso nuo apkrovos pobūdžio, t.y. nuo kintančios apkrovos ciklo mažiausiųjų ir didžiausiųjų įtempių santykio. Plieno atsparumą nuovargiui labai veikia darbo aplinka. Jeigu aplinka sukelia plieno koroziją, tai atsparumas nuovargiui labai sumažėja. Esant dideliam apkrovos ciklų dažniui korozinis nuovargis pasireiškia mažiau, nes medžiagos ilgą laikiškumą lemia ciklų kiekis. Kai apkrovos ciklų dažnis yra mažas, tai agresyvioje aplinkoje naudojama konstrukcija labiau nukenčia nuo korozinio poveikio,

negu nuo ciklinio nuovargio. Labiau legiruoti austenitiniai plienai yra atsparesni korozijai ir taip pat pasižymi didesniu atsparumu koroziniam nuovargiui.

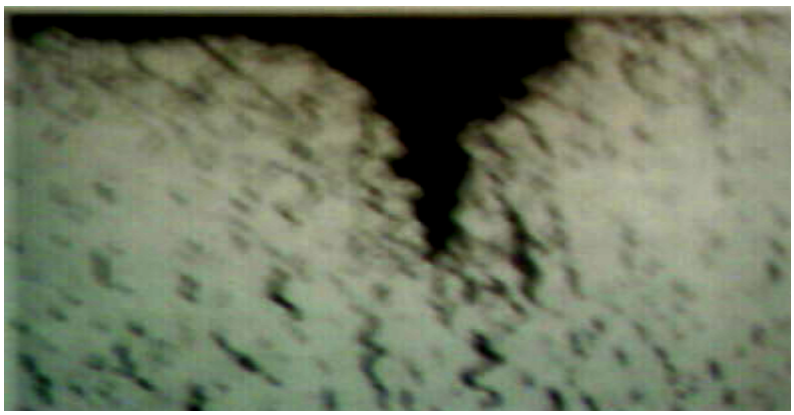
Atsparumas valkšnumui. Metalo valkšnumas yra medžiagos geba, veikiant ilgalaikei nuolatinei apkrovai, lėtai ir nenutrūkstamai plastiškai deformuotis. Valkšnumo riba laikomas įtempis, kuriam veikiant tam tikrą laiką, nustatytoje temperatūroje, atsiranda tam tikras ištįsimas. Skirtingos struktūrinės klasės plienų valkšnumas skiriasi (1 pav., 2 pav.)



1 pav. Gausiai legiruoto plieno atsparumo valkšnumo įtrūkiams priklausomybė nuo darbinės temperatūros



2 pav. Gausiai legiruoto plieno takumo ribos įtempių ir valkšnumo stiprio priklausomybė nuo darbinės temperatūros



3 pav. Nerūdijančio austenitinio plieno irimas viršijus valkšnumo ribą [8]

Ilgalaikį plieno stiprumą charakterizuoja įtempiai, per tam tikrą laiką nustatytoje temperatūroje suardantys statinės apkrovos veikiamą metalą.

Atsparumas kaitrai. Plieno atsparumą kaitrai didina legiravimo elementai (molibdenas, volframas, vanadis), kurie aukštoje temperatūroje stabdo procesus, bloginančius plieno mechanines savybes. Šie elementai didina karbidinių fazių dispersiškumą ir jų atsparumą koaguliacijai. Dėl to padidėja plieno stiprumas ir šio stiprumo ilgalaikiškumas aukštoje temperatūroje. Itin daug reikšmės turi susidaranti labai dispersiška (smulki) metališkoji fazė Fe_2 (W, Mo). Ši fazė išsiskiria kristalinės struktūros defektų vietose. Dėl šios priežasties ir aukštoje temperatūroje metalo stiprumas išlieka pastovus, nes medžiagoje blokuojamas dislokacijų judėjimas.

Atsparumą kaitrai didina ir chromas. Kai chromo kiekis pliene yra didesnis nei 12 %, susidaro $Cr_{23}C_6$ tipo chromo karbidai. Šie karbidai labai sunkiai koaguliuoja, todėl ir aukštoje temperatūroje karbidinės dalelės blokuoja dislokacijų judėjimą ir palaiko plieno stiprumą. Didesni molibdeno, vanadžio ir volframo kiekiai gali būti žalingi. Didindami plieno atsparumą kaitrai, jie didina α – ferito fazės stabilumą ir siaurina austenito sritį. [11; 13]

Patvarumas kaitroje. Patvarumas kaitroje yra metalo savybė chemiškai neirti, kai aukštoje temperatūroje veikia oras arba agresyvi terpė. Plieno patvarumas kaitroje priklauso ne tik nuo jo bendro oksidacinio patvarumo. Aukštoje temperatūroje gali susidaryti įtrūkiai, sukelti lokalizuoto įtempių ir oksidacijos poveikio. [1]

2.3 Atsparumas kaitrai

Nerūdijantiems austenitinės klasės plienams, kurie dirba aukštoje temperatūroje yra keliami du reikalavimai: mechaninis atsparumas kaitrai ir cheminis atsparumas kaitrai.

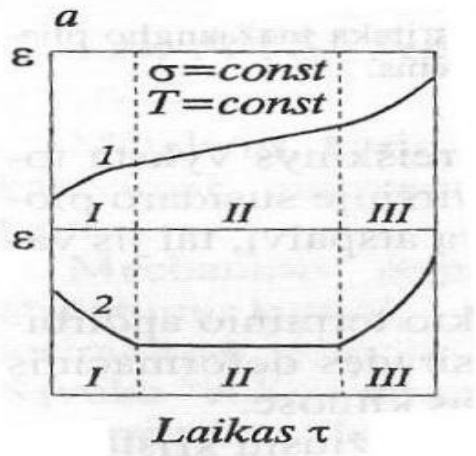
Mechaninis atsparumas kaitrai, trumpiau vadinamas tiesiog atsparumu kaitrai, – tai metalo geba priešintis plastinių deformacijų atsiradimui, plitimui ir gaminio suirimui aukštesnėje

temperatūroje. Sąvoka aukšta temperatūra yra sąlyginė. Kiekvienai medžiagai jos apatinė riba – 0,3 T_{lyd} (K), gali būti skirtinga. Medžiagos atsparumą kaitrai daugiausia rodo trys rodikliai: trumpalaikis stiprumas esant aukštai temperatūrai, valkšnumas ir ilgalaikis stiprumas esant aukštai temperatūrai.

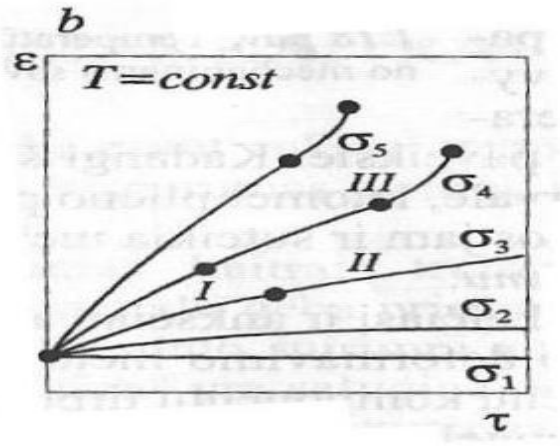
Kylant temperatūrai, silpnėja tarpatominiai ryšiai, intensyvėja difuziniai procesai, todėl keičiasi metalų struktūra ir savybės. Kuo aukštesnė temperatūra, tuo labiau mažėja metalo tamprumo modulis, stiprumo bei takumo ribos, kietumas ir didėja plastiškumas. Pakilus temperatūrai, keičiasi ir anksčiau atlikto terminio apdirbimo efektas, mažėja šaltojo deformavimo metu atsiradęs deformacinis sukietinimas, keičiasi vienų komponentų tirpumas kituose. Metalai sudaryti iš daugelio savo kraštais susilydžiusių kristalitų, vadinamų metalo grūdais. Jų susilydymo kraštai, kurių storis nuo kelių iki keliasdešimt atomų sluoksnių, vadinami grūdelių ribomis. Grūdelių ribų kristalinė sandara iškreipta ir todėl kambario temperatūroje šios ribos yra stipresnės už pačius grūdelius. Dėl to darbui normalioje temperatūroje pageidautinas smulkiagrūdis metalas – jame riboms tenka didesnė tūrio dalis. Aukštesnėje temperatūroje šios ribos persitvarko, jose kaupiasi lydesnės priemaišos, ir šios ribos tampa silpnesnės už grūdelius. Todėl darbui aukštesnėje temperatūroje tinkamesnis stambiagrūdis metalas.

Medžiagos geba lėtai ir nenutrūkstamai deformuotis nuo ilgalaikės apkrovos vadinamas valkšnumu. Visų valkšnumo reiškinių priežastis – medžiagos atomų šiluminė energija. Atomams virpant apie tam tikras padėtis, pasireiškia šiluminės energijos fliuktacijos – ši energija laikinai sukaupiama ir praretėja. Fliuktacijos padeda atomams persiskirstyti, t.y. nugalėti energetinius barjerus ir plastiškai persiskirstyti. Dėl šių priežasčių vyksta ir relaksacija – savaiminis įtempių, būtinų tam tikrai deformacijai palaikyti, sumažėjimas bei bei išsilyginimas, kai medžiaga pereina į stabilesnę termodinaminę būseną. Kuo aukštesnė temperatūra, tuo intensyviau švytuoja atomai, ryškesnės fliuktacijos ir tuo lengviau keičiasi medžiagos būsena. [14]

Valkšnumo kreivės – santykinės deformacijos prieaugis per tam tikrą laiką esant pastoviai temperatūrai, vaizduojamos 4a ir 4b paveiksluose. Kai apkrova nedidelė (įtempimas σ_1), valkšnumas nepasireiškia, kai šiek tiek didesnė (σ_2), tai iš pradžių gana intensyvūs valkšnumo reiškiniai palaipsniui lėtėja ir todėl santykinis pailgėjimas išauga iki tam tikro lygio. Kai apkrova dar didesnė (σ_3), tuomet valkšnumo kreivėje išryškėja dvi stadijos: pirmoji nenusistovėjusio valkšnumo, antroji nusistovėjusio valkšnumo (tolygaus intensyvumo), Kai apkrova didelė (σ_4), atsiranda ir trečioji valkšnumo stadija: valkšnumas progresyviai didėja ir įvyksta galutinis suirimas. Kai apkrova labai didelė (σ_5), pirmoji valkšnumo stadija gali iš karto pereiti į trečiąją.

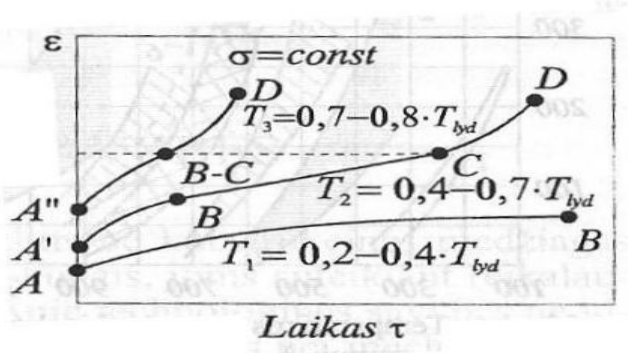


4a pav. Valkšnumo pasireiškimas: valkšnumo kreivė (1) ir intensyvumas (2)



4b pav. Įtempių įtaka valkšnumui: nusistovėjusio valkšnumo stadija (I), nenusistovėjusio (II) ir suirimo stadija (III)

Valkšnumo riba – tai pastovus įtempimas, kuriam susidarius esamoje temperatūroje per tam tikrą laiką atsiranda tam tikras pailgėjimas. Valkšnumas priklauso nuo temperatūros ir įtempių dydžio. Kai įtempiai nedideli, mažesni už tam tikrą kritinį, valkšnumas, yra grįžtamasis. Jis atsiranda dėl priemaišinių atomų grįžtamojo persitvarkymo metalo kristalinėje sandaroje. Kai įtempiai didesni už kritinį, valkšnumas priklauso nuo temperatūros. Esant neaukštai homogeninei temperatūrai, t.y. išreikštai santykiu su lydymosi temperatūra Kelvino skalėje, sudarančiai 0,2 – 0,4 T_{lyd}, valkšnumas yra nusistovėjęs. Mat proceso metu kristalinės sandaros netobulumai palaipsniui persitvarko vis mažiau ir paties proceso intensyvumas lėtėja. Aukštose temperatūrose valkšnumas (0,4 – 0,7 T_{lyd}) pagrįstas grūdelių ribų deformacijomis. Šioje temperatūroje valkšnumas pereina visas tris stadijas: I – nenusistovėjusio intensyvumo, II – nusistovėjusio intensyvumo, III – sparčiai didėjančio intensyvumo. Kuo aukštesnė temperatūra, tuo intensyvesnė ir trumpesnė antroji valkšnumo stadija. Tai vaizduojama 5 paveiksle.

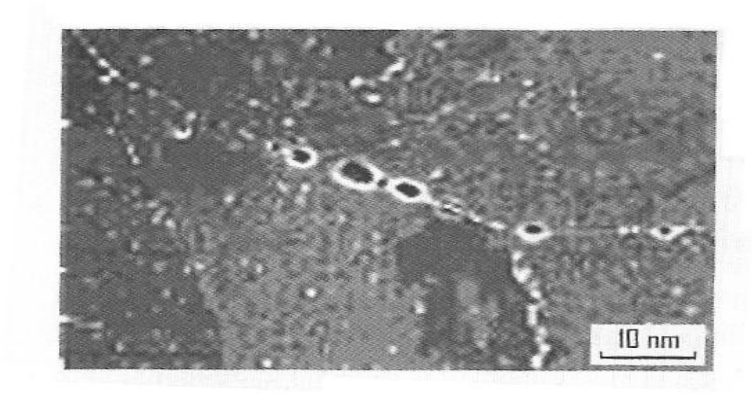


5 pav. Temperatūros įtaka valkšnumui: AB – pirmoji stadija; BC – antroji stadija; CD – trečioji stadija

Difuzinis valkšnumas, susijęs su didesniu masės persislinkimu, būdingas aukštai temperatūrai. Šiuo atveju, kai temperatūra pakankamai aukšta, pirmoji nenusistovėjusio

valkšnummo stadija gali iš karto pereiti į trečiąją sparčiai intensyvėjančio valkšnumo stadiją. Jos metu kūnas suyra. Spartų valkšnumo intensyvumą gali grūdų ribų porėtumas bei įtrūkiai. Ilgalaikis stiprumas aukštoje temperatūroje panašiai kaip ir valkšnumas. Tai įtempimas, kuris esant pastoviai temperatūrai per tam tikrą laiką medžiagą suardo.

Vykstant valkšnumo deformacijai suvirintųjų jungčių ir austenitiniame ner9dijančiame pliene, deformacijos židiniai telkiasi išilgai grūdelių ribų (6 pav.), todėl šiose vietose susidaro tuštumėlės, vakancijos, mikroporos. [2]



6 pav. Tarpgrūdeliniai mikronevientisumai, susidarantys vykstant valkšnumo deformacijai [8]

Suvirintuose chrominiuose plieno jungtyse mikrotuštumos pradeda susidaryti plienui pasiekus vidutinę valkšnumo stadiją. Valkšnumo deformacijai progresuojant mikrotuštumų kiekis didėja, nes jos jungiasi viena su kita ir sudaro augančias mikrotuštumas. Veikiant įtempiams mikrotuštumos lengvina metalo įtrūkio plitimą, nes jų sankaupų zonose tarpgrūdelinis ryšys būna silpnesnis. [4]

2.4 Austenitinio plieno suvirinimas

Austenitinių nerūdijančių plienų gama yra labai plati. Austenitinės klasės plienai pagal legiravimo sistemą būna chromnikeliniai ir manganiniai. Bendrasis chromo, nikelio ir mangano kiekis būna chromniekeliniame pliene yra per 24 %, o chromo kiekis – daugiau kaip 16 %. Chromas suteikia plienui atsparumo oksidacijai ir korozinio atsparumo kai kuriose terpėse. Nikelis ir manganas stabilizuoja austenitą plačiame temperatūros intervale – nuo kristalizacijos temperatūros iki kambario temperatūros. Austenitiniai nerūdijantieji plienai termiškai negrūdinami, po atleidimo yra nemagnetiniai. Šaltai apdoroti ar suvirinti plienai pasižymi silpnomis magnetinėmis savybėmis. Visi austenitiniai nerūdijantieji plienai suvirinami įvairiais suvirinimo būdais. Austenitiniai plienai

pasižymi beveik 54 % didesniu nei angliniai plienai šiluminio plėtimosi koeficientu, didesne elektrine varža ir mažesniu šiluminiu laidumu. [1]

Kai kurie iš šių plienų kristalizuojasi iš pradžių į feritinę fazę, kuri vėliau, pusiausvyros sąlygomis ar vykstant aukštatemperatūrei deformacijai (daugiau nei 1 000 °C), virsta austenitu. Austenitas išlieka stabilus iki kambario ar žemesnės temperatūros. Kai kurie austenitiniai plienai, atliekant šaltąją deformaciją arba atšaldant iki žemų temperatūrų, gali būti priverstinai transformuoti į martensitą. Ar austenitinė plieno struktūra išliks plienui ataušus iki kambario temperatūros, priklauso nuo M_S (martensitinio susidarymo pradžios) temperatūros. Šiai temperatūrai apskaičiuoti, atsižvelgiant į plieno cheminę sudėtį yra sudarytos empyrinės formulės:

$$M_S = 502 - 810\,(\%\,C) - 1230\,(\%\,N) - 13\,(\%\,Mn) - 30\,(\%\,Ni) - 12\,(\%\,Cr) - $$
$$- 54\,(\%\,Cu) - 6\,(\%\,Mo), \quad °C \qquad (1)$$

Tipiško austenitinio nerūdijančio plieno M_S temperatūra yra žemesnė už kambario, tačiau jeigu martensitas susidaro veikiant įtempiams, tai ši temperatūra gali būti gerokai aukštesnė.

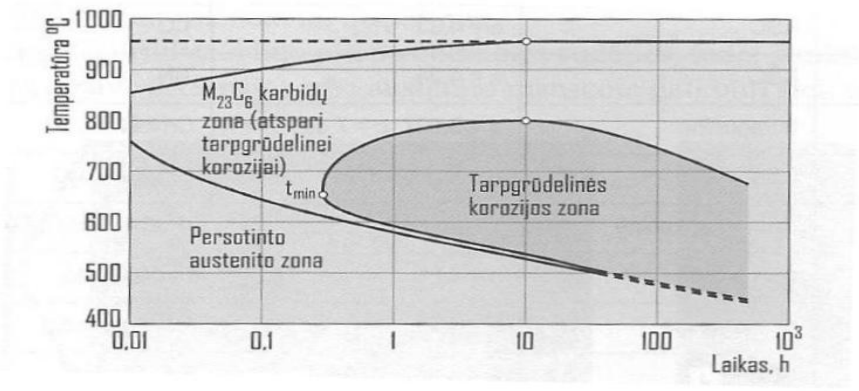
Austenitinio plieno struktūrinę sudėtį lemia feritizuojančių ir austenizuojančiųjų legiravimo elementų balansas. Struktūrą feritizuojantieji elementai yra Cr, Mo, Ti, Nb, W, V, Al, austenizuojantieji – Ni, C, N, Cu. Kai kurie elementai, pavyzdžiui, Mn, neskatina aukštatemperatūrio ferito virsmo austenitu, stabilizuoja austenitą ir taip padeda austenitui virsti martensitu žemoje temperatūroje. Kaip ir chromas, nikelis didina azoto tirpumą pliene, todėl galima gauti mažanikelinius, bet daug Mn ir N turinčius nerūdijančius plienus. [4]

Atsižvelgiant į Cr ir Ni kiekį lydynyje, plieno rekristalizacija vyksta skirtingai, ir tai labai svarbu suvirintųjų jungčių savybėms. Plienai, kurių kristalizacija prasideda austenitų kristalų augimu ir kuriuose tik paskutiniame kristalizacijos etape kristalizuojasi šiek tiek ferito, yra vadinami pirminės austenitinės kristalizacijos plienais.Suvirinimo terminėje zonoje dėl didelio aušimo greičio dalis ferito gali išlikti net kambario temperatūroje. Antrąjai plienų grupei būdinga tai, kad iš pradžių kristalizuojasi feritas ir tik kristalizacijos pabaigoje susidaro šiek tiek austenito. Šie plienai vadinami pirminės feritinės kristalizacijos plienais. Auštant siūlės metalui, feritas virsta austenitu, tačiau dėl didelio aušinimo greičio struktūroje gali išlikti ir šiek tiek ferito. Trečios grupės plienai po kristalizacijos turi feritinę struktūrą, kuri auštant virsta austenitine, nors ir šiuo atveju dėl didelio aušinimo greičio struktūroje gali išlikti šiek tiek pirminio ferito.

Plienai, kurie pirminės kristalizacijos metu turi feritinę struktūrą, yra atspariausi karštiesiems įtrūkiams. Lydiniai, turintys po kristalizacijos austenitinę struktūrą, yra neatsparūs karštiesiems įtrūkiams susidaryti. Suvirintųjų jungčių kokybės požiūriu pagal kristalizacinį struktūros tinkamumą šie plienai išsidėsto taip: pirminio ferito, transformacinio virsmo metu

susidariusio ferito, pirminio austenito ir transformacinio virsmo metu susidariusio austenito struktūros plienai.

Austenitinio plieno struktūros stabilumas priklauso nuo legiravimo elementų kiekio ir rušies. Suvirinant terminio poveikio zonos metalą veikia lanko šiluma. Jeigu pliene prieš suvirinant yra karbidų, jie maždaug 1 000 °C temperatūroje ištirpsta kietajame tirpale. Plienui lėtai aušant šie karbidai 950 – 500 °C temperatūroje vėl išsiskiria. Karbidai dažniausiai išsiskiria pagal austenito grūdų ribas, todėl austenito kietajame tirpale šiose vietose mažėja chromo kiekis. Mikrotūriai, kuriuose chromo kiekis yra mažesnis negu 12 % tampa neatsparios tarpkristalinei korozijai. Toks plienas vadinamas sensibilizuotu (įjautrintu). Nerūdijantieji austenitiniai plienai, kuriuose yra mažiau nei 0,03 anglies, tarpkristalinei korozijai nejautrūs. Sekantis paveikslas rodo kaip tarpkristalinės korozijos susidarymas priklauso nuo temperatūros ir išlaikymo laiko joje.

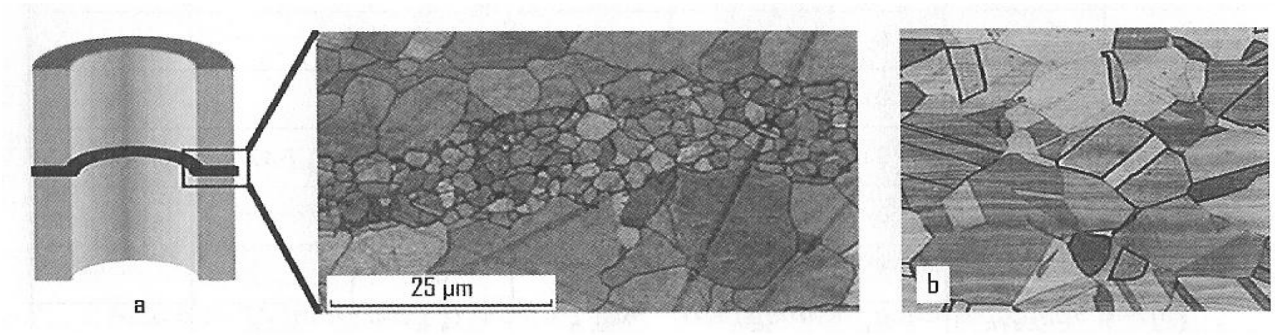


7 pav. Tarpkristalinės korozijos susidarymo priklausomybė nuo temperatūros ir laikymo joje

Karbidus sudarantis titanas ir niobis sumažina tarpkristlinės korozijos tikimybę. Šie elementai suriša anglį, ir chromas, išlikęs kietajame tirpale, išlaiko savo antikorozinę funkciją. Austenitiniai plienai dažnai legiruojami daugeliu komponentų, todėl suvirinimo terminio poveikio zonoje gali susidaryti kitų dispersinių fazių, kurios kartais stiprina plieną, o kartais blogina jo mechanines charakteristikas.

Suvirintosios jugties kokybei kenkia ir susidaranti σ – fazė (48 % Cr + 52 % Fe). Austenitiniame, turinčiame šiek tiek ferito, siūlės metale dėl didelio aušinimo greičio σ – fazė nesusidaro, tačiau jeigu suvirintas plienas termiškai apdorojamas 700 – 900 °C temperatūroje, dalis ferito virsta σ – faze. Dideli Cr, Mo, Si, Ti, Nb kiekiai spartina šios fazės susidarymą. Dėl šių priežasčių vengiama plieną termiškai apdirbti šiose temperatūrose. [12]

Austenito kiekis priklauso nuo plieno cheminės sudėties, todėl struktūra būna tik austenitinė arba austenito matricoje gali būti šiek tiek ferito.



8a pav. Austenitinio plieno siūlės struktūra (tamsesni grūdeliai feritas)

8b pav. Pagrindinio metalo struktūra

Austenitinio plieno šiluminis plėtimosi koeficientas yra didesnis negu chrominio nerūdijančio plieno, todėl suvirinimo deformacijos būna didesnės. Plieno plastinės savybės yra geresnės už anglinio ir mažai legiruoto pleino savybes. Plienas yra stipresnis už anglinį ir mažai legiruotą plieną didesnėje kaip 550 °C temperatūroje, o jo atsparumas oksidacijai išlieka labai geras ir tokioje temperatūroje. Siūlės metalo struktūra dažniausiai šiek tiek skiriasi nuo valcuotojo suvirinamo metalo struktūros. Siūlės austenite gali atsirasti šiek tiek ferito, nedideli kiekiai martensito ir karbidų (titano, niobio).

Austenitinis plienas gerai suvirinamas taikant daugelį elektrolankinio suvirinimo būdų. Jis suvirinamas glaistytaisiais elektrodais (MMA), nelydžiuoju elektrodu inertinėse dujose (TIG), lydžiuoju elektrodu inertinėse dujose (MIG) ir aktyviose dujose (MAG), milteline viela, po fliusu, plazminiu būdu. Lankas apsaugomas fliusu, šlakais arba apsauginėmis dujomis. Apsauga turi būti tokia, kad siūlės metale išliktų visi svarbiausi legiravimo elementai ir į siūlę nepatektų elementų ar junginių, mažinančių jos korozinį atsparumą. Korozinį metalo atsparumą labai mažina anglis, todėl jos kiekis fliuse, šlakuose ar apsauginėse dujose turi būti griežtai kontroliuojamas. Dėl drėgmės, patenkančio iš glaisto, fliuso arba dujų, siūlės metalas gali tapti akytu, todėl drėgmės kiekis turi būti minimalus. [3]

Suvirinant plonesnius nei 5 – 6 mm gaminius, daug sunkumų kyla dėl metalo deformacijos, atsirandančios dėl didelio austenitinio plieno šiluminio plėtimosi koeficiento ir blogo šilumos laidumo. Storesniems nei 6 mm gaminiams gali būti naudojama pakopinė suvirinimo technologija, o užvirintoji siūlės dalis papildomai šaldoma. Suvirinant tos pačios rūšies nerūdijančius plienus, pridėtinio metalo cheminė sudėtis turi būti panaši į suvirinimo metalo cheminę sudėtį. Kitokios cheminės sudėties pridėtinis metalas imamas tada, kai norima, kad siūlės metalas būtų stipresnis ar atsparesnis korozijai už pagrindinį metalą. Tokiais atvejais pridėtiniame metale dažniausiai yra daugiau legiravimo elemnetų, tačiau šie elementai neturi labai didnti δ –

ferito kiekio metale. Ferito kiekis metale turėtų priklausyti nuo reikiamo korozinio atsparumo ar tokios struktūros tinkamumo naudoti aukštoje temperatūroje.

Daugelį austenitinio plieno suvirintųjų jungčių galima naudoti iš karto po suvirinimo. Plienai dažniausiai suvirinami tokios pat ar panašios cheminės sudėties elektrodiniu ar pridėtiniu metalu. Pridėtinio metalo pasirinktis priklauso nuo to, ar siūlės metale gali būti ferito, ar ne. Jeigu siūlės metale gali būti būti ferito, tada pridėtinio metalo ir suvirinimo režimo pasirinktys būna labai įvairios. Jeigu siūlėje kristalizuojasi pirminis feritas, tai suvirinimo režimų pasirinktys gali būti panašios kaip suvirinant mažaanglį plieną. Tais atvejais, kai siūlės metale neturi būti ferito, pridėtinio metalo ir suvirinimo režimo pasirinktys yra ribotos, nes kyla pavojus, kad gali susidaryti karštųjų įtrūkių. Viena austenitinės struktūros siūlės metale gali susidaryti kristalizacinių įtrūkių. Išvengti įtrūkių galima pasitelkus technologines priemones: virinamos išgaubtos rumbelės siūlės, pasirenkama mažo skersmens viela, maža suvirinimo srovė, metalo lašų pernešimas trumpaisiais jungimais ir kita.

Plienai suvirinami be padėklų, ant nuimamųjų padėklų arba ant nenuimamųjų padėklų, gaminamų iš to paties metalo. Nenuimamieji padėklai naudojami tada, kai reikia gerai suvirinti siūlės pašaknį (pvz. vamzdynų), o nuimamojo padėklo naudoti negalima. Chemijos pramonės ir atominės energetikos vamzdynai neturi būti suvirinami ant nuimamųjų padėklų, nes šie padėklai mažina vamzdžio spindį, trukdo atlikti vamzdynų valymo darbus, ties padėklais dažniausiai prasideda metalo korozija.

Plienus rekomenduojam virinti dideliu greičiu, dėl to mažėja tiesinė šiluminė energija, mažiau išsiskiria dispersinių karbidų, mažėja gaminių deformacijos. Nerūdijančio plieno lydymosi temperatūra yra mažesnė negu mažaanglio plieno. Dėl mažesnės lydymosi temperatūros ir mažesnio šiluminio laidumo suvirinimo srovė būna mažesnė. Dėl didelio šiluminio plėtimosi koeficiento būtinos specialios priemonės, mažinančios suvirinamo gaminio deformacijas, įlinkius, išsipūtimus. Norint sumažinti suvirinamo gaminio išlinkimus ir deformacijas, naudojamos įvairios technologinės priemonės: atbulinis pakopinis virinimas taikomas vienasluoksnėms siūlėms, sekcinis, kaskadinis, virinimas kalneliu – daugiasluoksnėms siūlėms.

Mažo skersmens vamzdžius sunku suvirinti glaistytaisiais elektrodais (MMA), taikant MAG arba MIG būdus. Geriausia kokybė gaunama suvirinant TIG būdu, tarp suvirinamų detalių įstačius įdėklus. Nerūdijantiems plienams suvirinti apsaugotu lanku naudojama miltelinė viela, mažaanglio ir nerūdijančių plienų vielos. Kai naudojama mažaanglio plieno plieno viela, legiravimo elementai į siūlės metalą patenka iš glaisto. Suvirinant glaistytaisiais elektrodais suvirinimo srovė turi būti 10 – 15 % mažesnė nei suvirinant tokio paties skersmens anglinio plieno elektrodu. Suvirinimo metu nebūna elektrodo galo švytavimo judesio. Geros kokybės siūlės plotis turi būti ne didesnis kaip 4 elektrodinės vielos skersmenys, o kievieno sluoksnio storis – ne didesnis kaip 3 mm.

Nuo kiekvieno siūlės sluoksnio, prieš virinant kitą, reikia nuvalyti šlaką specialiu nerūdijančiojo plieno šepečiu. Suvirinant iš abiejų pusių, siūlės pašaknys turi būti valomas taikant šlifavimo, mechaninio iškirtimo arba deguonio drožimo būdus. Siūlės geometrinės formos kokybė priklauso nuo fliuso ar apsauginės atmosferos poveikio skystojo metalo paviršiniam įtempiui. Todėl gali susidaryti įpjovų, nekokybiškai formuotis šaknis, atsirasti defektų.

Nerūdijančių plienų glaistas turi fluoro junginių, padedančių chromo ir nikelio oksidams pereiti iš suvirinimo vonelės į šlaką. Nuo siūlės metalo nenuvalyti šių fliusų likučiai labai skatina ir spartina plyšinę ir taškinę koroziją bei korozinį pleišėjimą. Dėl šių priežasčių šlako likučiai turi būti rūpestingai pašalinkti iš abiejų siūlės pusių. Jeigu dėl gaminio konstrukcijos negalima nuvalyti siūlės pašaknio, tai pašaknio siūlę reikia suvirinti ne glaistytuoju elektrodu, o taikant MIG, MAG ar TIG būdus. [1]

Suvirinant austenitinį nerūdijantį plieną apsauginėse dujose, lašo pernešimo metu legiravimo elementų nuostoliai yra labai maži, nes Ar, He ar jų mišinių dujos izoliuoja nuo sąlyčio su oru lašelius. Legiravimo elelmntų perėjimo į suvirinimo vonelę efektyvumas suvirinant argone 95 %. Suvirinant lydžiuoju elelktrodu argone (MIG), naudojama nuolatinė atvirkščio poliškumo srovė. Lanko įtampa yra 26 – 33 V. Jei srovės tankis didesni nei 150 A/mm^2, vyksta srovinis metalo pernešimas, o jei tankis ir įtampa mažesni, tai elektrodo metalas bus pernešamas lašais. Kai suvirinamo metalo storis mažesnis nei 2,5 mm, elektrodo metalui pernešti geriau tinka trumpųjų jungimų pernešimas arba impulsinis suvirinimo būdas. Suvirinant šiais būdais, išilginė energija yra mažesnė, todėl gaminio deformacijos irgi būna mažesnės.

Lankui apsaugoti naudojamos argono dujos ir ar Ar + O_2, Ar + He ir Ar + CO_2, dujų mišiniai. Ar + O_2 dujų mišinyje šiek tiek oksiduojami legiravimo elelmentai, tačiau sumažėja skystojo metalo paviršinis įtempis ir lanko degimas tampa stabilesnis. Sroviniam metalo pernešimui dažniausiai naudojamas Ar + O_2 dujų mišinys. Helio ir argono dujų mišinys, kuriame yra iki 3 % CO_2, naudojamas tada, kai elektrodo metalas pernešamas trumpaisiais jungimais. Naudojant tik CO_2 apsaugines dujas, būna labai didelių silicio ir mangano nuostolių, be to, padidėjus anglies kiekiui, sumažėja mažaanglio austenitinio plieno korozinis atsparumas. Suvirinant argone, metalo įvirinimas yra labai siauras, todėl kartais gali atsirasti nevisiško briaunų išlydymo defektų. Į argono dujas primaišius helio, siūlės apatinės dalies plotis padidėja ir briaunų nevisiško išlydymo defektai išnyksta. [3]

Austenitinis nerūdijantis plienas suvirinamas ir milteline viela. Miltelinė viela gali būti savisaugė arba jei būtina paildoma CO_2 arba Ar + 2 % O_2 dujų apsauga. Suvirinamas nuolatine atvirkščio poliškumo srove. Suvirinant CO_2 dijose, šiek tiek išdega kai kurie legiravimo elementai ir siūlės metale padidėja anglies kiekis. Kai naudojamos Ar + O_2 dujos, šiek tiek išdega kai kurie

legiravimo elementai. Suvirinant savisauge milteline viela, legiravimo elementų nuostoliai yra panašūs, tačiau siūlės metale padidėja azoto ir siūlės metale sparčiai keičiasi ferito kiekis. [10]

Austenitinis plienas, legiruotas lengvai išdegančiais suvirinimo metu elementais, suvirinamas nelydžiuoju elektrodu inertinėse dujose ar jų mišiniuose (TIG būdu). Suvirinama nuolatine srove tiesioginio poliškumo srove. Lanko maitinimo šaltinio voltamperinė charakteristika turi būti krintančioji. TIG būdas labai tinka siūlių pašaknio sluoksnio suvirinimui, kai technologiškai negalima naudoti padėklų.

Plazminiu būdu galima suvirinti ir plonus ir storus gaminius. Suvirinant po fliusu, dėl didelės išilginės suvirinimo energijos gaunam didelio skerspjūvio ploto siūlė, yra mažas siūlės metalo kristalizacijos ir aušimo greitis. Dėl šių veiksnių didėja legiravimo elelmnetų segregacija, išauga struktūros grūdelis, didėja karštųjų ar kristalizacinių įtrūkių susidarymo tikimybė. Ilgą laiką sąveikaujant siūlės metalui su fliusu, į siūlę pereina daug silicio, sieros, fosforo.

Austenitinio plieno suvirintosios jungtys termiškai apdorojamos retai ir tik tuomet, kai reikia sumažinti suvirinimo įtempius ir pagerinti korozinį atsparumą. Plieno atkaitinimo metu dėl suvirinimo terminio ciklo susidarę karbidai ištirpsta austenite. Greitai aušinant anglis išlieka kietajame tirpale, o karbidų iš naujo nesusidaro. Atkaitinamas turi būti visas gaminys. Atkaitinimo temperatūra priklauso nuo plieno rūšies, trukmė – nuo karbidų tirpimo greičio ir gaminio storio. Daugelio austenitinio plieno atkaitinimo temperatūra 1 000 – 1 150 °C. Atkaitinami plonesni gaminiai aušinami ore, o storesni vandenyje. Nerūdijančio plieno, eksploatuojamo aukštesnėje kaip 450 °C temperatūroje, suvirinimo įtempiai mažinami, jungtis termiškai apdorojamas 780 – 840 °C temperatūroje. [1]

2.5 Šiluminis trapumas, sigmatizicija ir senėjimas

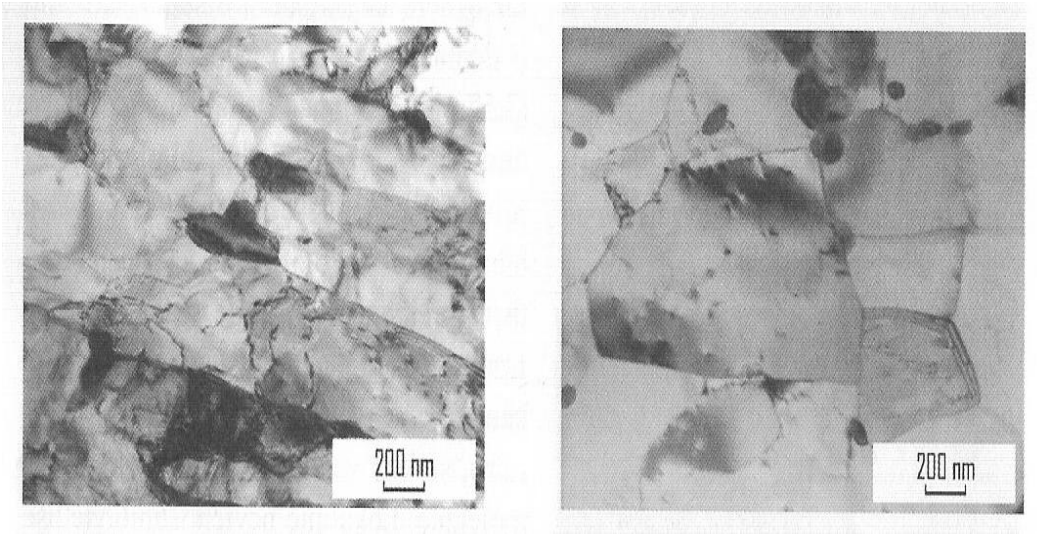
Ilgą laiką naudojant aukštoje temperatūroje (500 – 850 °C) gausiai legiruoto plieno suvirintąsias jungtis, siūlių metalo, terminio poveikio zonos plastiškumas vis mažėja ir metalas pasidaro trapus. Skiriamos trys gausiai legiruoto plieno siūlių metalo trapumo rūšys: šiluminis trapumo, sigmatizacijos ir senėjimo.

Šiluminis trapumas būdingas austenitinio nerūdijančio plieno (> 15 % Cr) siūlėms ir naudojamoms 350 – 500 °C temperatūroje. Formuojantis šiluminiam trapumui, dar vadinamam 475 laipsnių trapumui, aiškių struktūrinių plieno pokyčių nebūna. Šiluminis trapumas – tai savotiškas plieno senėjimas, atsirandantis išsiskiriant submikroskopinio dydžio dalelėms tirpalo grūdelių paribiuose. Šiluminį trapumą skatina chromas, vanadis, niobis, silicis, kiek mažiau aliuminis ir titanas. Radikaliausia priemonė,mažinti šiluminį trapumą, yra ferito ribojimas dvifazėse suvirintose siūlėse.

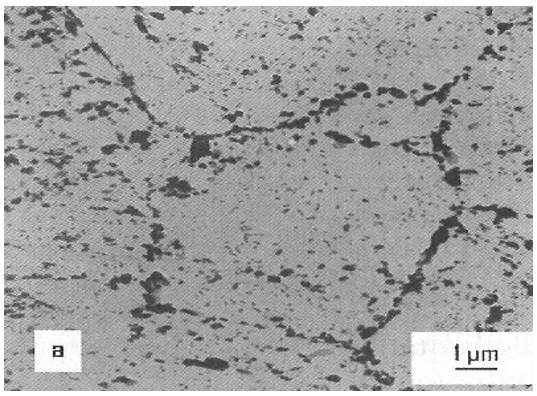
Sigmatizacijos trapumas atsiranda siūlės metalą ilgą laiką kaitinant 550 – 875 °C temperatūroje. Siūlės metale iš kietojo tirpalo susidaro trapūs metališkieji junginiai (Fe–Cr), vadinami σ – faze. σ – fazė atsiranda austenite, kai chromo kiekis pliene yra didesnis kaip 25 %. Efektyviausia priemonė naikinti sigmatizacinį trapumą, yra suvirintųjų jungčių įkaitinimas iki 1 050 – 1 100 °C temperatūros ir greitas aušinimas. Mat padidinus temperatūrą, σ – fazės kristalai vėl virsta kietaisiais tirpalais, o greitai aušinant, naujai susidaryti jie nespėja. Austenitinų siūlių sigmatizacinis trapumas mažėja, ribojant pliene molibdeno, chromo, vanadžio, volframo ir silicio kiekį. [12]

Austenitinio nerūdijančio plieno suvirintosiose jungtyse gali atsirasti trapumas, sukeliamas susidarančių metališkųjų fazių. Metališkieji junginiai tai σ – fazė, dažniausiai susidaro daugiau kaip 14 % Cr turinčiuose plienuose 500 – 900 °C temperatūroje. Sigma fazė išsiskiria grūdų ar grūdų sublokų ribose. Jos susidarymas didina plieno kietumą, mažina plastiškumą, tempimo stiprumą ir korozinį atsparumą.

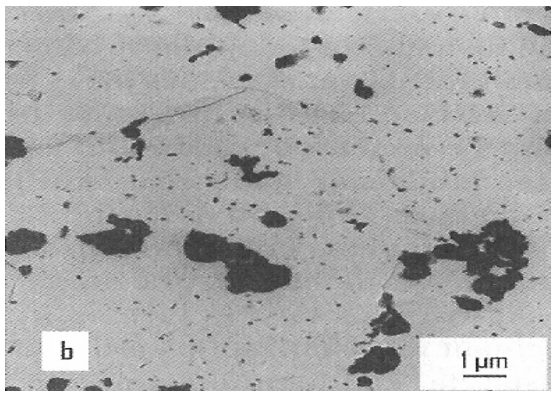
Senėjimo trapumas būdingas suvirintosioms jungtims, ilgą laiką eksploatuotoms aukštoje 500 – 750 °C temperatūroje. Pagal grūdelių ribas išsiskiria antriniai karbidai, nitridai ir metališkieji junginiai. Naudojant plieną aukštoje temperatūroje ilgą laiką, jame ne tik išsiskiria dispersinės fazės, bet vyksta ir grūdelio rekristalizacinis augimas (9 pav. 10 pav.). Grūdelio augimas ypač pastebimas naudojant šaltojo deformavimo plieną.



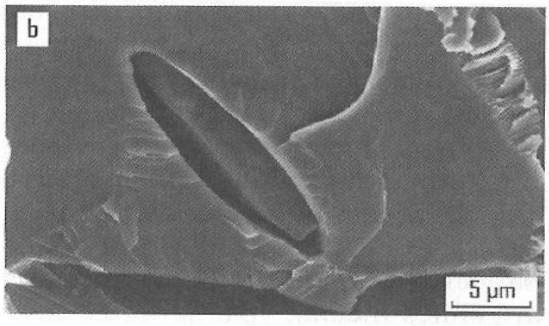
9 pav. Grūdelių augimas ir dispersinių fazių išsiskyrimas eksploatuojant plieną aukštoje temperatūroje



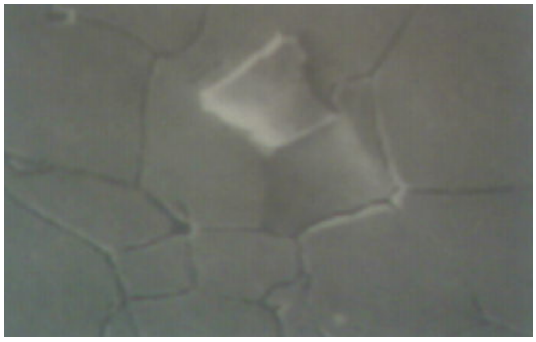
10a pav. Karbidų išsiskyrimas pagal grūdelių ribas ir grūdelių sublokų ribas [8]



10b pav. Karbidų koaguliavimas eksplotuojant plieną aukštoje temperatūroje ilgesnį laiką [8]



11 pav. Sulfidas [12]



12 pav. Metališkasis intarpas

Senėjimo trapumas mažiau pasireiškia suvirintose jungtyse, turinčiose mažai anglies, nesusidaro antrinių karbidų. Suvirintąją jungtį įkaitinus iki 900 °C ir aukštenės temperatūros, antriniai karbidai ir metališkieji junginiai skyla, o juos sudarantys cheminiai elementai vėl ištirpsta kietajame tirpale. [1]

2.6 Austenitinio plieno struktūra terminio poveikio zonoje

Termino poveikio zonos temperatūrai pakilus virš rekristalizacijos temperatūros, pradeda augti struktūros grūdas.Varomijo šio proceso jėgas yra grūdelių paviršiaus ploto santykio su grūdelių tūriu mažėjimas. Augančių grūdelių ribos migruoja jų kreivio centro kryptimi. Terminio poveikio zonos metale austenitinio grūdelio augimą stabdo dispersinė karbidų ir karbonitridų fazė. Didėjant plieno įkaitinimo temperatūrai, austenitinio grūdelio augimą stabdančios antrinės fazės kiekis mažėja, todėl mažėja ir grūdelių augimo stabdymo efektyvumas. Taigi suvirintojo sujungimo terminio poveikio zonoje antrinės fazės poveikis augančiam austenito grūdeliui bus nevienodas, nes priklausys nuo metalo įkatimo temperatūros. Geriausios plieno mechaninės savybės būna, kai antrinės fazės grūdelių skersmuo yra 5 – 10 nm, tačiau suvirinimo šiluminio ciklo metu jų grūdelių

augimą stabdantis poveikis yra nepakankamas, todėl terminio poveikio zonoje jų grūdelio augimą stabdantis poveikis yra nepakankamas, todėl terminio poveikio zonoje išauga didelių matmenų grūdeliai.

Išmatuoti siūlės terminio poveikio zonos metalo stiprūmą ir tąsumą sunku, nes ši zona labai siaura. Šiame tarpsnyje yra daug skirtingų mikrostruktūros rūšių, turinčių skirtingas mechanines savybes. Dėl šios priežasties nepakankamas metalo stiprumas ir trapumas gali būti dar siauresnėje, mažiau kaip 1 mm, zonoje. Tolstant nuo siūlės termino ciklo poveikis mažėja, todėl mikrostruktūros ir savybių pokyčiai yra temperatūros ir nuotolio nuo išlydimo ribos funkcija. Pridėtinio ar elektrodinio metalo pasirinkimas dažnai yra labai platus, todėl būtina nepamiršti, kad metalo stipris priklauso ir nuo šių medžiagų rūšies ir mechaninių savybių.

Austenitiniame nerūdijančiame pliene 100 – 200 °C temperatūroje įsiterpimo kietieji tirpalai sąveikauja su deformacinių dislokacijų laukais, dėl to gali atsirasti deformacinio senėjimo sukeliamas trapumas. Šie struktūros pokyčiai vizualiai net ir labai padidinti yra nepastebimi, tačiau gali labai sumažinti metalo stiprumą ir tąsumą. Veikiant suvirinimo terminiam ciklui, susidaro deformacinės dislokacijos, kurių tankis gali būti labai didelis, todėl gali padidėti deformacinio senėjimo sukeliamas trapumas.

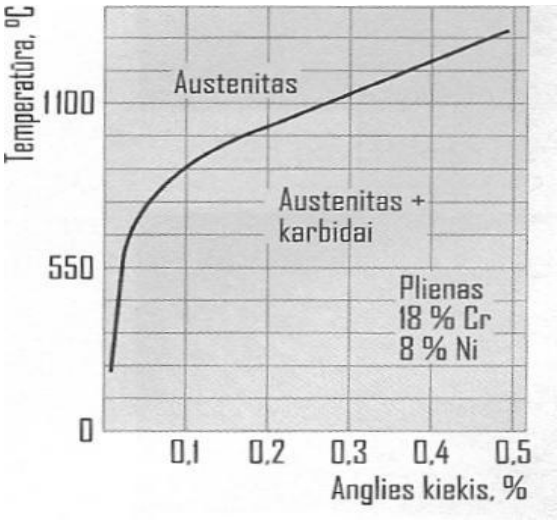
Didesnėje kaip 400 °C temperatūroje prasideda geležies karbidų sferoidizacija ir augimas. Šis procesas neturi pastebimo poveikio metalo stiprumui ir tąsumui, tačiau stambesni karbidai gali lemti sluoksninius įtrūkimus. Metalui įkaitus iki 600 °C, gali išsiskirti stabilūs dispersiniai legiravimo elementų ar kompleksiniai geležies ir legiravimo elementų karbidai. Ši terminio poveikio priesiūlės zona, kurioje didžiausia temperatūra yra žemesnė už $\alpha \rightarrow \gamma$ fazių virsmų temperatūrą, yra vadinama subkritine terminio poveikio zona. Metalo trapumas šioje zonoje gali būti nes esminis. Daugiau kaip 700 °C temperatūroje feritas pradeda transformuotis į austenitą. Temparatūros tarpsnis 700 – 850 °C yra vadinamas tarpkritine termino poveikio zona. Plienui atvėsus austenito grūdeliai virsta dispersiniu perlitu. Stebint per optinį mikroskopą sunku išskirti ribą, skiriančią sferoidizuotų karbidų sritį nuo tarpkritinės terminio poveikio zonos. Temparatūrų sritis virš 850 °C (A_{c3}), vadinama superkritine terminio poveikio zonos sritimi. Ši sritis dalijama į dvi dalis. Srities dalyje, esančioje 850 – 1 100 °C, vyrauja smulkūs grūdeliai. Artėjant prie siūlės 1 100 – 1 500 °C austenito grūdelis, ilgesnį laiką veikiamas aukštos temperatūros, suspėja išaugti. Metalui atvėsus šioje zonoje susidaro struktūrą sudaro perlitinė, feritinė-perlitinė (beinitinė) struktūra. Šios zonos metalo stiprumas ir tąsumas dažnai yra geresnis negu pagrindinio metalo. Termino mpoveikio zonos srityje, kurioje labai išauga austenito grūdelis, aušinimo metu vėliau gali susidaryti martensitinė struktūra. Blogiausias terminio poveikio zonos metalo stiprmuas ir tąsumas būna stambių grūdelių zonoje. Šis aprašytas terminio poveikio zonos sričių nuoseklumas sutrinka

virinant daugiasluoksnes siūles, nes vėlesnio ėjimo siūlės šiluma termiškai paveikia prieš tai susidariusias struktūras ir jas pakeičia. [10]

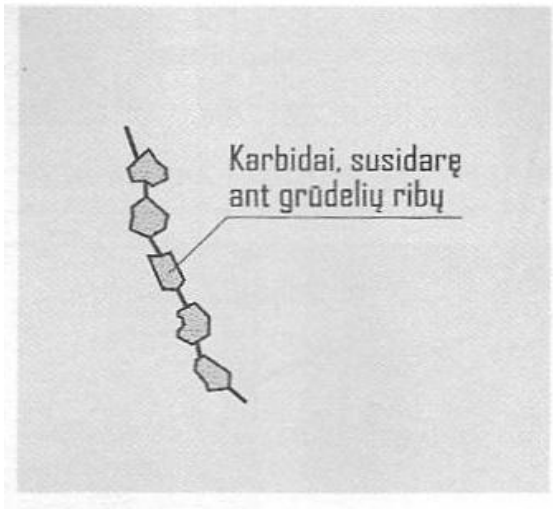
Didelis termino poveikio zonos ar siūlės metalo kietumas yra pavojingas, nes eksploatacijos metu dėl metalo korozijos arba vandenilio difuzijos į plieną gali atsirasti korozinių įtempių įtrūkių. Suvirintose siūlėse, nevisiško sulydymo zonose, dažnai būna oksidų ir kitų nemetalinių intarpų. Jie labai mažina šios zonos mechanines savybes ir metalo kokybę. [1; 2]

2.7 Austenitinio nerūdijančio plieno korozinis atsparumas ir jo gerinimo būdai

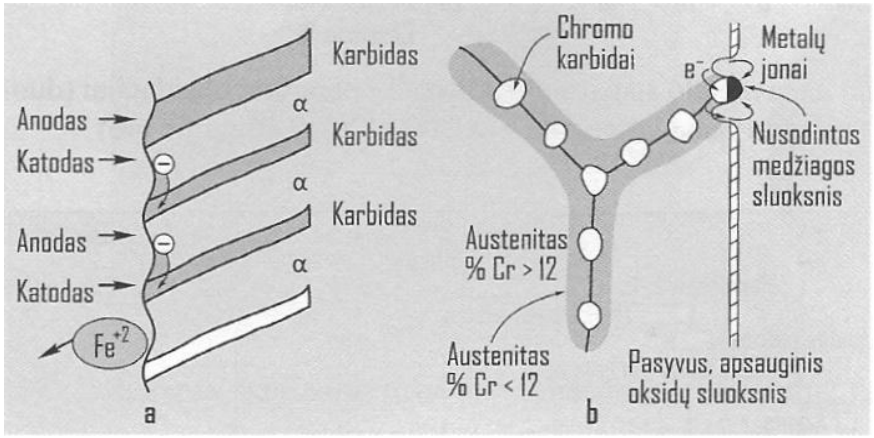
Atsparūs korozijai yra chromo-nikelio austenitiniai, >13 % chromo turintys plienai. Korozinis plieno atsparumas priklauso nuo struktūros fazinio, struktūrinio ir cheminio vienodumo, nes visi šie veiksniai lemia metalo paviršiaus elektrocheminio potencialo tolygumą. Dėl visa tai chromo karbidų ar kitokių junginių susidarymas blogina korozinį plieno atsparumą. Ilgą laiką eksplotuojamame aukštoje temperatūroje pliene iš kietojo tirpalo ant grūdelių ribų išsiskiria chromo karbidai, nes aukštoje temperatūroje vyksta atomų difuzija, be to, anglies tirpumas austenite mažėjant temperatūrai mažėja (13 – 16 pav.)



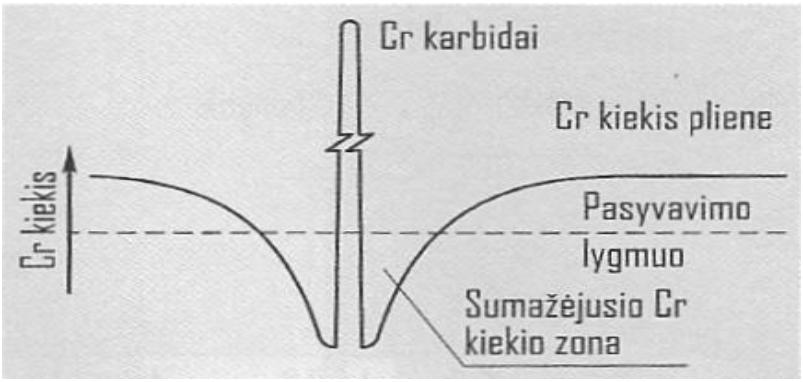
13 pav. Anglies tirpumo piklausomybė nuo temperatūros austenitiniame pliene



14 pav. Karbidai, susidarę ant grūdelių ribų



15 pav. Mikrogalvaninių elementų susidarymas dvifazinėje plieno struktūroje: a – angliniame pliene feritas cementito (karbido) atžvilgiu yra anodas; b – austenitiniame nerūdijančiame pliene susidariusius chromo karbidus supantis austenitas jų atžvilgiu yra anodas



16 pav. Chromo pasiskirstymo, neatsparaus tarpkristalinei korozijai chromnikelinio plieno grūdelyje schema

Grūdelių sandaroje susidarius karbidinei fazei, atsiranda zonos, turinčios skirtingą elektrocheminį potencialą. Esant elektrolitinei terpei, tarp skirtingo elektrinio potencialo fazių prasideda elektrocheminė korozija. Kita vertus, susidarant chromo karbidams, chromas iš paviršinių grūdelio zonų pereina į karbidus. Kietajame tirpale sumažėjus chromo kiekiui iki 10 – 12 %, šis tirpalas netenka korozinio atsparumo. Išsiskyrę grūdelių paviršiuje chromo karbidai sukelia lokaliuosius įtempius, taip pat mažinančius korozinį kietojo tirpalo atsparumą. Chromo karbidai išsiskiria tik pliene, ilgą laiką veikiamame aukštos 500 – 700 °C temperatūros. Dėl susidariusių karbidų taip pat sumažėja plieno plastiškumas ir smūginis tąsumas. [1]

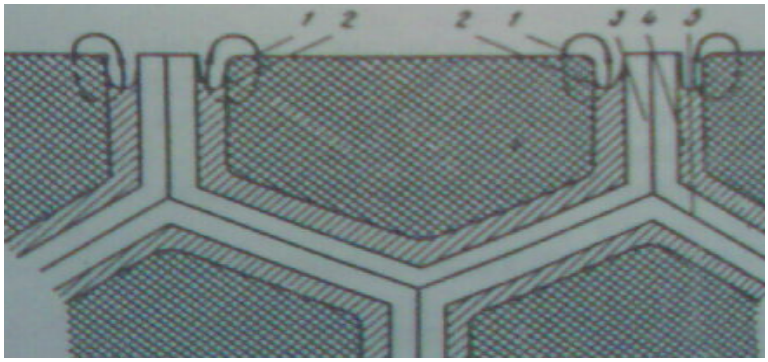
Agresyvioje aplinkoje prasideda tarpkristalinis korozinis irimas – tarpkristalinė korozija (17 pav).



17 pav. Tarpkristalinė korozija austenitiniame pliene [10]

Suvirinimo metu kai kuriose terminio poveikio zonos vietose metalas įkaista iki temperatūros, kurioje iš kietojo tirpalo taip pat gali išsiskirti karbidai. Naudojant suvirintą gaminį, tokiose vietose plinta tarpkristalinė korozija. Ji vyksta ir tose gaminio ar siūlės vietose, kurios suvirinimo metu pakartotinai įkaitinamos. Pakartotinai metalas įkaitinamas, kai suvirinamos susikertančios siūlės, taip pat tose vietose, kuriose, pakeitus elektrodą, tesiamas suvirinimas ir pan. Korozija, kuri apima tik labai siaurą, kelių grūdelių zoną, vadinama lokalioji tarpgrūdelinė korozija.

Tarpkristalinė korozija susijusi su netoli grūdelių sienelių chromo koncentracijos austenite sumažėjimu bei su chromo karbido ($Cr_{23}C_6$) susidarymu. Tokio karbido sudėtyje chromo yra 94 %, tuo tarpu chromo koncentracija austenite tik 20 %. Kadangi chromas sudaro karbidą, todėl chromo koncentracija austenite sumažėja iki 8 – 10 %. Tarpkristalinės korozijos procese išskiriamos kelios stadijos. Pirmoje stadijoje ištisinės ir tarpkristalinės korozijos procesų greičiai vienodi, todėl pagal išorinius požymius šias korozijos rūšis atskirti neįmanoma. Antroje stadijoje tarpkristalinės korozijos greitis yra didesnis už ištisinės korozijos greitį, bet korozija vyksta be matomo metalo irimo. Trečiąjai stadijai būdingas vienetinių grūdelių iškritimas. Ketvirtoje stadijoje grūdeliai iškrenta grupėmis ir metalas netenka mechaninio tvirtumo. Tarpkristalinę koroziją atvaizduoja sekantis paveikslas.



18 pav. Nerūdijančio plieno tarpkristalinė korozija: 1 – katoda; 2 – anodas; 3 – karbidas $Cr_{23}C_6$; 4 – zona kur yra Cr trūkumas; 5 – grūdelių riba

Chromo karbido iškritimas austenitiniame pliene vyksta 500 – 700 °C temperatūroje. Tuomet sakoma, kad plienas sensibilizuotas. Sensibilizacijos procesas vyksta terminio apdorojimo, suvirinimo metu, plieną ilgai eksploatuojant aukštoje temperatūroje. Veikiant korozinei terpei, mažesnę Cr koncentraciją turinčios zonos su likusia grūdelio dalimi sudaro korozinius galvaninius elementus. Tuomet mažesnę Cr koncentraciją turinčios zonos bus anodais. Išsiskyręs karbidas ne tik sukelia koroziją, bet ir žymiai sumažina medžiagos tvirtumo charakteristikas. Gerokai pablogėjus mechaninėms gaminio savybėms – jis gali suirti.

Gausiai legiruoto plieno ir suvirintųjų jungčių tarpkristalinės korozijos galima išvengti keliais būdais:

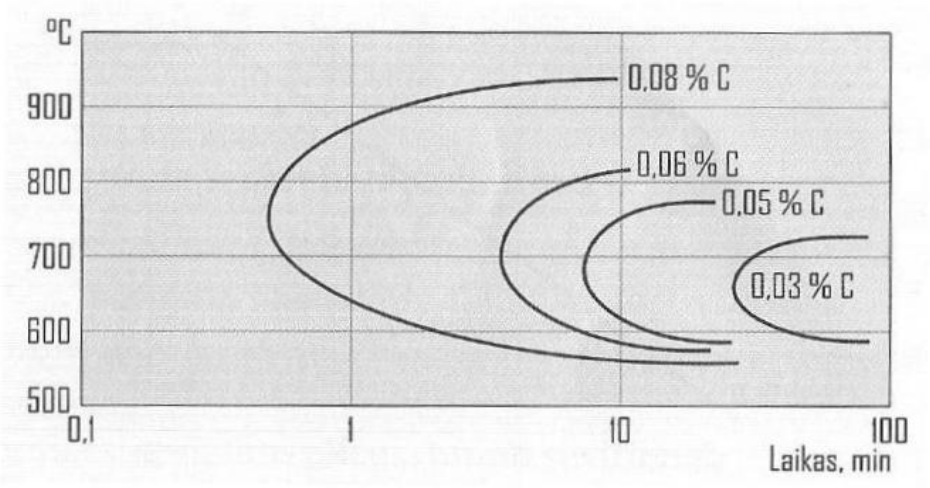
1) Sumažinti anglies kiekį pliene (pasirenkant plieno markę) ir suvirintoje jungtyje iki 0,02 – 0,03 %, tai yra iki ribinio anglies tirpumo austenite. Toks mažas anglies kiekis išlieka kietajame tirpale bet kokioje temperatūroje, todėl chromo karbidų susidaryti negali. Didžiausias leidžiamas anglies kiekis pliene priklauso nuo chromo kiekio. Jeigu kritinė temperatūra veikia metalą trumpą laiką, tai tarpkristalinės korozijos suvirintojo sujungimo vietoje nebūna net esant 0,07 – 0,08 % C.
2) Legiruoti plieną ir siūlės metalą stabilizuojančiais elementais, turinčiais didesnį giminingumą angliai negu chromas. Šie elementai (vanadis, titanas, niobis, tantalas) su anglimi sudaro patvarius karbidus, išsiskiriančius iš kietojo tirpalo aukštoje temperatūroje. Taip yra surišama anglis į šių metalų karbidus ir išvengiama chromo karbido iškritimo. Titano, niobio ir kiti karbidai susidaro ne pagal grūdelių ribas kaip chromo karbidai, o pačiuose grūdeliuose. Grūdelių paviršiuje išlieka vienfazis, turintis pakankamai chromo ir todėl atsparus koroziniam aplinkos poveikiui, kietasis tirpalas. Trumpalaikio suvirinimo terminio ciklo metu elementų difuzijos laipsnis labiausiai priklauso nuo elemento koncentracijos ir temperatūros, todėl reikia žinoti anglies ir stabilizuojančiojo elemento santykį. Pavyzdžiui reikalingas stabilizavimui titano kiekis turi būti penkis kartus didesnis už anglies kiekį pliene.
3) Maksimaliai sumažinamas metalo buvimas 500 – 700 °C temperatūroje.
4) Grūdinti plieną po suvirinimo. Pakaitinus plieną iki 1050 – 1100 °C (tokioje temperatūroje iškritęs chromo karbidas ištirpsta), anksčiau iš kietojo tirpalo išsiskyrę chromo karbidai vėl ištirpsta austenite, o greitai aušinant jie neišsiskirs į atskirą fazę.
5) Atlikti stabilizavimo atkaitinimą. Suvirintoji jungtis 2 – 3 valandas laikoma 850 – 900 °C temperatūroje ir aušinama ore. Chrominio plieno tokio atkaitinimo

temperatūra yra 760 – 780 °C. Atkaitinant vienu metu vyksta du procesai: visiškas chromo karbidų išsiskyrimas grūdelių paviršiuje ir chromo atomų difuzija iš grūdelio vidaus į paviršių. Chromo atomų difuzija išlygina chromo kiekį visame grūdelio tūryje, todėl ir paviršiniame grūdelio sluoksnyje vėl nusistovi korozijai atspari kietojo tirpalo cheminė sudėtis (> 12 % Cr). Stabilizacija, didindama metalo korozinį atsparumą, šiek tiek sumažina smūginį plieno tąsumą.

6) Padidinti siūlės metale ferito kiekį iki 20 – 25 %. Ferito kiekis padidėja legiruojant vonelės metalą chromu, siliciu, aliuminiu, vanadžiu, molibdenu ir volframu. Taip padidinamas tik siūlės metalo korozinis atsparumas. Ferite gali ištirpti daugiau chromo negu austenite. Dėl to, susidarant chromo karbidams, chromo kiekis grūdelių paviršiuje nesumažėja žemiau kritinės ribos (mažiau 12 %) ir siūlės metalas išlieka atsparus korozijai. [9]

2.8 Tarpgrūdelinė korozija

Ši korozija atmaina yra ypatinga tuo, kad atsiranda siauroje zonoje, dažniausiai siūlės terminio poveikio zonoje ir plinta grūdelių ribomis į medžiagos gilumą. Toks korozijos pobūdis susijęs su chromo karbidų susidarymu struktūroje ir ypač grūdelių sandūroje. Ši korozija dažniausiai pažeidžia austenitinio nerūdijančio plieno suvirintų jungčių zonas, kurios suvirinimo proceso metu metu buvo įkaitusios iki 500 – 800 °C. Įkaitusio plieno grūdelių ribų sandūrose išsiskiria dispersiniai chromo, geležies ir anglies cheminiai junginiai – kompleksiniai karbidai ($Cr_{23}C_6$). Chromo kiekis karbiduose būna iki 70 %, o pliene vidutiniškai – tik apie 18 %. Chromo atomai yra dideli, jų difuzijos greitis mažas, todėl, susidarius karbidams, supanti karbidą tam tikro pločio austenito zona turi chromo daug mažiau, negu vidutiniškai jo yra pliene. Mažai chromo turintis austenitas (< 12 % Cr) jau nebeatsparus agresyvios aplinkos poveikiui ir šiose vietose atsiranda korozijos židinių. Šis reiškinys vadinamas plieno jautrio didėjimu arba „plieno sensabiliškumu“. Korozijos produktai, plintantys grūdelio ribomis, net visiškai gali jį apsupti ir suardyti jo ryšį su kitais grūdeliais. Suirus tarpgrūdeliniam ryšiui, veikiantys įtempiai lengviau deformuoja medžiagą ir joje atsiranda įtrūkių. Neatsparaus tarpgrūdelinei korozijai metalo zona yra 3 – 5 mm nuo sulydymo zonos. Atsparumas tarpgrūdelinei korozijai padidėja, jeigu pliene mažėja laisvosios anglies kiekis. Iš diagramos laikas-temperatūra-sensabiliškumas (19 pav.) matyti, kad mažėjant anglies kiekiui pliene laikas, reikalingas karbidams susidaryti, labai pailgėja, todėl korozijos pavojus sumažėja. [1]



19 pav. X8CrNiTi18-10 plieno, turinčio skirtingą anglies kiekį, karbidinės fazės susidarymo pradžios priklausomybė [1]

Dėl suvirinimo šiluminio ciklo veikimo ne visas terminio poveikio zonos metalas yra sensabilizuojamas. Šalia sulydymo ribos esantis metalas yra atsparesnis sensibilizavimui, nes metalui greitai auštant iš austenitinės būsenos nespėja susidaryti $\sigma-$ fazė. Terminio poveikio zonos dalis, kurioje temperatūra pakyla ne daugiau kaip 650 °C, taip pat yra atspari tarpkristalinei korozijai, nes dėl lėtos elementų difuzijos nepakanka laiko šiai fazei susidaryti. Plienai, stabilizuoti titanu ir niobiu, yra atsparesni tarpkristalinei korozijai, tačiau tose zonose, kuriose temperatūra pakyla daugiau nei 1300 °C, šių elementų karbidai ištirpsta austenite. Auštant jau išsiskiria $Cr_{23}C_6$ tipo karbidai ir terminio poveikio zonos metale atsiranda siaura zona, kurioje gali plisti tarpkristalinė korozija. Atsparumą tarpgrūdelinei korozijai galima padidinti šiais metodais:

- pasirinkti plieną, turintį ne daugiau kaip 0,3 % C;
- pasirinkti plieną, stabilizuotą titanu ir niobiu;
- prieš suvirinimą plieną atkaitinti, siekiant pašalinti plieno šaltojo deformavimo padarinius struktūrai (šaltai deformuotame metale karbidai išsiskiria sparčiau);
- taikyti mažos tiesinės energijos suvirinimo režimus, taip trumpinant laiką, per kurį vyksta sensibilizacija;
- suvirinant vamzdžius, užvirinus siūlės šaknį siūlės zoną aušinti vandeniu, taip sumažinant sensibilizacijos pavojų, sukeliamą tolesnių klojamų siūlės sluoksnių terminio ciklo; [2]

3. BANDYMŲ METODIKA

Eksploatuojant vamzdynus ilgą laiką, vyksta nežymūs pakitimai vamzdyne: mažėja vamzdyno sienelių storis, vyksta plieno struktūriniai pakitimai, virsmai, kurie priveda prie mechaninių savybių pablogėjimo, medžiagos degradacijos ir panašiai. Austenitiniai plienai yra gausiai legiruoti chromu, nikeliu ir kitais elementais. Ilgą laiką eksplotuotame aukštoje temperatūroje tokiame pliene ant grūdelių ribų, o ypač jų sandūroje, išsiskiria chromo karbidai ar kitokie junginiai. Tai sukelia tarpkristalinę koroziją, kuri plinta grūdelių ribomis į medžiagos gilumą. Šie korozijos produktai silpnina arba visai suardo tarpatominius ryšius tarp grūdų. Suirus tarpgrūdeliniam ryšiui susidaro papildomi įtempiai, kurie lengviau deformuoja medžiagą ir taip susidaro įtrūkiai. Titanu stabilizuoti plienai yra jautresni įtrūkių susidarymui, ypač terminio poveikio zonose. Į visa tai bus atkreipiamas didžiausias dėmesys tiriant įtrūkių susidarymo priežastis vamzdyje.

Tyrime pateikiamas vamzdyje, pagamintame iš chromnikelinio austenitinės klasės, stabilizuoto titanu X8CrNiTi18-10 plieno, atsiradusių įtrūkių tyrimas. Tiriamasis objektas sudarytas iš dviejų tarpusavyje suvirintų austenitinės klasės vamzdžių. Prie senojo vamzdžio Ų219x8 mm, kuris buvo eksploatuotas 90 000 valandų, privirintas naujas vamzdis Ų219x10 mm. Vamzdyno metalą eksploatavimo metu veikia termomechaninės apkrovos bei koroduojanti agresyvi aplinka. Termines apkrovas sukelia nuolat veikianti aukšta t=440 °C temperatūra. Mechanines apkrovas sukelia darbinės terpės slėgis sistemos viduje, kuris yra lygus p=6-7 MPa. Esant tokioms eksploatacinėms sąlygoms dažnai susiduriama su labai aktualia problema, - įtrūkimų susidarymu. Šis tyrimas padės tiksliau prognozuoti ir įvertinti vamzdžių, pagamintų iš šios klasės plieno, eksploatacinį patikimumą - ilgaamžiškumą ateityje. Tam, kad įvertinti įtrūkimų atsiradimo priežastis, buvo atlikti cheminės sudėties, mechaninių savybių, kietumo bandymai, bei metalografiniai struktūrų tyrimai.

3.1 Bandymas skvarbiaisiais dažalais

Bandymo skvarbiaisiais dažalais tikslas nustatyti tikslią įtrūkių formą ir vietą. Suvirintųjų vamzdžių bandymas skvarbiaisiais dažalais, paviršiaus defektams išaiškinti, pagal LST EN 10246-11:2001 „Neardomasis plieninių vamzdžių bandymas. 11-oji dalis. Besiūlių ir suvirintų plieninių vamzdžių bandymas skvarbiaisiais skysčiais paviršiaus defektams išaiškinti“, LST EN 571-1:1998 „Neardomasis bandymas. Bandymas skvarbiaisiais dažalais.1-oji dalis. Bendrieji principai“.

3.2 Cheminės sudėties tyrimas

Ilgą laiką aukštoje temperatūroje ir agresyvioje terpėje eksploatuojant austenitinius plienus pastebima mechaninių savybių degradacija, bet dažniausiai atliekant mechaninius bandymus tai nėra pastebima todėl, kad degradacijos procesas nėra labai pažengęs ir plienas tenkina minimalius norminių dokumentų reikalavimus mechaninėms savybėms. Todėl, norint nustatyti įtrūkių priežastis, turi būti skiriamas didelis dėmesys cheminės sudėties tyrimui. Sumažintas legiravimo elementų ar padidintas kenksmingų priemaišų kiekis (vamzdžių gamybos metu) metale gali iššaukti įtrūkių susidarymą ir konstrukcijos katastrofinį irimą. Cheminės sudėties tyrimas ir atitikimo įvertinimas atliktas pagal standartus: GOST 5632-61, LST EN 10297-2:2005. Cheminės sudėties tyrimui naudojamas „ArcMet Spark“ spektrometras.

3.3 Tempimo bandymas

Tempimo bandymas buvo atliktas prie skirtingų temperatūrų ir nustatyta: takumo riba ($Rp_{0,2}$), stiprumo riba (R_m) ir santykinis pailgėjimas (A_5). Bandymas atliktas naudojant „Instron 1115” statinio bandymo mašiną. Bandymui buvo paruošti Ų4 mm diametro, po du kiekvienai temperatūrai, bandiniai. Pradinis deformavimosi greitis bandymo metu $4x10^{-4}$ s^{-1} visiems bandiniams. Gauti tyrimo rezultatai lyginami su standarte GOST 5632-61 ir EN 10297-2:2005 pateiktomis mechaninių savybių vertėmis.

Tempimo bandymas pagal LST EN 10002-1:2003 „Metalai. Tempimo bandymas. 1-oji dalis. Bandymo metodas aplinkos temperatūroje“, LST EN 10002-5:2000 „Tempimo bandymas. 5-oji dalis. Aukštatemperatūrinio bandymo metodas“.

3.4 Smūginio tąsumo bandymas

Smūginis tąsumas – tai medžiagos, veikiamos smūginės apkrovos, geba priešintis suardymui. Suirimas yra galutinis medžiagos deformavimosi etapas, kai ji suskyla į makroskopines dalis. Yra du pagrindiniai suirimo tipai: tąsusis ir trapusis. Tąsiajam suirimui būdingos plastinės deformacijos. Trapusis suirimas įvyksta staiga, be plastinų deformacijų, dažnai kai įtempimai esti mažesni už medžiagos takumo ribą. Trapųjų suirimą dažnai skatina struktūriniai veiksniai: struktūros stambiagrūdiškumas, užterštumas nemetaliniais intarpais, įvairaus dispersiškumo fazių išsiskyrimas senėjant. Skaitinės smūginio tąsumo reikšmės nustatomos smūginio lenkimo bandymais. Tam paruošiami stačiakampiai 10x10x55 mm dydžio su Šarpio „V“ formos (45°

kampas, kurio viršūnė užapvalinta 0,25 mm spinduliu) 2 mm gylio įpjova bandiniai. Smūginio tąsumo bandymas buvo atliktas taikant Šarpio "V" formos įpjovą. Bandymas atliktas naudojant 300 J smūgio energiją, esant 0 ir 20 °C temperatūrai. Gauti tyrimo rezultatai lyginami su standarte GOST 5632-61 nurodytomis vertėmis.

Smūginio tąsumo bandymas atliktas pagal LST EN 10045-1:1998 „Metalinės medžiagos. Šarpio smūginio tąsumo bandymas. 1-oji dalis. Bandymo metodas", LST EN 875:1998 „Metalinės medžiagos. Ardomieji siūlių bandymai. Smūginio tąsumo bandymai. Bandinių vieta, įpjovos orientacija ir tyrimas".

3.5 Kietumo bandymas

Kietumas tai medžiagos geba priešinti, kad į ją neįsiskverbtų kitas, kietesnis kūnas. Kietumas susijęs su medžiagos stiprumu bei plastiškumu, tačiau geriausiai apibūdina jos pasipriešinimą vietinei deformacijai. Dažniausiai yra taikomi Brinelio ir Vikerso kietumo nustatymo būdai. Brinelio – įspaudžiant grūdinto plieno rutuliuką, Vikerso – įspaudžiant deimanto piramidę. Kietumo nustatymo būdas, antgalio forma, įspaudimui taikomos apkrovos dydis, parenkami atsižvelgiant į tiriamojo objekto sandarą ir kokių savybių yra tikimasi.

Kietumo bandymai atlikti naudojantis Brinelio ir Vikerso metodais pagal LST EN 1043-1:1998 „Metalinės medžiagos. Virintinių siūlių ardomieji bandymai. Kietumo bandymas. 1-oji dalis. Lankinio suvirinimo sujungimų kietumo bandymas", LST EN ISO 6506-1:2006 „Metalai. Brinelio kiečio nustatymas. Bandymo metodas", LST EN ISO 6507-1:2006 „Metalai. Vikerso kiečio nustatymas. Bandymo metodas". Kietumo bandymai atlikti naudojant „Krautkramer TIV" kietumo matavimo testerį. Gauti tyrimo rezultatai lyginami su standarte GOST 5632-61 nurodytomis vertėmis.

3.6 Mikrokietumo bandymas

Mikrokietumui nustatyti yra taikomas Vikerso metodas. Šiuo būdu nustatoma atskirų struktūrinių dalių kietumas. Šiuo atveju specialiu prietaisu keturšonė piramidė įspaudžiama labai maža 200 g jėga. Mikrokietumo bandymas atliktas naudojant „ZHV 10" testerį. Matavimai atlikti išilgai vamzdžio ašies ir išilgai sienelės storio.

Mikrokietumo bandymai atlikti pagal LST EN 1043-2:1998 „Metalinės medžiagos. Virintinių siūlių ardomieji bandymai. Kietumo bandymas. 2-oji dalis. Suvirintų sujungimų mikrokietumo bandymas", LST EN ISO 6507-1:2006 „Metalai. Vikerso kiečio nustatymas. Bandymo metodas".

3.7 Mikroskopinis tyrimas

Makroskopinis ir mikroskopinis medžiagos tyrimas atliktas pagal LST EN 1321:1998 „Metalinės medžiagos. Ardomieji sūlių bandymai. Siūlių makroskopinis ir mikroskopinis tyrimas“. Mokrostruktūrų tyrimui buvo atlikti taikant optinę, elektroninę mikroskopiją ir rentgenostruktūrinę analizę.

Optinė mikroskopija. Optiniu mikroskopu tiriama medžiagos mikrostruktūra, kristalų formos, dydžiai, ir jų defektai. Tyrimui bandiniai specialiai paruošiami. Daromi mikrošlifai – tiriamos medžiagos gabalėlis perpjaunamas norima kryptimi, pjūvio plokštuma šlifuojama, ir poliruojama. Metalų mikrošlifai nupoliaravus dar ryškinami, dažniausiai išėsdinant poliruotą paviršių rūgštimi. Kartais tiriami bandiniai merkiami į didesnio optinio tankio medžiagų tirpalą, kad padidinti tiriamos medžiagos kontrastiškumą. [4]

Mikrostruktūrų tyrimas atliktas naudojant „Nikon“ optinį mikroskopą, didinantis nuo 50 iki 200 kartų. Tyrimui bandinių paviršiai šlifuojami abrazyviniu popieriumi, poliruojami ir ėsdinami su Mi16Fe reagentu, kad išryškėtų medžiagos mikrostruktūra. Šiuo tyrimu buvo atliktas kokybinis medžiagos mikrostruktūros įvertinimas: medžiagos sandara, grūdelių forma, dydis.

Elektroninė mikroskopija tiriant skanuojančiu elektroniniu mikroskopu. Šiuo būdu galima tirti: pavienių submikroskopinių kristalų dydį ir formą, kristalų augimo, deformacijos ir irimo procesus, grūdelių formą, cheminių elementų pasiskirstymą medžiagoje. [5]

Mikrostruktūrų tyrimai ir kokybinis įvertinimas buvo atlikti naudojant skanuojantį elektroninį „S-5500“ modelio „Hitachi“ mikroskopą. Įgretinančioji įtampa buvo 30 kV, ir didinimas naudojamas nuo 2 500 iki 100 000 kartų. Bandiniai buvo ploninami mechaniniais ir elektrocheminiais metodais, kol buvo pasiektas reikalingas plonumas, kad būtų peršviesti elektronų pluoštu.

Rentgeno struktūrinė analizė. Rentgenostruktūrinė analizė yra vienas iš moderniausių ir tobuliausių tyrimų metodų. Ją taikant galima atlikti sudėtingos struktūros medžiagų ir kokybinę, kiekybinę fazinę analizes. Rentgeno spinduliuotės panaudojimas kristalų analizei atlikti pagrįstas tuo, kad pagal rentgeno bangos ilgį kristalas yra trimatė difrakcinė gardelė. Rentgeno metodų esmė ir yra difrakcinių vaizdų, gautų atspindėjus nuo kristalų plokštumų, analizė. [5]

Struktūros tyrimai atlikti su „S-2600“ modelio „Hitachi“ skanuojančiu mikroskopu, kuriame įrengtas „Noran“ elektronų rentgeno analizatorius. Tyrimas atliktas naudojant antrinių elektronų kontrastą, didinant nuo 30 iki 10 000 kartų. Buvo naudojama 30 kV greitinančioji įtampa. Tyrimas apėmė poliruotus išilginius ir skersinius bandinių pjūvius, padarytus iš vamzdžių medžiagos ir įtrūkių vietų.

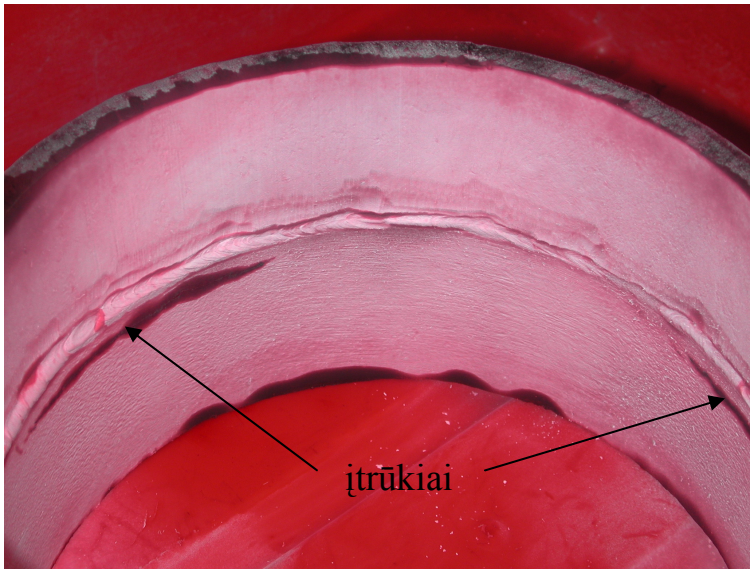
3.8 Skaičiavimai baigtinių elementų metodu

Tiriamasis objektas sudarytas iš dviejų tarpusavyje suvirintų su skirtingais sienelių storiais austenitinės klasės vamzdžių. Prie senojo vamzdžio Ų219x8 mm, kuris buvo eksploatuotas 90 000 valandų, privirintas naujas vamzdis Ų219x10 mm. Kadangi suvirinti vamzdžiai yra skirtingų sienelės storių, todėl įtrūkių atsiradimui galėjo turėti įtakos ir geometrnis vamzdžių nesutapimas (priklausyti nuo vamzdžio geometrijos). Kad patvirtinti arba paneigti šias prielaidas, atlikome skaičiavimus su „ANSYS“ programa, remiantis baigtinių elementų metodu. Padalinę suvirintą iš dviejų vamzdžių konstrukciją į baigtinius elementus, ir į skaičiavimus įtraukę darbinį vamzdžių slėgį p=6,4 MPa, gausime maksimalius veikiančius įtempius. Iš gautų rezultatų galėsime spręsti ar tai galėjo turėti kokį poveikį įtrūkių atsiradimui .

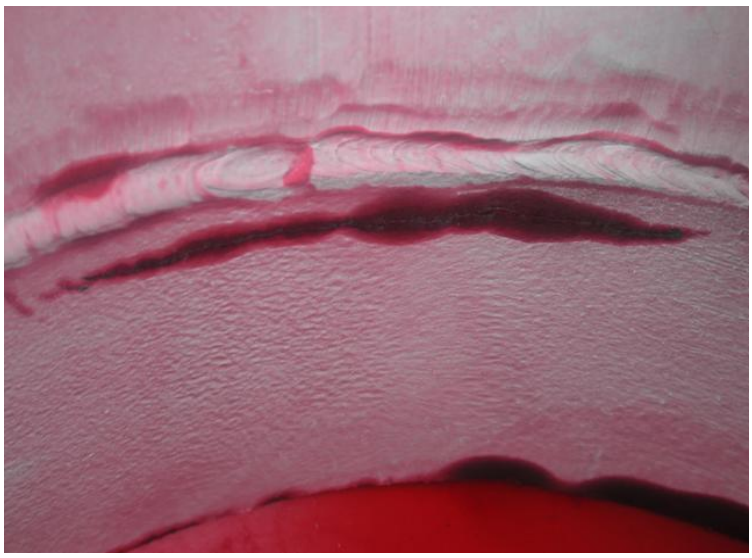
4. BANDYMŲ REZULTATAI

4.1 Tyrimas skvarbiaisiais dažalais

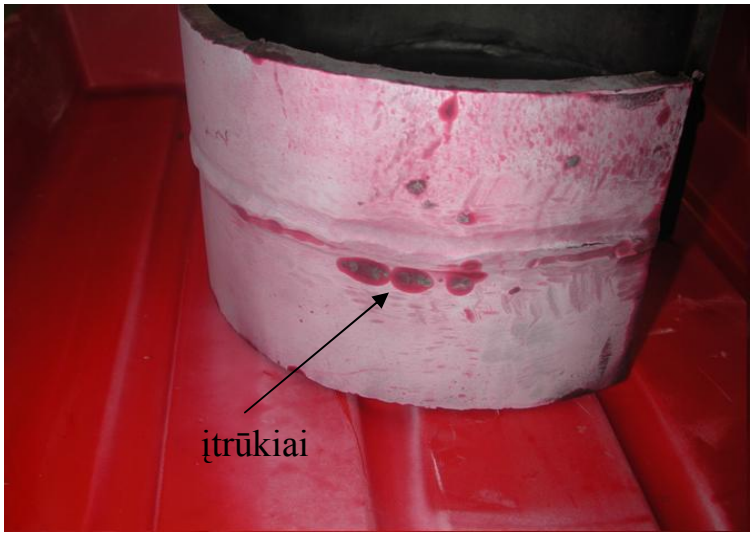
Bandymo skvarbiaisiais dažalais metu nustatyta tiksli įtrūkių forma ir vietos. Nustatyta atsiradimo vieta – senojo vamzdžio terminio poveikio zona ir forma – apskritiminiai įtrūkiai, statmeni vamzdžio ašiai. Iš viso buvo aptikti keturi įtrūkiai, kurių ilgis siekia nuo 3 iki 10 cm.



20 pav. Įtrūkių vietos ir formos nustatymas skvarbiaisiais dažalais senajame vamzdyje



21 pav. Įtrūkių vietos ir formos nustatymas skvarbiaisiais dažalais senajame vamzdyje



22 pav. Įtrūkių vietos ir formos nustatymas skvarbiaisiais dažalais senajame vamzdyje

4.2 Cheminės sudėties tyrimas

Ilgą laiką aukštoje temperatūroje ir agresyvioje terpėje eksploatuojant austenitinius plienus pastebima mechaninių savybių degradacija, bet dažniausiai atliekant mechaninius bandymus tai nėra pastebima todėl, kad degradacijos procesas nėra labai pažengęs ir plienas tenkina minimalius norminių dokumentų reikalavimus mechaninėms savybėms. Todėl, norint nustatyti įtrūkių priežastis, turi būti skiriamas didelis dėmesys mikrostruktūros ir cheminės sudėties tyrimui. Sumažintas legiravimo elementų ar padidintas kenksmingų priemaišų kiekis (vamzdžių gamybos metu) metale gali iššaukti įtrūkių susidarymą ir konstrukcijos katastrofinį irimą. Cheminės sudėties tyrimas atliktas naudojant „ArcMet Spark“ spektrometrą. Bandymo rezultatai pateikti 1 lentelėje:

1 lentelė. Cheminės sudėties tyrimo rezultatai

Elementas	Al	C	Cr	Cu	Mn	Mo	Nb	Ni	P	S	Si	Ti	V	Fe
Senas vamzdis	0,059	0,046	17,31	0,070	1,70	0,22	0,010	11,04	0,025	0,009	0,31	0,32	0,036	Likusi dalis
Naujas vamzdis	0,061	0,068	17,05	0,230	1,24	0,21	0,015	9,85	0,033	0,014	0,45	0,60	0,032	Likusi dalis
X8CrNiTi18-10 (GOST 5632-61)	-	<0,08	17,0÷ 19,0	-	1,0÷2,0	-	-	9,0÷ 11,0	<0,035	<0,020	<0,80	5x%C	-	-
LST EN 10297-2 X6CrNiTi18-10	-	<0,08	17÷ 19	-	<2,0	-	-	9,0÷ 11,0	<0,045	<0,03	0,8	5x%C C<0,7	-	-

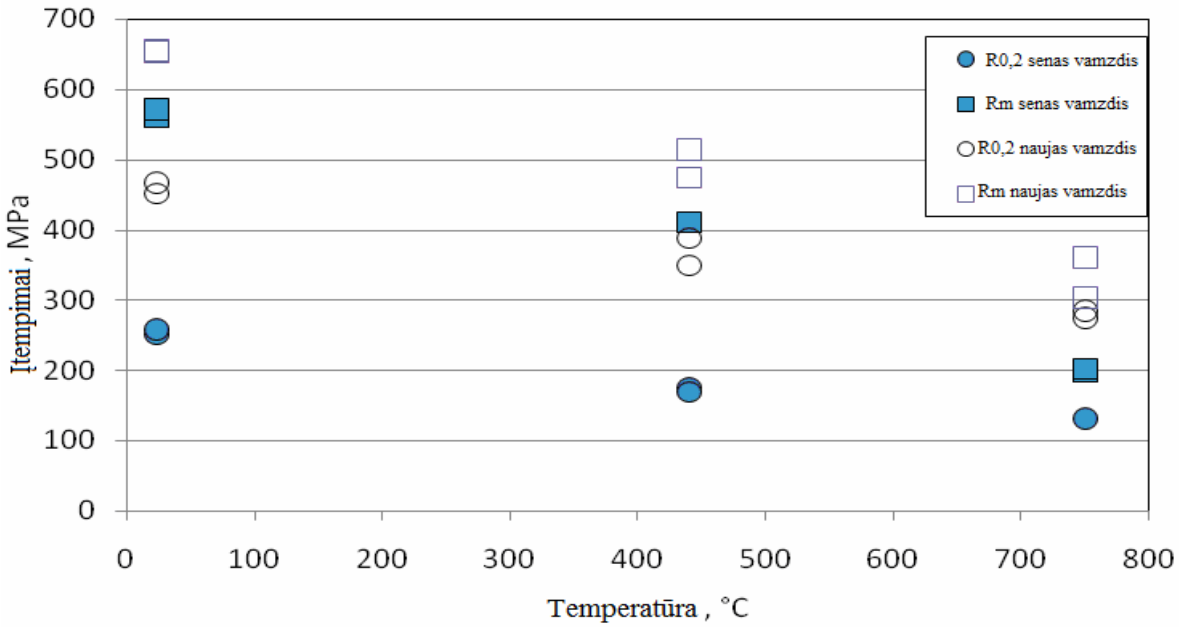
Atlikus cheminės sudėties tyrimus nustatyta, kad abiejų austenitinės klasės vamzdžių, pagamintų iš X8CrNiTi18-10 ir X6CrNiTi18-10 plieno, cheminė elementų sudėtis atitinka medžiagų standartus. Lyginant senojo ir naujojo vamzdžio cheminę sudėtį tarp legiruojančių elementų kiekio didelio skirtumo nėra, išskyrus vario (Cu % 0,230 ir 0,070) kiekį. Tačiau standarte jo kiekis nėra reglamentuojamas, todėl šis faktorius nėra esminis. Naujame vamzdyje nustatytas du kart didesnis titano kiekis. Titanas naudojamas kaip stabilizuojantis elementas. Austenitiniuose plienuose sudaro patvarius karbidus su anglimi ir titano nitridus. Kenksmingų priemaišų – sieros ir fosforo kiekiai neviršija leistinų. Šie elemntai pliene skatina šaltųjų, karštųjų ir kristalizacinių įtrūkių susidarymą. Šis bandymas paneigė įtarimus, kad įtrūkiai, ilgai eksploatuotame senajame vamzdyje, galėjo atsirasti dėl sumažėjusio legiruojančių elementų ar padidėjusio kenksmingų priemaišų (vamzdžių gamybos metu) kiekio.

4.3 Tempimo bandymas

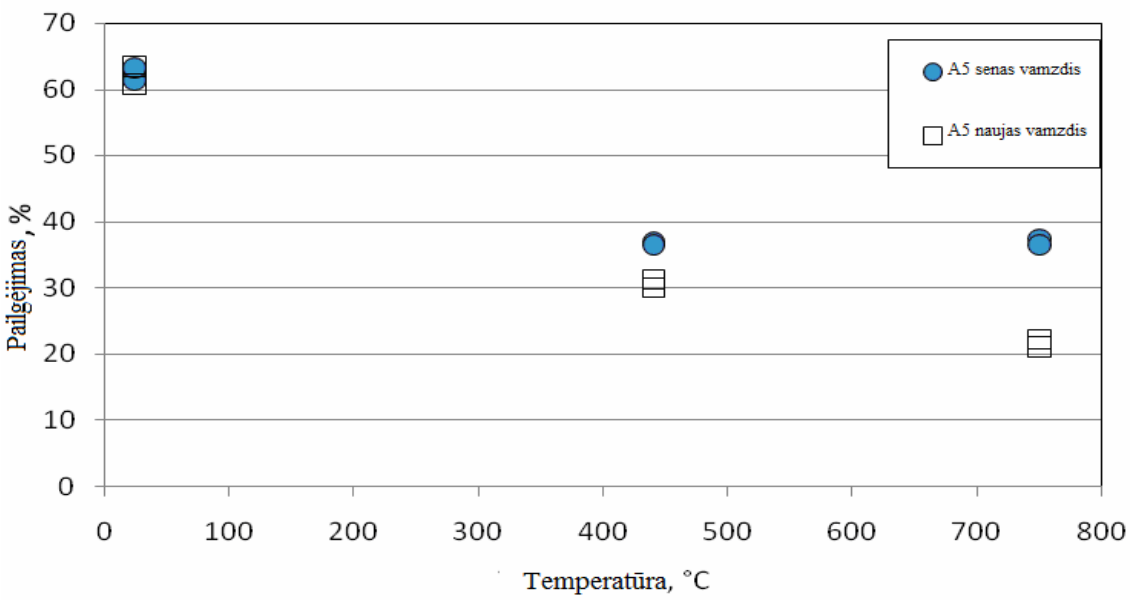
Tempimo bandymas buvo atliktas skirtingose temperatūrose ir nustatyta: takumo riba ($Rp_{0,2}$), stiprumo riba (R_m) ir santykinis pailgėjimas (A_5). Bandymas atliktas naudojant „Instron 1115” statinio bandymo mašiną. Bandymui buvo paruošti Ų4 mm diametro, po du prie kiekvienos temperatūros, bandiniai. Pradinis deformavimosi greitis bandymo metu $4x10^{-4}$ s^{-1} visiems bandiniams.

2 lentelė. Mechaninių savybių bandymo rezultatai

Elementas	Temp. °C	Bandi-nys	$R_{p0,2}$, MPa	R_m, MPa	A_5, %	$R_{0,2}$, MPa	R_m, MPa	A_5, %
Senas vamzdis	20	1	250	561	61.3	254	566	62,3
	20	2	258	571	63.2			
	440	1	175	410	36.8	172	410	36,7
	440	2	169	410	36.5			
	750	1	131	198	37.4	131	200	36,9
	750	2	131	202	36.4			
Naujas vamzdis	20	1	468	653	63.5	460	655	62,2
	20	2	452	656	60.8			
	440	1	388	514	30.0	369	494	30,6
	440	2	350	475	31.2			
	750	1	275	361	21.0	280	332	21,6
	750	2	286	303	22.2			
X8CrNiTi18-10 (GOST 5632-61)	20	-	>216	>490	40	>216	>490	40



23 pav. $R_{p0,2}$ ir R_m gautų bandymo reikšmių tarp seno ir naujo vamzdžių grafinis atvaizdavimas



24 pav. A_5 gautų bandymo reikšmių tarp seno ir naujo vamzdžių grafinis atvaizdavimas.

Tempimo bandymas parodė didelį mechaninių savybių skirtumą tarp senojo ir naujojo vamzdžių medžiagos. Takumo riba $R_{p0,2}$=254 MPa ir $R_{p0,2}$=460 MPa, stiprumo riba R_m=566 MPa ir R_m=655 MPa, atitinkamai tarp seno ir naujo vamzdžių medžiagos kambario temperatūroje. Stipruminių savybių sumažėjimas rodo ilgai eksploatuotos aukštoje temperatūroje medžiagos degradaciją, senėjimą ir nuovargį. Agresyvi aplinka ir aukšta temperatūra per ilgą laiką iššaukia struktūros pasikeitimus: auga grūdeliai, chromo karbidai difunduoja į grūdelių pakraščius, jungiasi į karbidų kolonijas. Susikaupę karbidai grūdelių sandūroje silpnina tarpatominius ryšius. Kuo pliene grūdeliai yra smulkesni, tuo didesnė tūrio dalis metale tenka grūdelių riboms, tuo didesnė metalo takumo riba, smūginis tąsumas ir atvirkščiai. Viso to pasekoje susilpnėja austenitinis plienas ir didėja pavojus įtrūkių susidarymui. Tačiau gauti rezultatai atitinka reglamentuojamas standarte minimalias vertes.

4.4 Smūginio tąsumo bandymas

Smūginio tąsumo bandymas buvo atliktas taikant Šarpio “V” formos įpjovą. Bandymas atliktas naudojant 300 J smūgio energiją, prie 0 ir 20°C temperatūros. Bandinių matmenys 10x10x55 mm su “V” formos 2 mm gylio įpjova. Ilgai eksplotuojant plieną aukštoje temperatūroje, sumažėja jo plastiškumas, smūginis tąsumas, ir padidėja kietumas, trapumas. Taip atsitinka austenitiniuose plienuose dėl karbidinių fazių susidarymo grūdelių ribose. Gauti rezultatai parodė, kad seno vamzdžio medžiagos smūginis tąsumas 175 J/m^2 ir naujo 145 J/m^2 atitinka minimalias vertės, reglamentuojamas standarte. Gauti rezultatai rodo, kad smūginio tąsumo sumažėjimas

negalėjo turėti įtakos įtrūkių atsiradimui. Tačiau atlikus smūginio tąsumo tyrimą su bandinukais, padarytais iš šalia lūžio vietos esančio metalo, buvo gauta KV=111 J/mm^2. Tai reikšmė kuri yra mažesnė negu reglamentuoja standartas. Besikaupiantys karbidai, nitridai ir kiti metališkieji junginiai, ilgai eksploatuotos medžiagos grūdelių ribose, silpnina tarpgrūdelinį ryšį, o tuo pačiu labai sumažėja smūginis tąsumas, stiprumo charakteristikos ir plastiškumas, padidėja kietumas ir plieno trapumas tose zonose. Padidėjusio kietumo metalo zonos ar tūriai kartais būna labai maži ir jų savybes išmatuoti galima tik atlikus mikrokietumo bandymą, matuojant su maža kietmačio apkrova.

3 lentelė. Smūginio tąsumo bandymo rezultatai

Elementas	Temperatūra, °C	Bandinys	Smūgio darbas KV, J	Suardymo energija KV, J	Smūginis tąsumas KV, J/m^2
Senas vamzdis	20	1	140	140	175
		2	139		
	0	1	60	61	76
		2	61		
Naujas vamzdis	20	1	115	116	145
		2	117		
	0	1	50	51	64
		2	51		
Bandinys, padarytas iš metalo šalia įtrūkio vietos	20	1	87	89	111
		2	90		
08X18H10T (GOST 5632-61)	20	---	---	---	>128

4.5 Kietumo bandymas

Kietumo bandymai atlikti naudojantis „Krautkramer TIV“ kietumo matavimo testeriu, remiantis Vikerso ir Brinelio metodais. Gauti senos medžiagos tyrimo rezultatai neviršija nei maksimalių nei minimalių kietumo reikšmių, kurias reglamentuoja GOST 5632-61. Per didelis kietumas ir sumažėjęs plastiškumas, ypač terminio poveikio zonoje, galėjo iššaukti įtrūkių atsiradimą austenitiniame pliene.

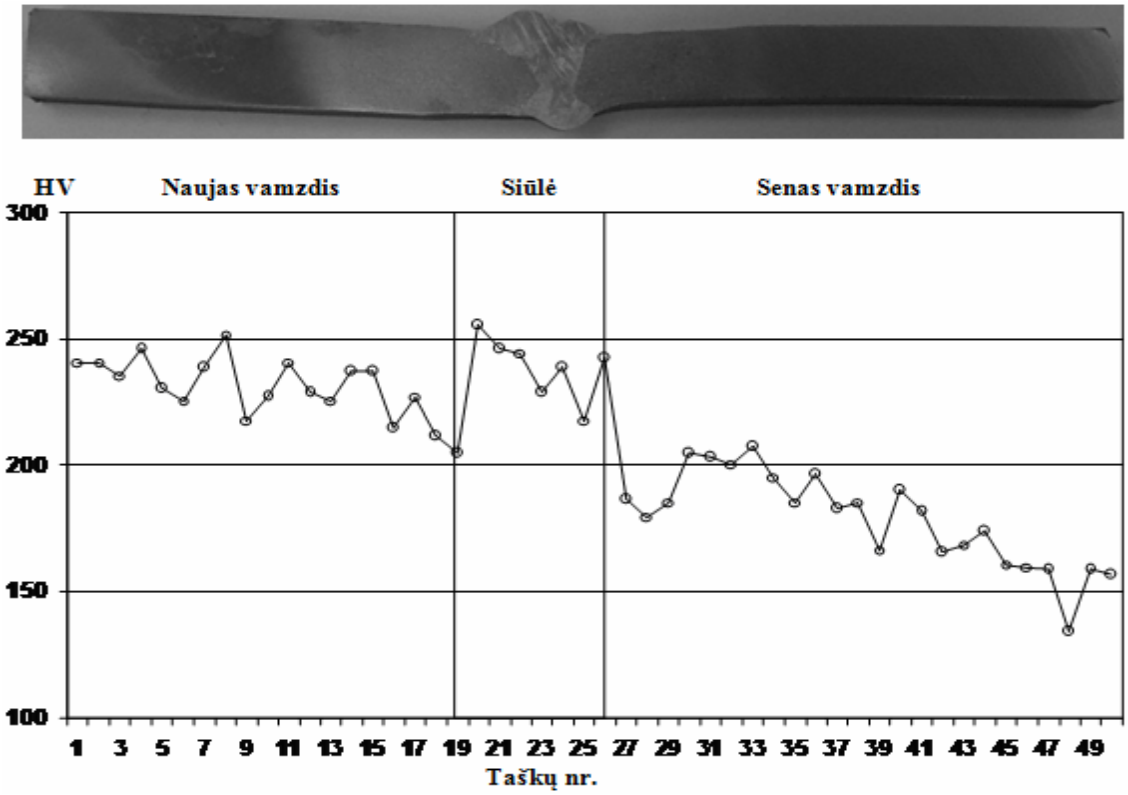
4 lentelė. Kietumo bandymo rezultatai

Elementas	Kietumas HV	Kietumas HB
Senas vamzdis	179	170
Seno vamzdžio terminio poveikio zona	174	167
Naujas vamzdis	272	258
Naujo vamzdžio terminio poveikio zona	255	247
08X18H10T (GOST 5632-61)	135÷218	128÷207

Labai yra svarbu, kad po suvirinimo nesumažėtų terminio poveikio zonos metalo stiprumas ir plastiškumas, lyginant su pagrindinio metalo savybėmis. Dėl padidėjusio kietumo TPZ metalas tampa trapus ir nebeatsparus įtrūkių atsiradimui. Legiruotuose mažaangliuose plienuose jau 100 – 200 °C temperatūroje įsiterpimo kietieji tirpalai sąveikauja su deformacinių dislokacijų laukais, dėl to gali atsirasti deformacinio senėjimo sukeliamas trapumas. Šie struktūros pokyčiai vizualiai net ir labai padidinti yra nepastebimi, tačiau gali labai sumažinti metalo stiprumą ir tąsumą. Veikiant suvirinimo terminiam ciklui, susidaro deformacinės dislokacijos, kurių tankis gali būti labai didelis. Taip terminio poveikio zonoje gali išaugti kietumas, tuo pačiu suaktyvėti deformacinio senėjimo sukeliamas trapumas, ir tolesnės eksploatacijos metu, veikiant vamzdyje vidiniam slėgiui, vystytis įtrūkiai.

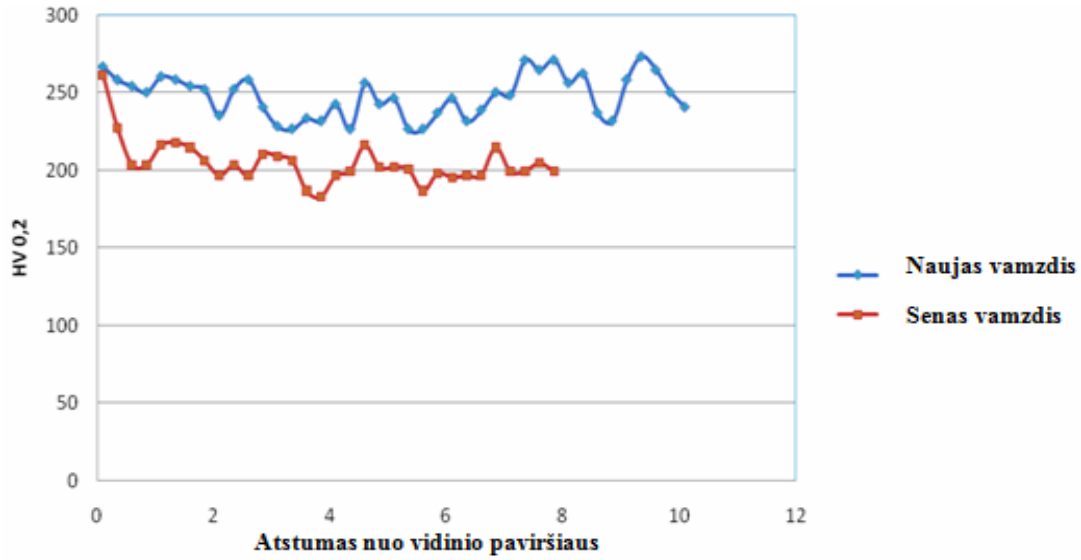
4.6 Mikrokietumo bandymas

Mikrokietumo bandymas atliktas remiantis Vikerso metodu esant 200 g apkrovai ($HV_{0,2}$), naudojant „ZHV 10” testerį. Matavimo atstumas tarp įspaudos centrų 0,2 mm. Sekančiai pateikti rezultatai matuojant išilgai vamzdžio ašies ir išilgai sienelės storio. Pastarasis matavimas atliktas matuojant nuo vidinio paviršiaus į išorinį. Legiruotieji plienai dažnai turi didesnį terminio poveikio zonos metalo grūdinamumą. Padidėjusio kietumo metalo zonos ar tūriai kartais būna labai maži ir jų savybes išmatuoti galima tik matuojant maža kietmačio apkrova.



25 pav. Mikrokietumas išilgai vamzdžio ašies

Iš gautų rezultatų matyti, kad dėl medžiagos degradacijos bei struktūrinių pakitimų, senojo vamzdžio mikrokietumas yra žymiai mažesnis negu naujojo. Analizuojant matavimus išilgai vamzdžio ašies pastebėtas didesnis siūlės mikrokietumas, ir mažesnis terminio poveikio zonoje, lyginant su pagrindine medžiaga. Terminio poveikio zonoje, dėl aukštos įkatimo temperatūros suvirinimo metu ir ilgesnio aušimo periodo spėja išaugti austenitis grūdas, kuris ir išaukia šios zonos plastiškumą sename vamzdyje. Šiek tiek tolėliau nuo TPZ įkaitinimas suvirinimo metu buvo mažesnis ir greitesnė kristalizacija neleido grūdams išaugti. Čia taip pat dėl pakartotino įkatimo suvirinant išsiskiria kietesnės fazės, kurios padidina mikrokietumą (30-40 taškai). Toliau plieno kietumo pikai išsilygina. Didelis terminio poveikio zonos ar siūlės metalo kietumas yra pavojingas, nes eksploatacijos metu dėl metalo korozijos chromnikeliniame pliene gali atsirasti korozinių įtempių, kurie sukelia įtrūkius. Didesnėje kaip 400 °C temperatūroje prasideda karbidų sferodizacija ir augimas. Metalui įkaitus iki 600 °C išsiskiria stabilūs dispersiniai legiravimo elementų karbidai, kurie kaupiasi grūdelių ribose į didesnes kolonijas. Šias zonas galima pavadinti subkritinėmis terminio poveikio zonomis, kuriose metalo trapumas gali būti esminė priežastis įtrūkių atsiradimui vamzdyje. Tačiau mikrokietumo bandymo rezultatai paneigė visus šiuos įtarimus.



26 pav. Mikrokietumas išilgai vamzdžio sienelės storio

Matuojant išilgai senojo vamzdžio sienelės storio, akivaizdžiai matomas didesnis mikrokietumas iki 0,5 mm nuo vidinio paviršiaus. Tai galima būtų paaiškinti kaip įvairių karbidų ir kitų priemaišų susidarymą, struktūros užsiteršimą vidiniame vamzdžio paviršiuje. Vidiniai paviršiai yra veikiami agresyvios terpės, slėgio bei temperatūros (p=6-7 MPa, t=440 °C) , todėl čia susidaro daugiau padidėjusio kietumo tūrių. Toliau eksplotuojant austenitinį plieną aukštoje temperatūroje šios trapios fazės sukeltų šiluminį, sigmatizacinį arba senėjimo trapumą. Šiuo atveju gauti rezultatai diagramoje nerodo didelių kietumo rezultatų kreivės pikų pakilimų ar nusileidimų, kas būna tiriant susidariusių įtrūkių priežastis dėl prieš tai išvardintų reiškinių.

4.7 Mechaninių savybių rezultatų palyginimas su praktikoje gautomis

Standartas EN 10216-5:2004 nurodo praktikoje gautas takumo ribos ($Rp_{0,2}$), santykinio pailgėjimo (A_5) ir reikalingos bandiniui suardyti energijos (KV), smūginio tąsumo bandymo metu, minimalias reikšmes, kurias turi tenkinti austenitinis nerūdijantis X8CrNiTi18-10 plienas, išdirbęs 100 000 valandų, prie 450 °C temperatūros.

5 lentelė. Mechaninių savybių bandymo rezultatų įvertinimas pagal EN 10216-5:2004

Elementas	Temp. °C	$R_{p0,2}$, MPa	A_5, %	Suardymo energija KV, J
Senas vamzdis	20	254	62,3	140
	440	172	36,7	---

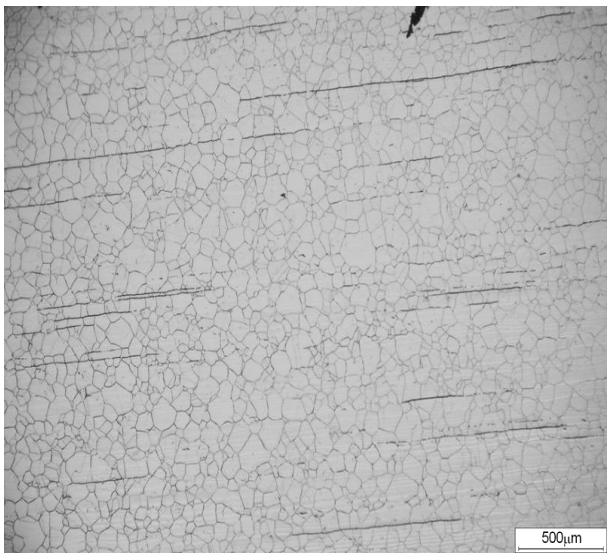
Bandinys, padarytas iš metalo, šalia įtrūkio vietos	20	---	---	89
X8CrNiTi18-10 (EN 10216-5:2004)	20	190	40	100
	450	134	---	---

Tiriamojo senojo vamzdžio medžiaga atitinka praktikoje nustatytas minimalias mechaninių savybių reikšmes, kurias turi tenkinti vamzdis, išdirbęs 100 000 h prie 450 °C, pagal standartą EN 10216-5:2004. Bandinio, padaryto iš metalo, esančio šalia įtrūkio vietos, reikalingos bandiniui suardyti energijos (KV), smūginio tąsumo bandymo metu, reikšmė (89 J) yra mažesnė, negu standarte nurodyta (100 J). Standartas taip pat nurodo, kad jeigu gauti mechaninių savybių bandymų rezultatai neatitinka minimalių reikšmių, tai reiškia, jog austenitiniame pliene vystėsi tarpkristalinė korozija. Tolimesniam tyrimui turi būti daromi metalografiniai tyrimai, kuriais bus atliktas kokybinis medžiagos mikrostruktūros įvertinimas.

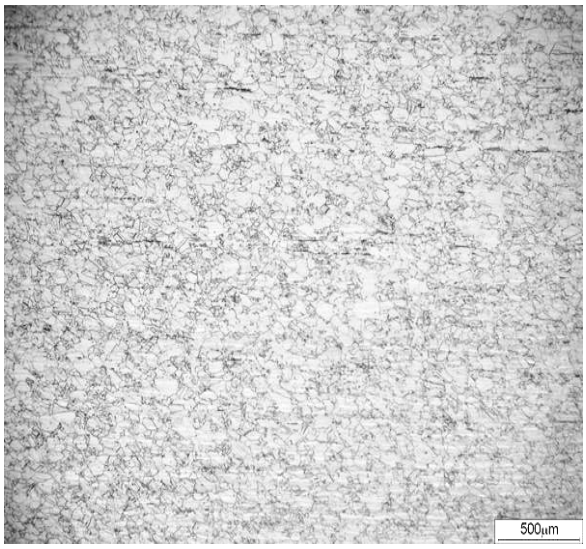
4.8 Mikrostruktūrų tyrimai

4.8.1 Mikrostruktūrų tyrimai optiniu mikroskopu

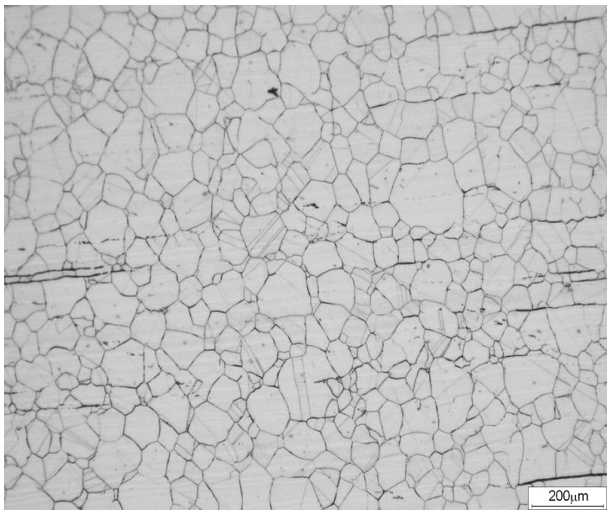
Cheminės sudėties, bei mechaninių savybių tyrimų rezultatai buvo teigiami. Tolimesniam įtrūkių susidarymo priežasčių nustatymui buvo atlikti išsamūs plieno struktūros tyrimai. Mikrostruktūrų tyrimas atliktas naudojant „Nikon“ optinį mikroskopą, didinantis nuo 50 iki 200 kartų. Tyrimui bandinių paviršiai šlifuojami abrazyviniu popieriumi, poliruojami ir ėsdinami su Mi16Fe reagentu, kad išryškėtų medžiagos mikrostruktūra. Šio tyrimo tikslas atlikti kokybinį medžiagos mikrostruktūros įvertinimą.



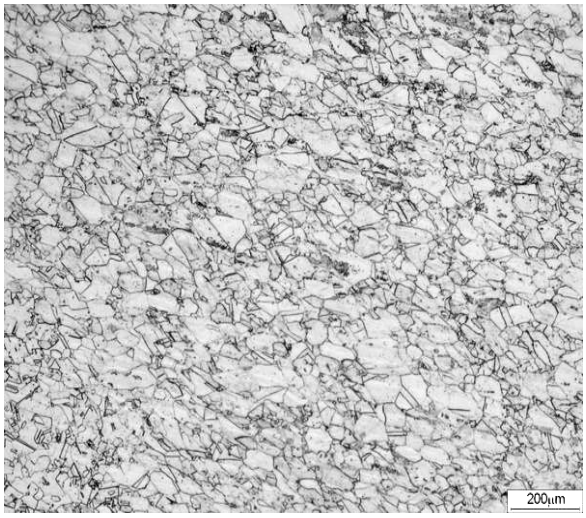
27 pav. Seno vamzdžio mikrostruktūra



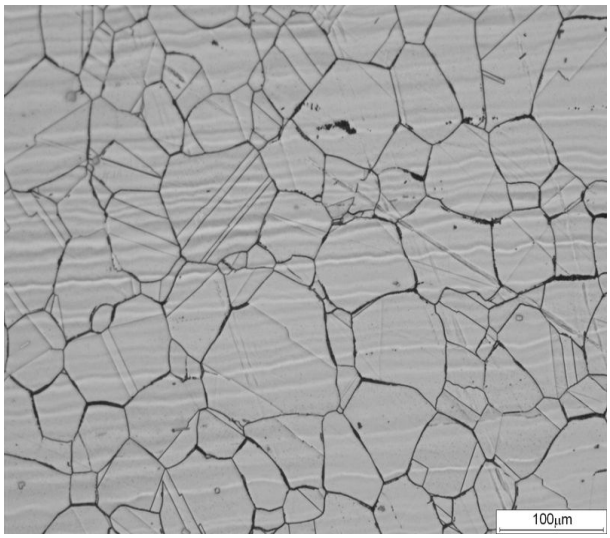
28 pav. Naujo vamzdžio mikrostruktūra



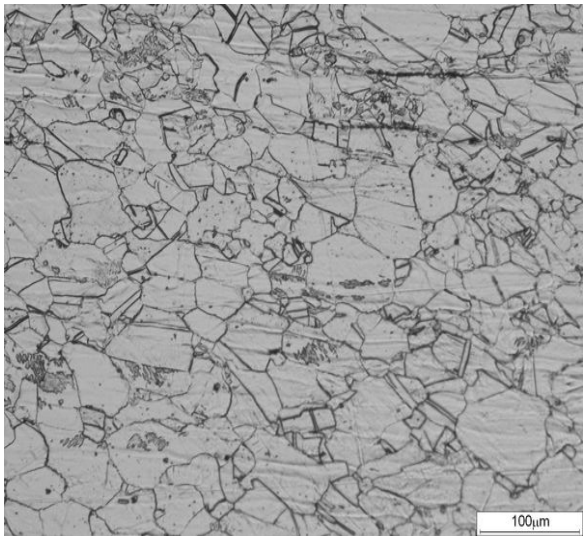
29 pav. Seno vamzdžio mikrostruktūra



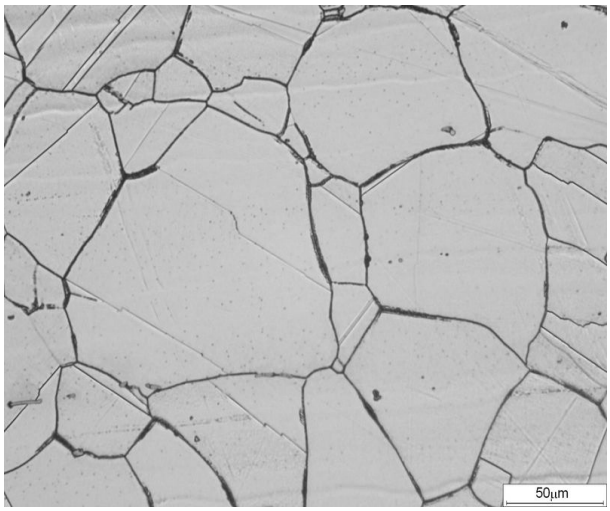
30 pav. Naujo vamzdžio mikrostruktūra



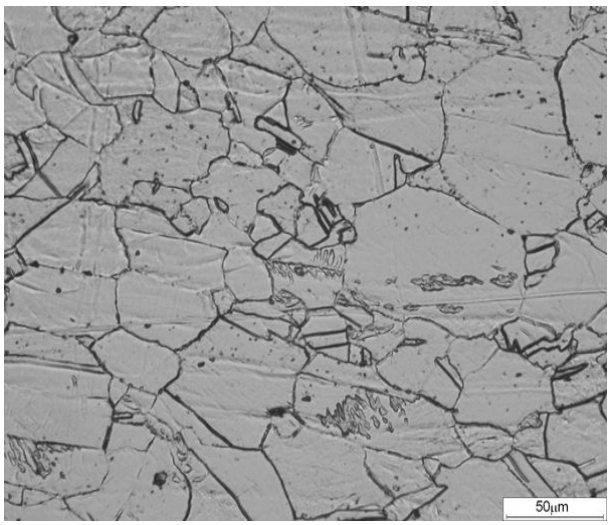
31 pav. Seno vamzdžio mikrostruktūra



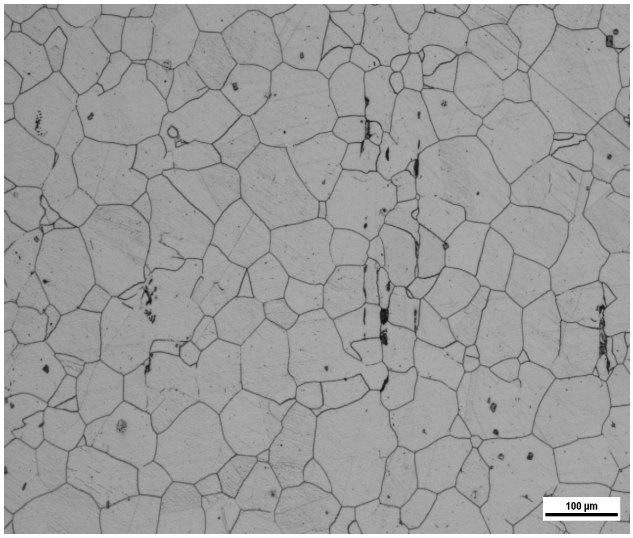
32 pav. Naujo vamzdžio mikrostruktūra



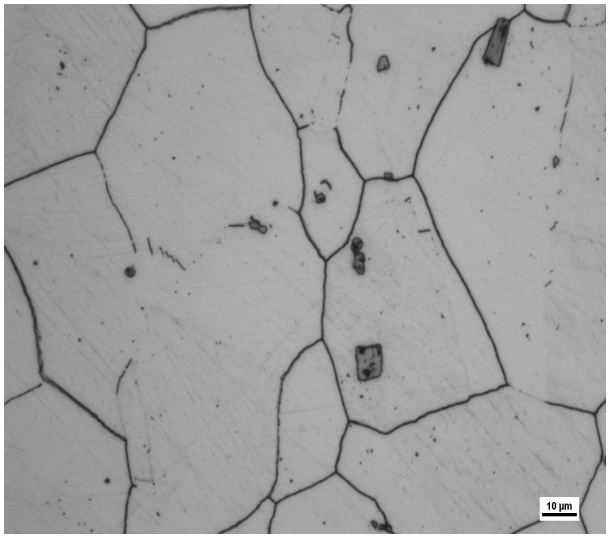
33 pav. Seno vamzdžio mikrostruktūra



34 pav. Naujo vamzdžio mikrostruktūra



35 pav. Seno vamzdžio mikrostruktūra

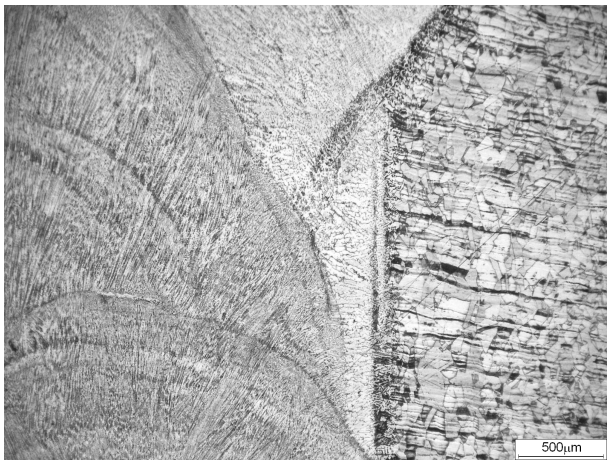


36 pav. Seno vamzdžio mikrostruktūra

Iš gautų rezultatų matome, kad tai tipiškos austenitinio plieno mikrostruktūros. Aiškiai išsiskiria struktūrų nuotraukose dvilinkiai, kurie būdingi austenitui. Palyginus mikrostruktūras akivaizdžiai matosi, kad seno vamzdžio struktūra yra vienarūšiškesnė, lygiaašiškesnė, tačiau grūdeliai yra didesni. Eksploatuojant plieną aukštoje temperatūroje, pagal grūdelių ribas išsiskiria karbidai, kurie jungiasi į kolonijas, nitridai ir kiti metališkieji junginiai, o taip pat vyksta ir austenito grūdelio augimas. Tai silpnina tarpgrūdelinius ryšius, susidarę chromo karbidai mažina korozinį nerūdijančio plieno atsparumą, suteikia pradžią vystytis tarpkristalinei korozijai ir vėliau formuotis mikroįtrūkimams. Mikroįtrūkimai jungiasi vienas su kitu taip didėdami, kol visai suardo tarpatominius grūdelių ryšius ir suformuoja įtrūkius.

Plonos linijos (27 pav.) tai sulfidų struktūrinis eilėtumas, einantis plieno valcavimo kryptimi. Storos tamsios linijos tarp metalo grūdų (33 pav.) rodo, kad sename vamzdyje tarp grūdelių ribų kaupiasi karbidai ir kitos priemaišos. Ant pačių grūdų taip pat pastebimi įvairūs

junginiai: karbidai, sulfidai, nitridai. Šiuo tyrimu taip pat buvo išmatuoti ir grūdelių dydžiai: seno vamzdžio 41-59 µm ir naujo 23-42 µm. Tai rodo kad grūdai senoje medžiagoje yra apie 40 % didesni. Dėl didelio grūdelių dydžio lengviau plinta ir susidaro struktūriniai mikroįtrūkiai. Grūdelių ribos yra stipresnės už pačius grūdelius. Kuo pliene grūdeliai yra smulkesni, tuo didesnė tūrio dalis metale tenka grūdelių riboms, tuo didesnė metalo takumo riba, smūginis tąsumas ir atvirkščiai. Naujo vamzdžio struktūra nėra tokia, vienarūšiška kaip senojo. Matome daugiau metališkųjų intarpų, kintantį grūdų dydį. Taip pat ne tokia lygiaašė, kristalai labiau išsikraipę, dėl vamzdžio gamybos valcuojant. Šios įvairios priemaišos ir netobulumai kristalų, sunkina dislokacijų judėjimą naujame pliene. Tai plieną daro stipresniu ir atvirkščiai sukelia stiprumo sumažėjimą senojo vamzdžio medžiagoje, mažina atsparumą nuovargiui. Tai paaiškina mechaninio tempimo bandymų rezultatus, kodėl sumažėjo stiprumo savybės.



37 pav. Naujo vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra



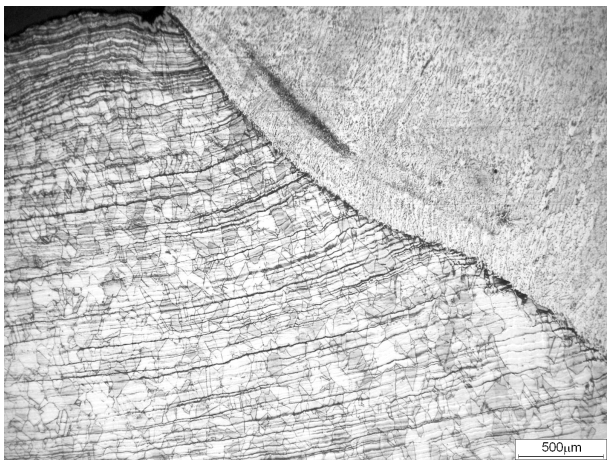
38 pav. Naujo vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra



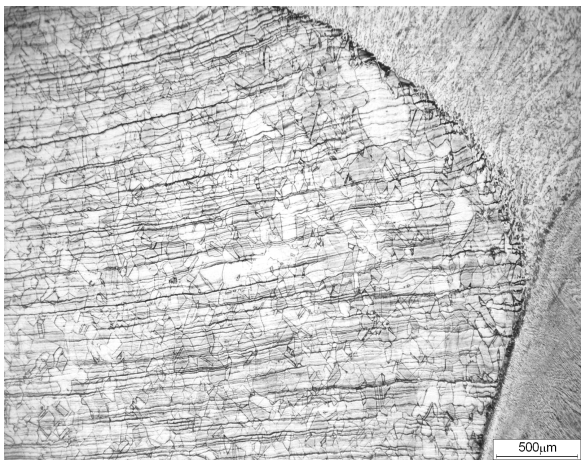
39 pav. Naujo vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra



40 pav. Naujo vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra



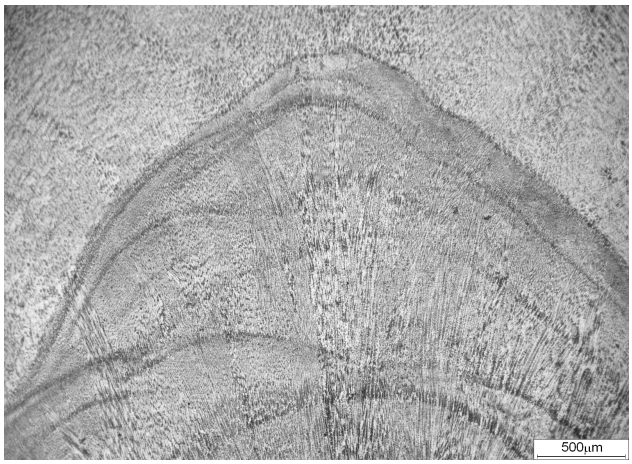
41 pav. Seno vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra



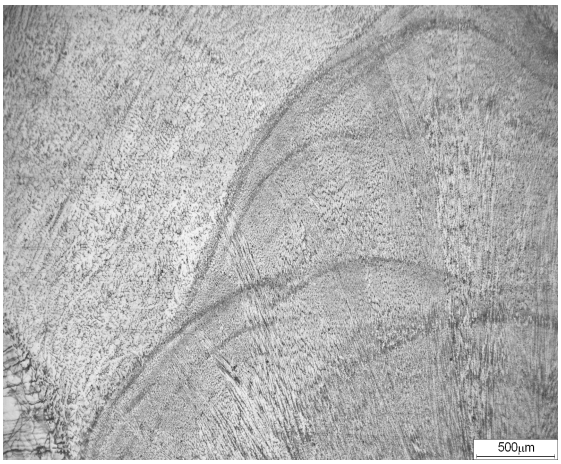
42 pav. Seno vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra



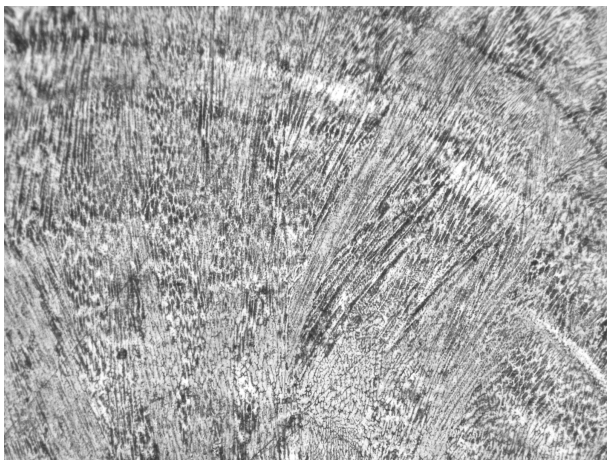
43 pav. Seno vamzdžio siūlės ir TPZ mikrostruktūra



44 pav. Suvirinimo siūlės mikrostruktūra



45 pav. Suvirinimo siūlės mikrostruktūra



46 pav. Suvirinimo siūlės mikrostruktūra



47 pav. Suvirinimo siūlės mikrostruktūra

Terminio poveikio zonos temperatūrai pakilus virš rekristalizacijos temperatūros, pradeda augti struktūros grūdas. Austenito grūdelio augimą stabdo susidariusios dispersinės karbidų ir karbonitridų fazės. Didėjant plieno įkaitinimo temperatūrai, austenito grūdelio augimą stabdančios antrinės fazės kiekis mažėja, todėl mažėja ir grūdelių augimo stabdymo efektyvumas, išauga didelių matmenų grūdeliai. Suvirintojo sujungimo terminio poveikio zonoje antrinės fazės poveikis augančiam austenito grūdeliui yra ne vienodas, nes priklauso nuo metalo įkaitinimo temperatūros.

Mikrostruktūrose matomą terminio poveikio sritį galima suskirstyti į dvi zonas. Pirmoji dalis, kuri buvo įkaitusi iki 850 – 1100 °C temperatūros, vyrauja smulkūs grūdeliai. Artėjant prie siūlės, kur plienas terminio ciklo buvo įkaitintas iki 1100 – 1500 °C temperatūros, austenito grūdeliai spėja išaugti į stambesnius. Taip pat artėjant prie siūlės metalo ribos susidaro didesnių matmenų austenito grūdeliai. Šios srities smūginio tąsumo ir stipruminės charakteristikos yra pačios blogiausios. Ne visiško išlydymo zona, tarp siūlės ir pagrindinio metalo susilydymo riba, matoma kaip tamsi linija. Čia kaupiasi įvairios smulkios eutektikos, priemaišos, difunduoja anglis į aukštesnę temperatūrą suvirinimo metu. Senojo vamzdžio TPZ srityje vyrauja stambesni austenitiniai grūdeliai. Aiškiai matomas ir struktūros eilėtumas, kuris susidarė plieno gamybos metu valcuojant. Čia grūdai išaugo ne tik dėl ilgai eksplotuojant vamzdį aukštoje temperatūroje ar šio suvirinimo metu, bet ir dėl anksčiau atlikto suvirinimo terminio poveikio. Kaip anksčiau buvo minėta stambiagrūdžio plieno mechaninės savybės labai pablogėja. Dėl didelio grūdelių dydžio taip pat lengviau plinta ir susidaro struktūriniai mikroįtrūkiai.

Legiruotuose mažaangliuose plienuose jau 100 – 200 °C temperatūroje įsiterpimo kietieji tirpalai sąveikauja su deformacinių dislokacijų laukais, dėl to gali atsirasti deformacinio senėjimo sukeliamas trapumas. Šie struktūros pokyčiai vizualiai net ir labai padidinti yra nepastebimi, tačiau gali labai sumažinti metalo stiprumą ir tąsumą. Veikiant suvirinimo terminiam ciklui, susidaro deformacinės dislokacijos, kurių tankis gali būti labai didelis. Taip terminio poveikio zonoje gali

išaugti kietumas, tuo pačiu suaktyvėti deformacinio senėjimo sukeliamas trapumas, tolesnės eksploatacijos metu, veikiant vamzdyje vidiniam slėgiui, vystytis įtrūkiai.

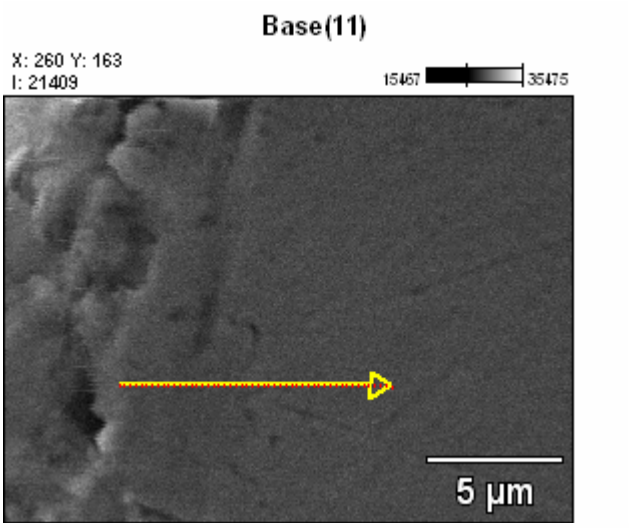
Didesnėje kaip 400 °C temperatūroje prasideda karbidų sferodizacija ir augimas. Metalui įkaitus iki 600 °C išsiskiria stabilūs dispersiniai legiravimo elementų karbidai, kurie kaupiasi grūdelių ribose į didesnes kolonijas. Šias zonas galima pavadinti subkritinėmis terminio poveikio zonomis, kuriose metalo trapumas gali būti esminė priežastis įtrūkių atsiradimui vamzdyje.

Suvirinimo siūlę sudaro lygiašoniai, pailgi, smulkūs austenitinės struktūros dendritiniai kristalitai, kurie susiformavo suvirinimo metu.

4.8.2 Skanuojanti mikroskopija

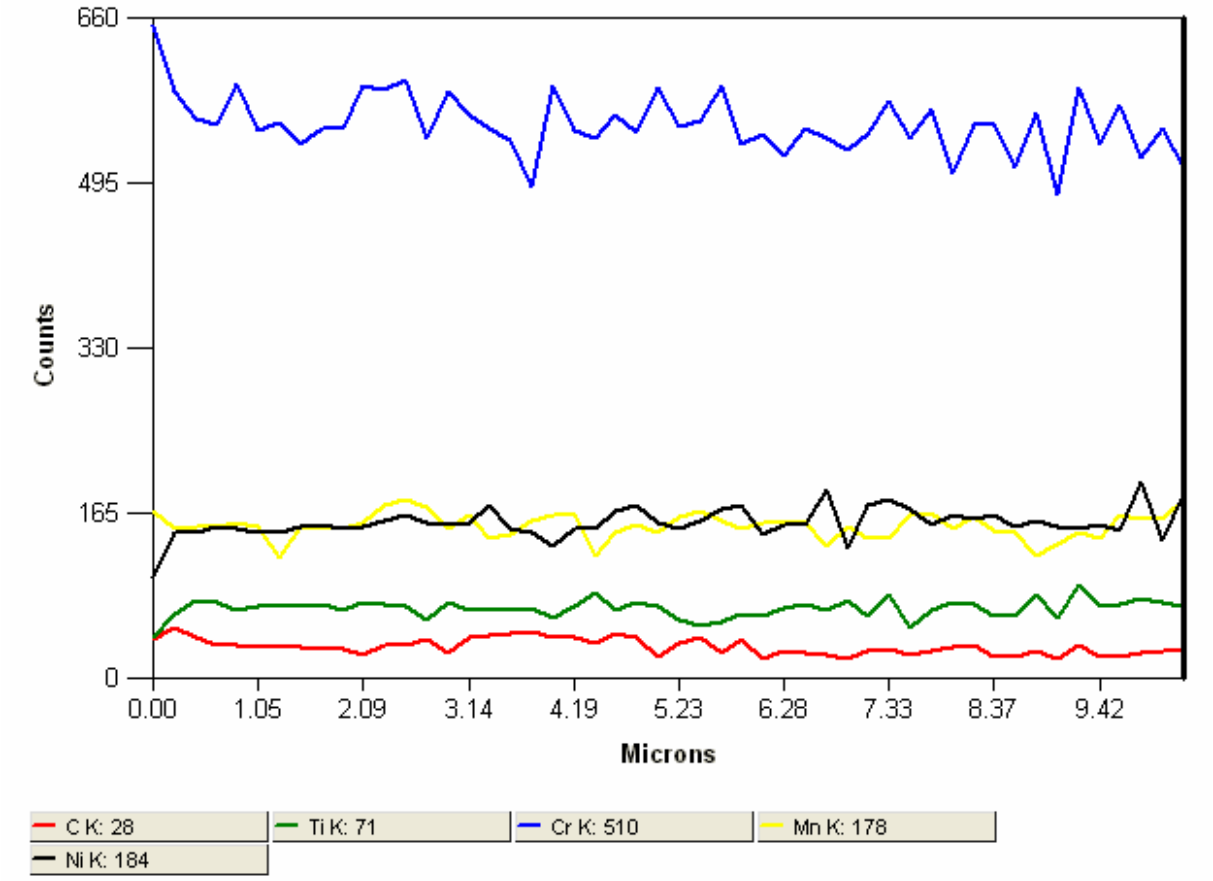
Struktūros buvo tiriamos su „S-2600“ modelio „Hitachi“ skanuojančiu mikroskopu, kuriame įrengtas „Noran“ elektronų rentgeno analizatorius. Tyrimas apėmė poliruotus išilginius ir skersinius bandinių pjūvius, padarytus iš vamzdžių medžiagos ir įtrūkių vietų.

Svarbiausių legiruojančių elementų pakitimo tyrimas, vidiniame ir išoriniuose vamzdžių paviršiuose, buvo nustatinejama su elektronų rentgeno analizatoriumi. Bandymai kurie buvo atlikti 10 mikrometrų medžiagos ilgyje, neparodė didelių pakitimų tarp svarbiausių legiruojančių elementų. Rezultatai pateikti sekančiuose keturiuose paveiksluose. Metalui dirbant aukštoje temperatūroje vyksta struktūrinių charakteristikų pasiketimai. Šios charakteristikos – tai austenito grūdelio dydis, jų lygiaašiškumas, legiravimo elementų ir anglies pasiskirstymo tolygumas (homogeniškumas), kristalinių gardelių defektai, karbidų išsiskyrimas. Plienui dirbant aukštoje temperatūroje, susidaro naujos struktūros laikui bėgant, ir kinta legiruojančių elementų kiekis, pasiskirstymas išoriniuose ir vidinių vamzdžių paviršiuose.

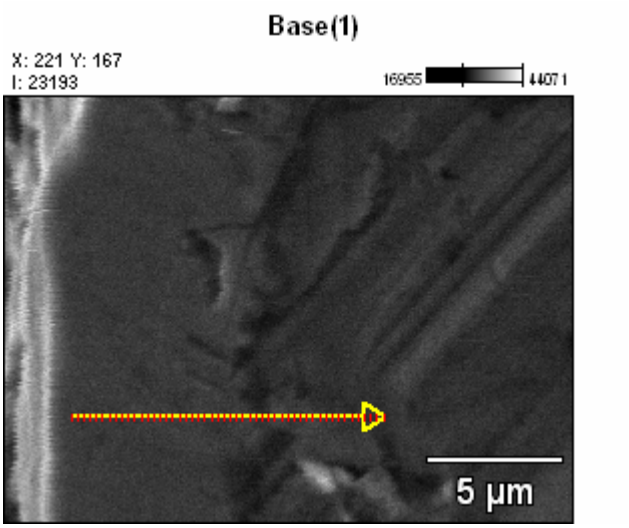


Įgreitinančioji įtampa: 20.0 kV

Padidinimas: 6000

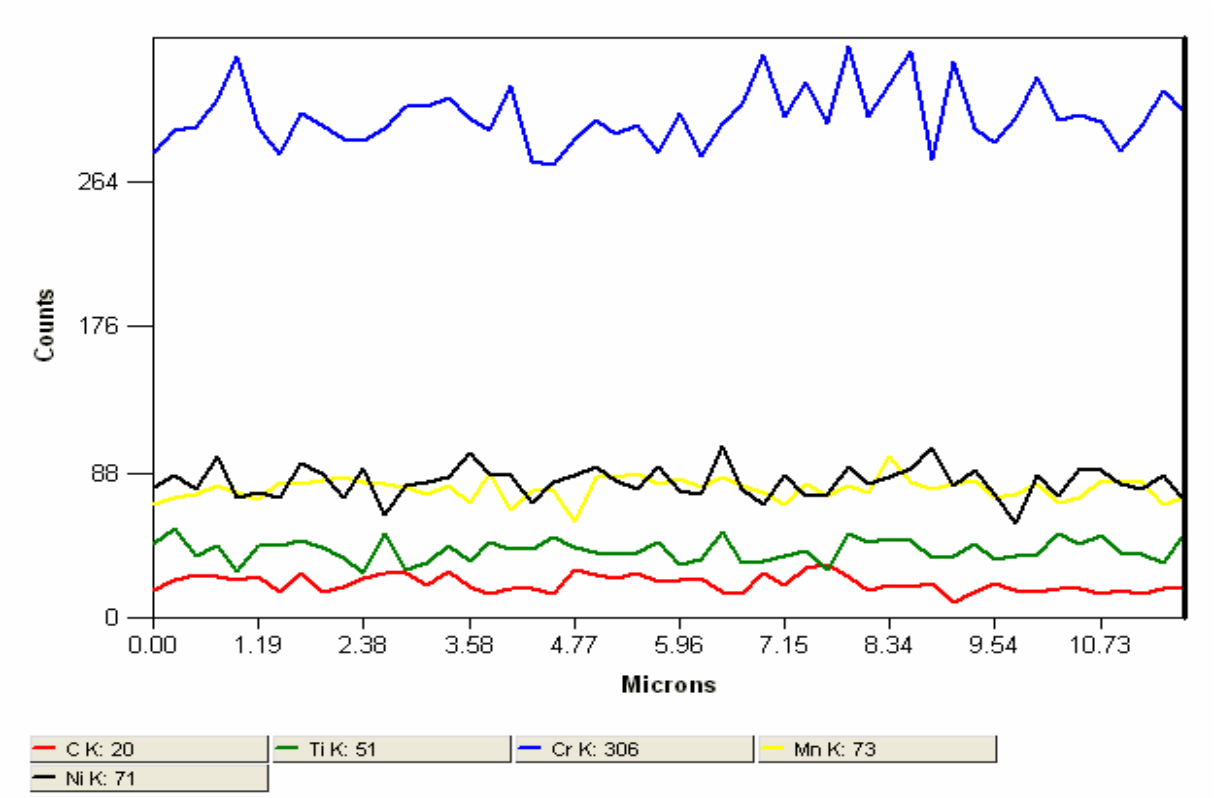


48 pav. Pagrindinių legiravimo elementų kitimas vidiniame seno vamzdžio paviršiuje

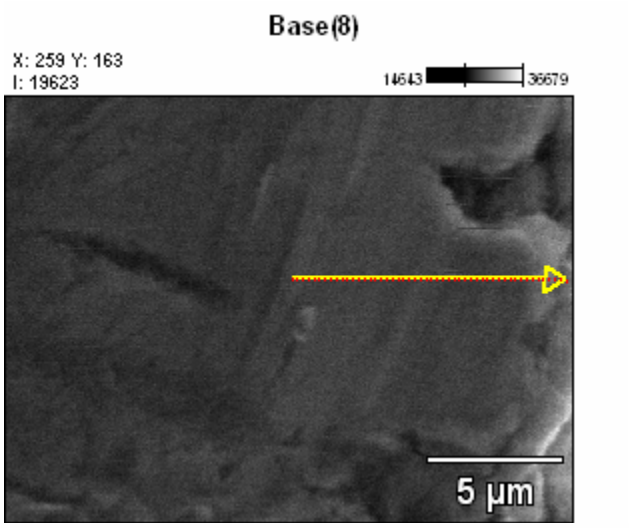


Įgreitinančioji įtampa: 20.0 kV

Padidinimas: 6000

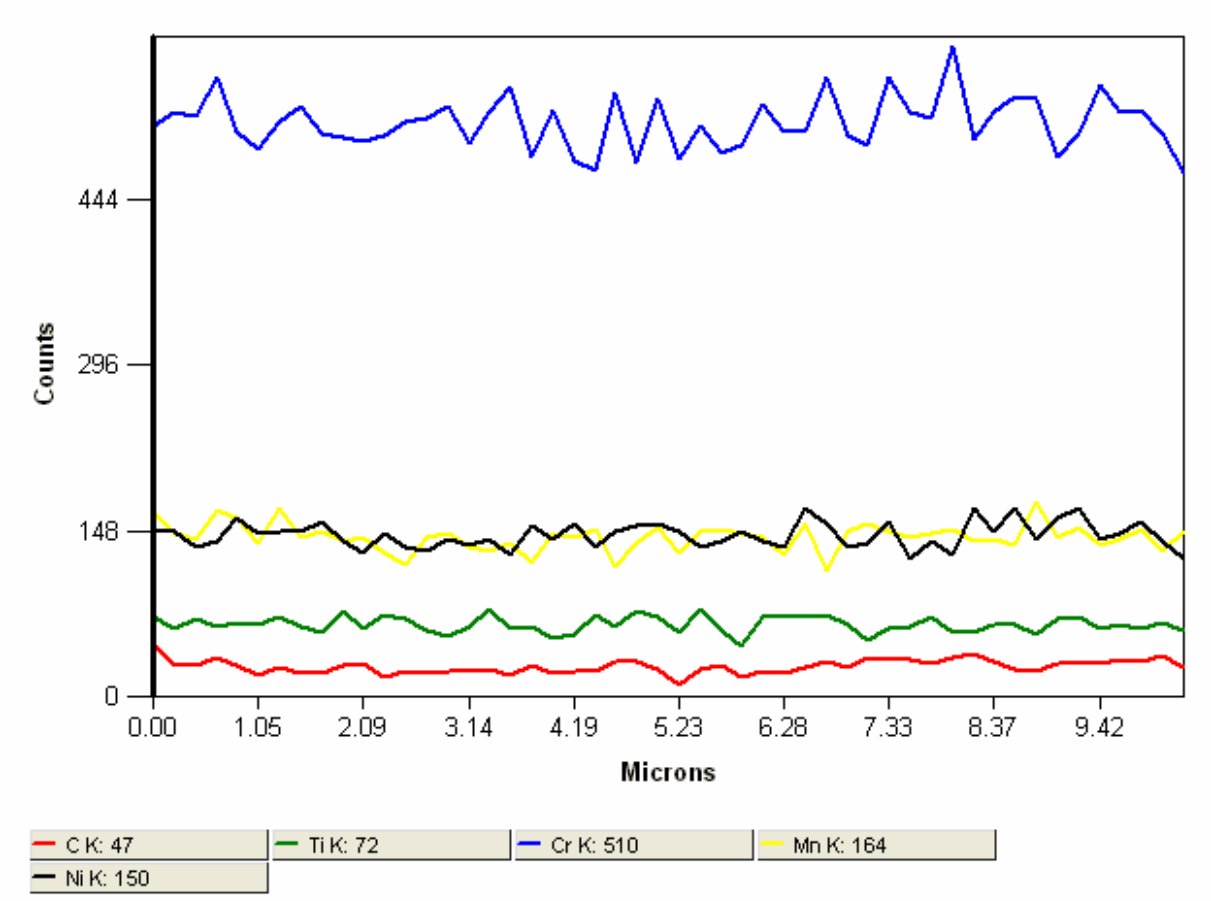


49 pav. Pagrindinių legiravimo elementų pakitimas vidiniame naujo vamzdžio paviršiuje

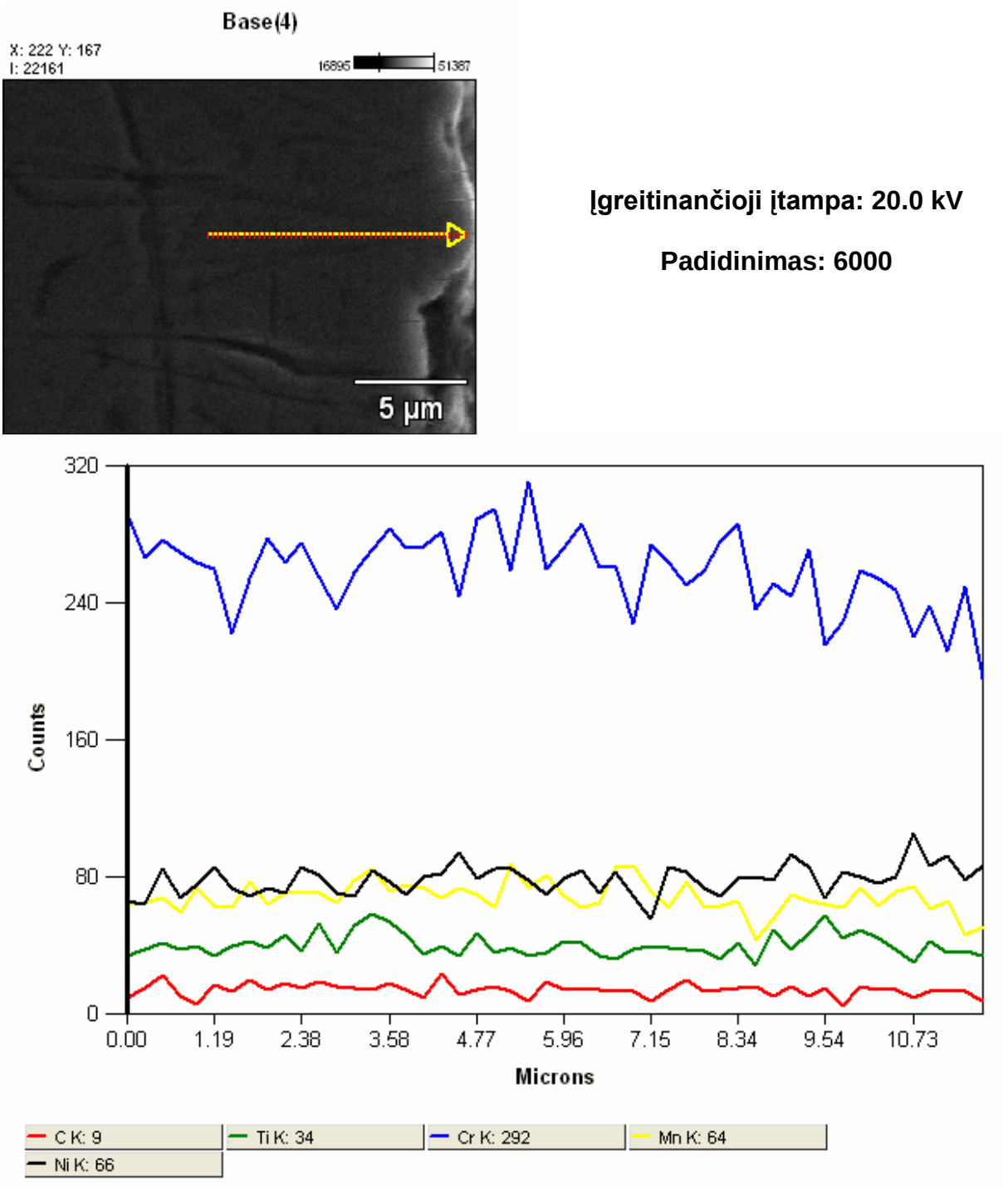


Įgreitinančioji įtampa: 20.0 kV

Padidinimas: 6000



50 pav. Pagrindinių legiravimo elementų pakitimas išoriniame seno vamzdžio paviršiuje

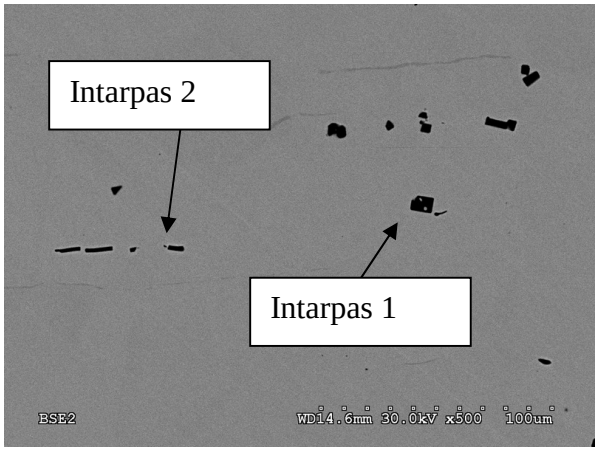


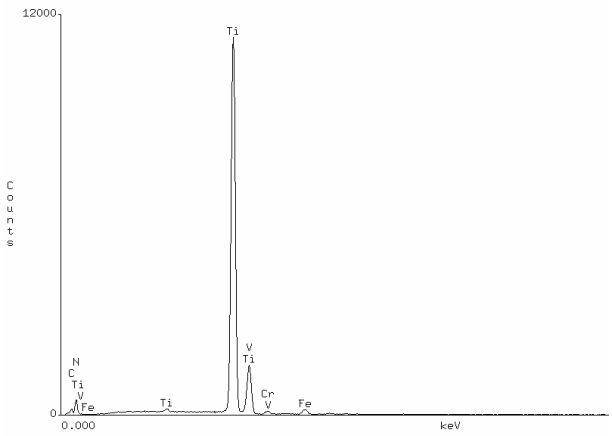
51 pav. Pagrindinių legiravimo elementų pakitimas išoriniame naujo vamzdžio paviršiuje

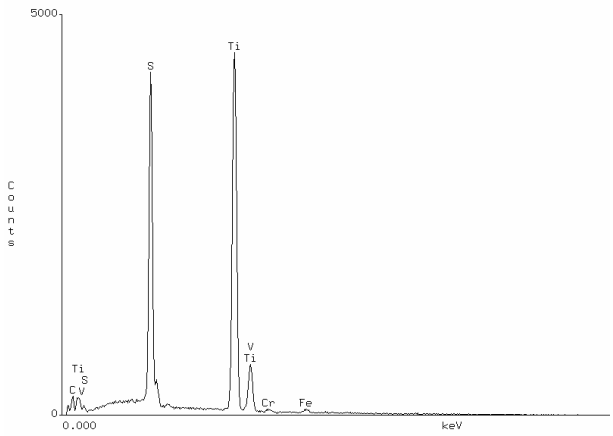
Sulyginę vidinio ir išorinio vamzdžių legiruojančių elementų koncentracijų grafikus matome, kad nėra didelio šių elementų skirtumo. Korozinis plieno atsparumas priklauso nuo struktūros fazinio, struktūrinio ir cheminio vienodumo, nes visi šie veiksniai lemia metalo paviršiaus elektrocheminio potencialo tolygumą. Esant agresyviai elektrolitinei terpei, tarp skirtingo elektrinio potencialo fazių prasideda elektrocheminė korozija. Susidarę chromo karbidai, chromas iš paviršinių grūdelio zonų pereina į karbidus. Kietajame tirpale sumažėjus Cr kiekiui iki 10 – 12 %,

šis tirpalas netenka korozinio atsparumo. Išsiskyrę grūdelių paviršiuje chromo karbidai sukelia lokaliuosius įtempius, taip pat mažinančius korozinį kietojo tirpalo atsparumą.

Tiriant poliruotą pjūvio paviršių tyrimas parodė didesnį kiekį titano nitridų, nes Ti % yra daugiau naujame vamzdyje, ir valcavimo sulfidų intarpų buvimą naujo vamzdžio medžiagoje. Tačiau skirtumas nėra labai didelis. Rezultatai pateikti 52 – 53 paveiksluose.



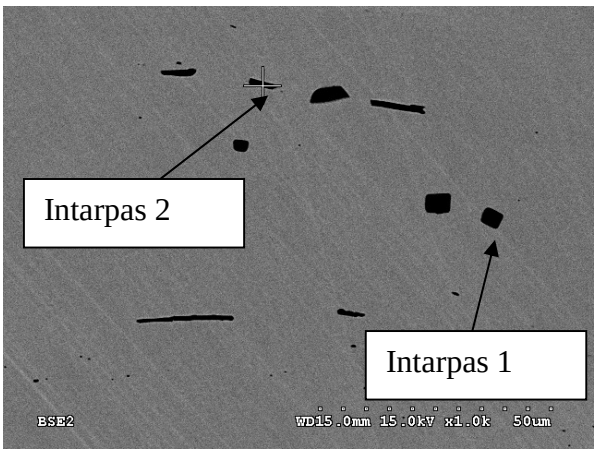


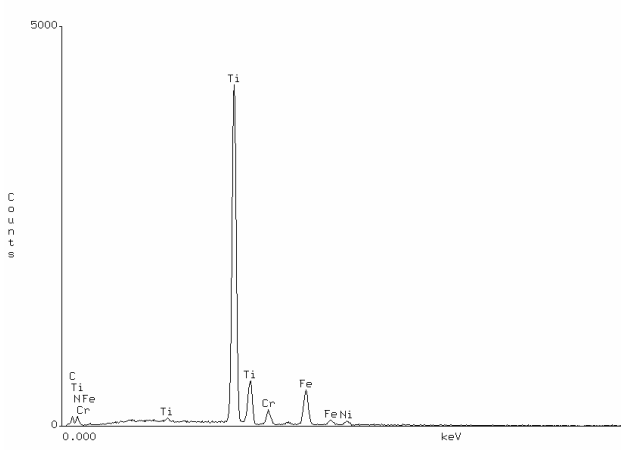


Intarpas 1
N- 15,63 Ti - 80,85 V - 0,44 Cr - 0,91 Fe - 2,17

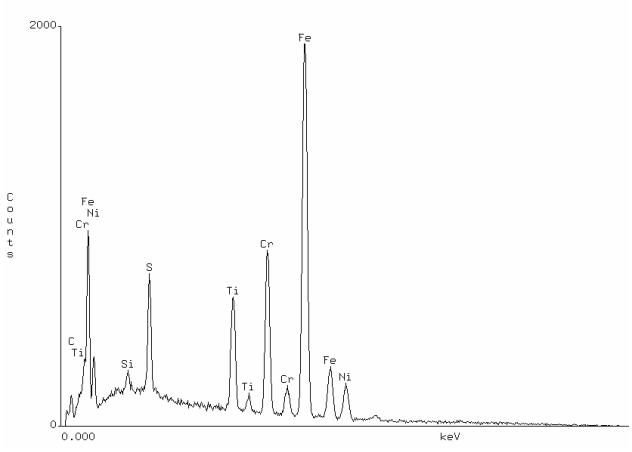
Intarpas 2
S - 23,32 Ti - 73,17 V - 0,69 Fe - 2,14 Cr - 0,68

52 pav. Intarpų analizė senajame vamzdyje





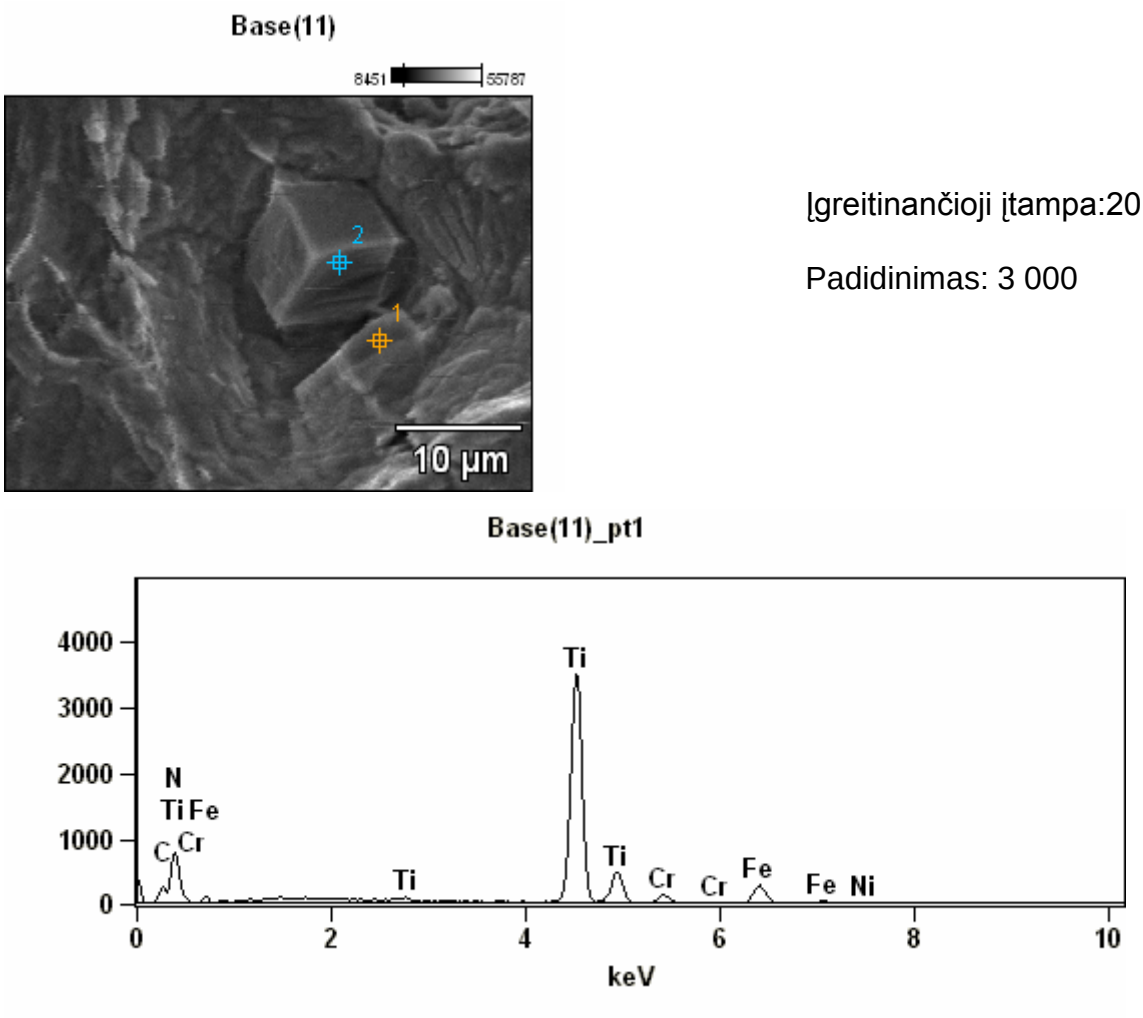
Intarpas 1
N - 4,65 Ti - 74,67 Cr - 4,56 Fe- 15,07 Ni -2,06



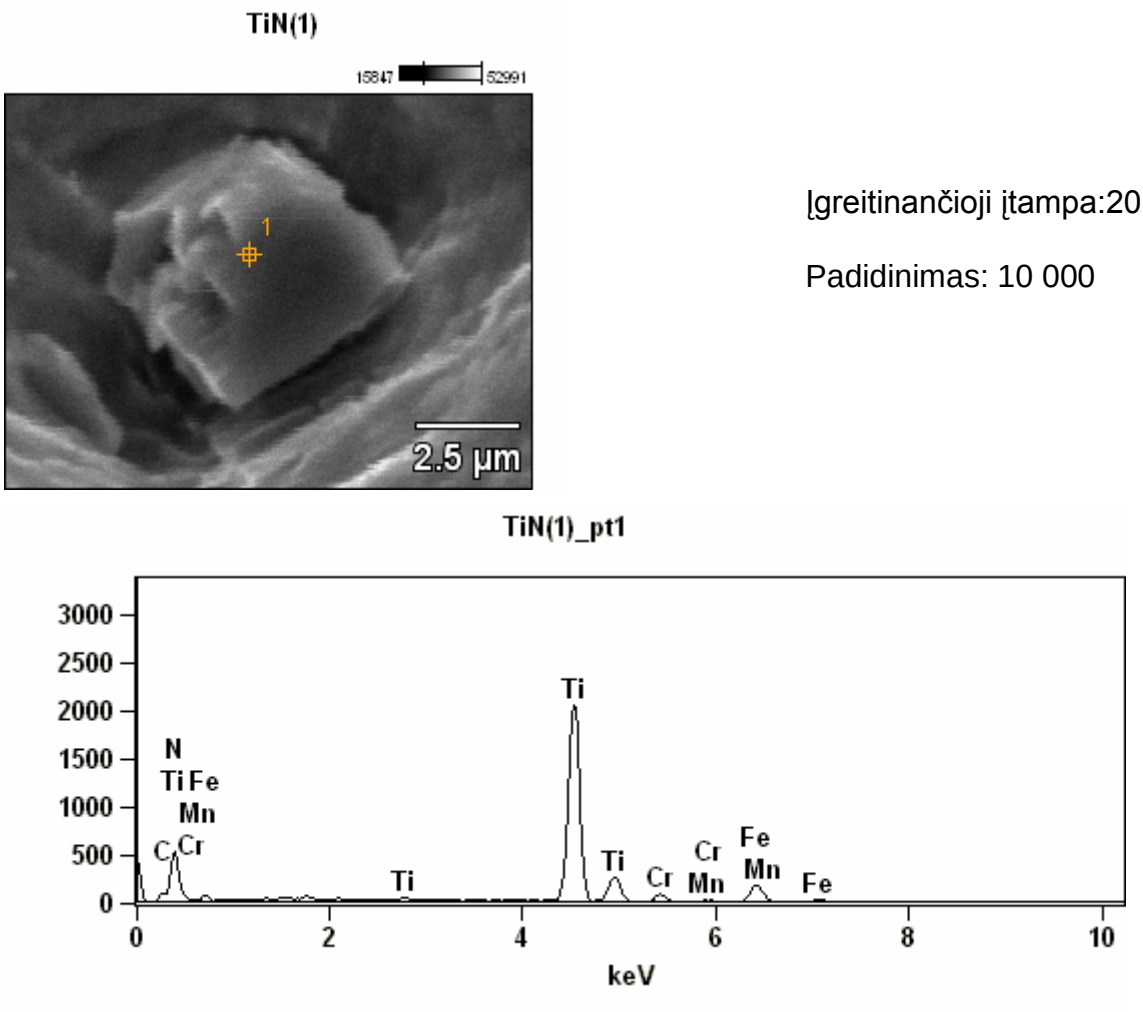
Intarpas 2
S - 3,26 Si - 0,56 Ti - 7,9 Fe - 62,99 Cr - 15,4 Ni - 9,9

53 pav. Intarpų analizė naujajame vamzdyje

Tiriant bandinių lūžio vietas, gautas po smūginio tąsumo bandymo, buvo pastebėtas akivaizdus titano nitrido (TiN) buvimas abiejų medžiagų lūžio paviršiuose. Tai parodyta sekančiuose dviejuose paveikslėliuose. Austenite vanadžio, niobio, titano nitridai išsidėsto grūdelių ir subgrūdelių paribiuose, šalia dislokacijų ir struktūros sandaros defektų.

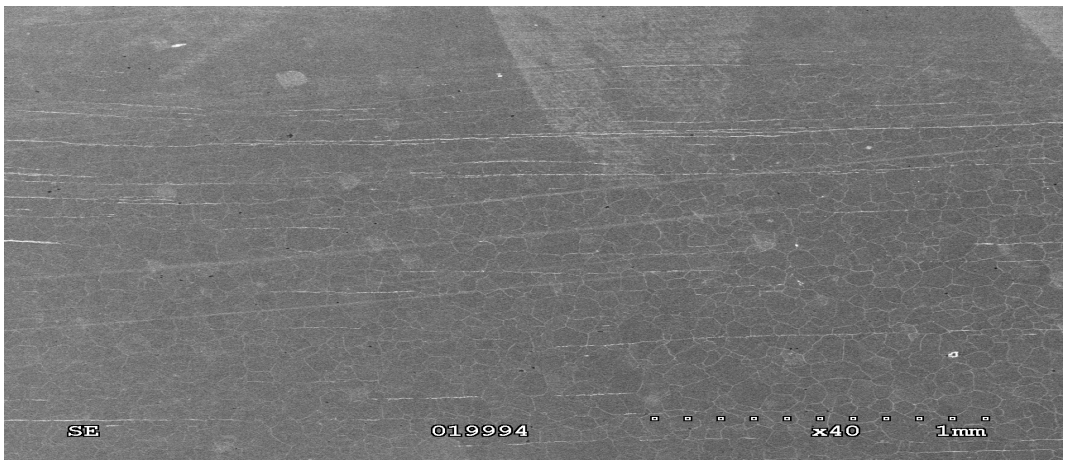


54 pav. TiN lūžio paviršiuje, gautame po smūginio tąsumo bandymo, senajame vamzdyje

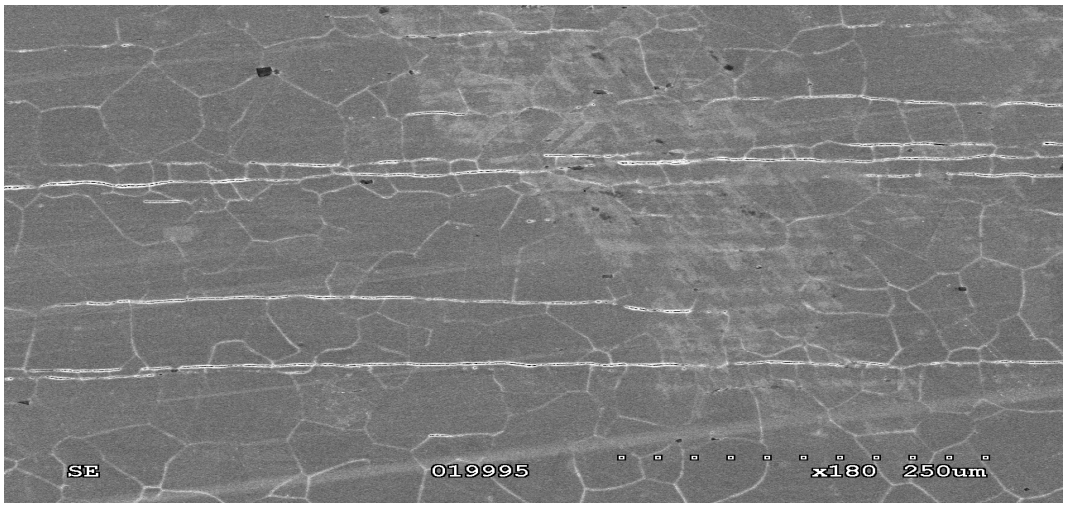


55 pav. TiN lūžio paviršiuje, gautame po smūginio tąsumo bandymo, naujame vamzdyje

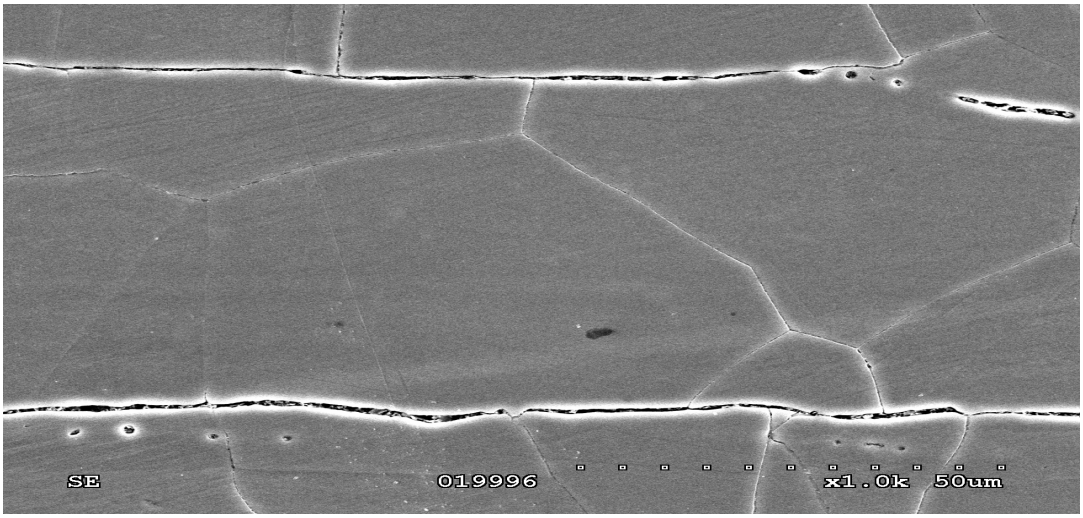
Nagrinėjant metalografines bandinių skerspjūvio nuotraukas, padarytas šalia įtrūkių vietų, akivaizdžiai matomas mikroįtrūkių formavimasis, plitimas, augimas išilgai grūdų ribų. Tamsios linijos rodo susikaupusius karbidus, nitridus ir kitas eutektikas. Sekantys trys paveikslai išskiria metalografinių bandinių paviršių su besiformuojančiais įtrūkiais, statmenais vamzdžio ašiai, struktūrų nuotraukas.



56 pav. Besiformuojantys įtrūkiai senajame vamzdyje išilgai, pagal grūdų ribas ant metalografinio bandinio skerspjūvio



57 pav. Besiformuojantys įtrūkiai senajame vamzdyje išilgai, pagal grūdų ribas ant metalografinio bandinio skerspjūvio



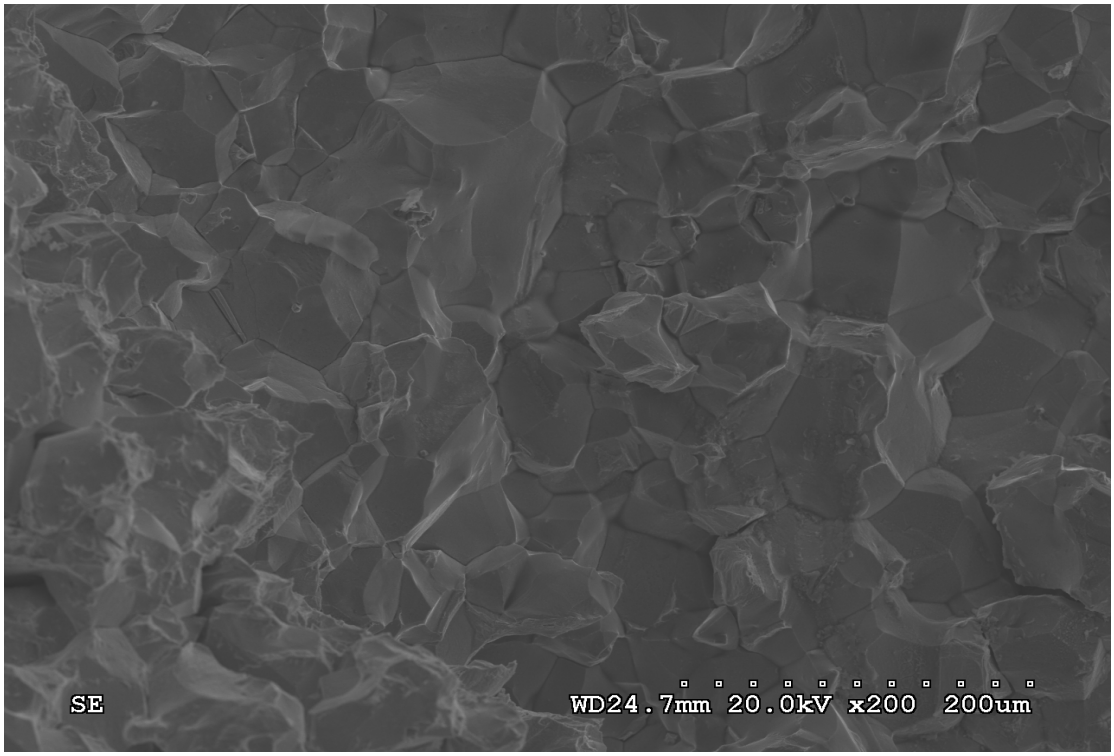
58 pav. Besiformuojantys įtrūkiai senajame vamzdyje išilgai, pagal grūdų ribas ant metalografinio bandinio skerspjūvio

Toliau atliekamas atsiradusio įtrūkio senajame vamzdyje struktūros analizė. Sekančiame paveiksle matoma įtrūkio, kuris atsirado eksploatacijos metu, fraktografija.



59 pav. Įtrūkio topografija, padidinta 50 kartų

Sekančiame paveiksle pateikta padidinta tipiška įtrūkio paviršiaus topografija. Akivaizdžiai matomi įtrūkiai, tuštumos tarp grūdelių ribų, kurie atsirado dėl tarpkristalinės plieno korozijos. Iš to galima padaryti išvadą, kad įtrūkiai senajame vamzdyje atsirado veikiami šios rūšies korozijos.

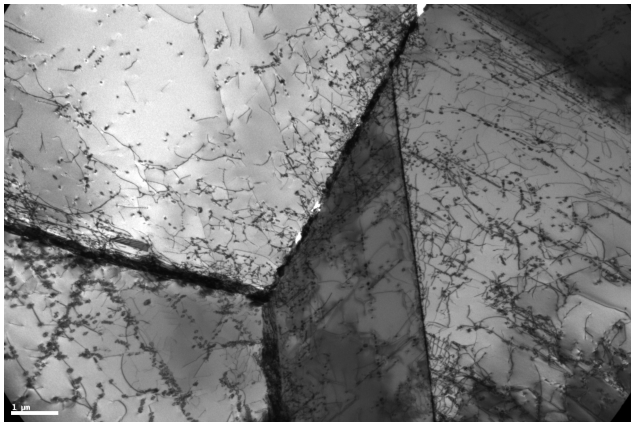


60 pav. Įtrūkio paviršiaus topografija, padidinta 200 kartų

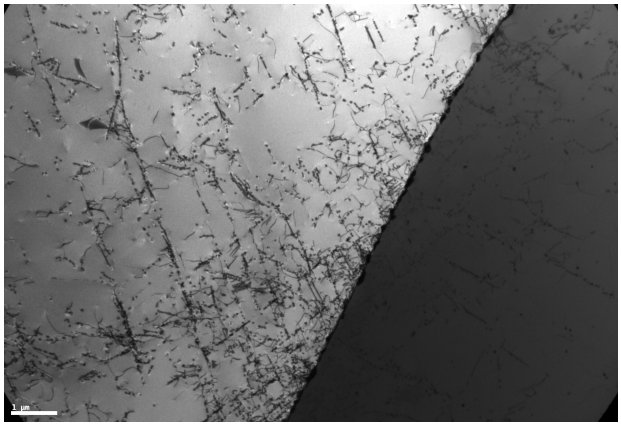
4.8.3 Mikrostruktūrų tyrimai skanuojančiu elektroniniu mikroskopu

Sekantys mikrostruktūrų tyrimai ir kokybės įvertinimas struktūrų buvo atlikti naudojant skanuojantį elektronų perdavimo „S-5500“ modelio „Hitachi“ mikroskopą. Įgretinančioji įtampa buvo 30 kV, ir didinimas naudojamas nuo 2500 iki 100 000 kartų. Bandiniai buvo ploninami mechaniniais ir elektrocheminiais metodais, kol buvo pasiektas reikalingas plonumas, kad būtų peršviesti elektronų pluoštu.

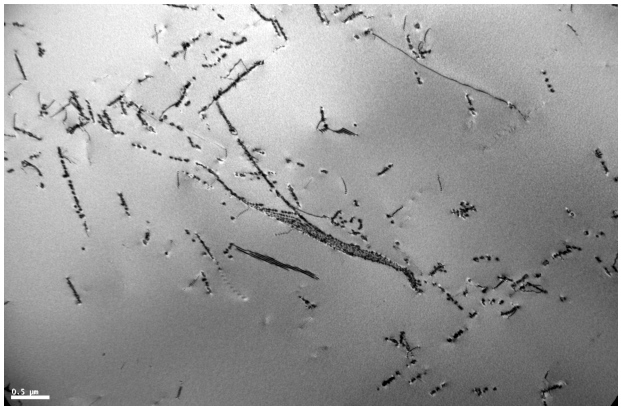
Šis tyrimas parodė tipišką užterštą metalo vidinę struktūrą, grūdelių ribas, dislokacijas, karbidus besikaupiančius grūdelių ribose. Iš gautų struktūrų, padarytų elektroniniu mikroskopu, matome intarpų buvimą seno vamzdžio medžiagoje, kuriuos nustatėme ir su optiniu mikroskopu. Aiškiai matyti dviejų tipų intarpai medžiagoje. Smulkūs intarpai yra išsidėtę ant grūdelių dislokacijų linijų ir slydimo plokštumų. Tai titano karbidai (TiC). Kiti intarpai žymiai didesni ir įvairesnių formų yra išsidėstę grūdelių ribose ir tam tikrose vietose sukuria nepertraukiamą tinklelį. Tai chromo karbidai ($Cr_{23}C_6$).



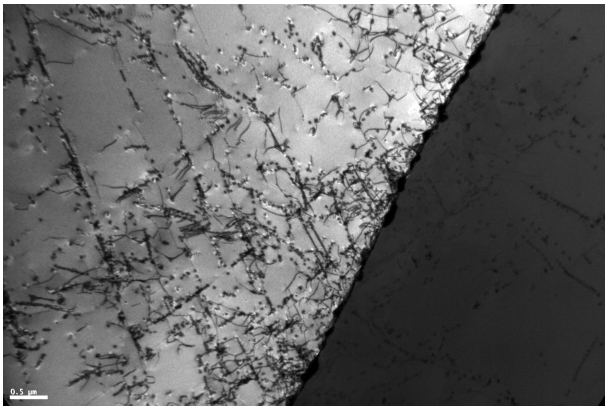
61 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 15 000 kartų



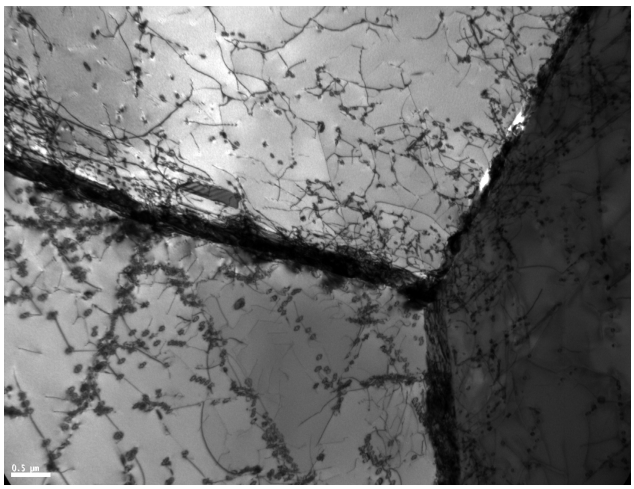
62 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 15 000 kartų



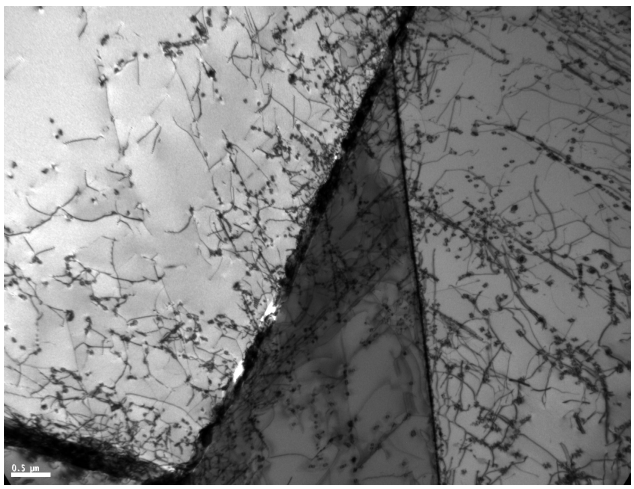
63 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 25 000 kartų



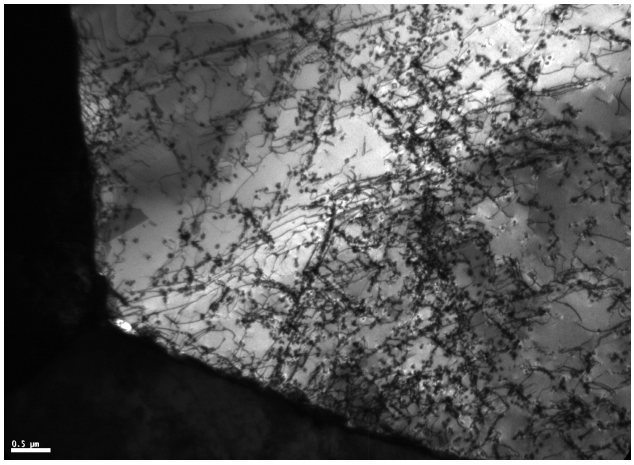
64 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 25 000 kartų



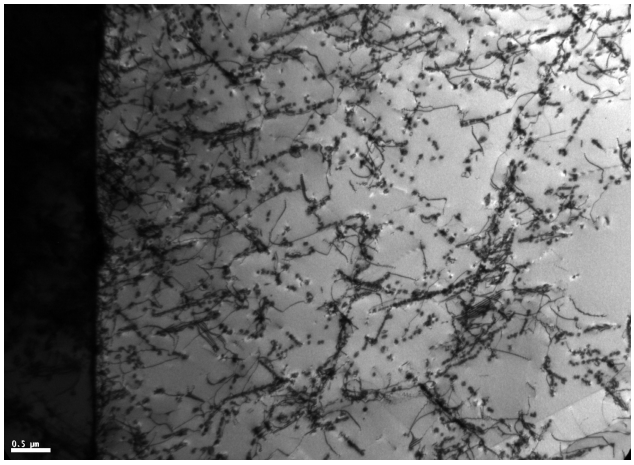
65 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 25 000 kartų



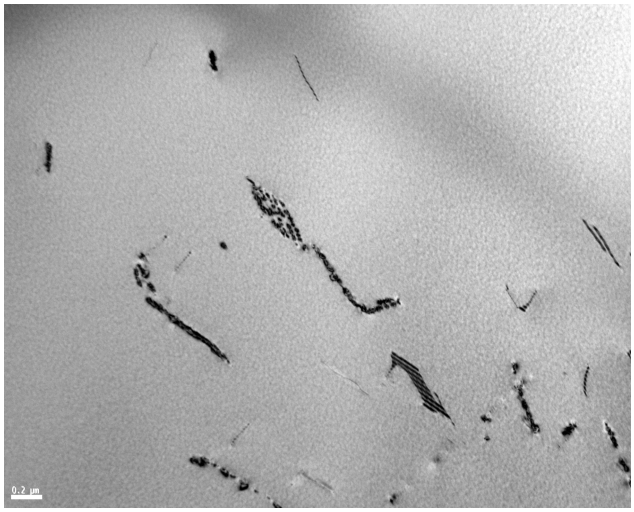
66 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 25 000 kartų



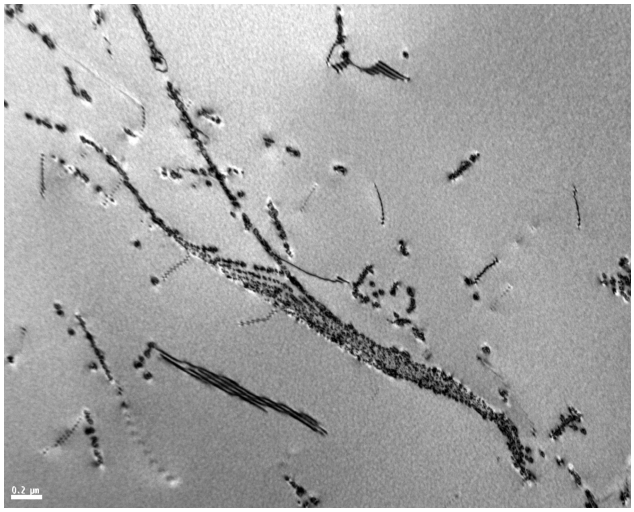
67 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 25 000 kartų



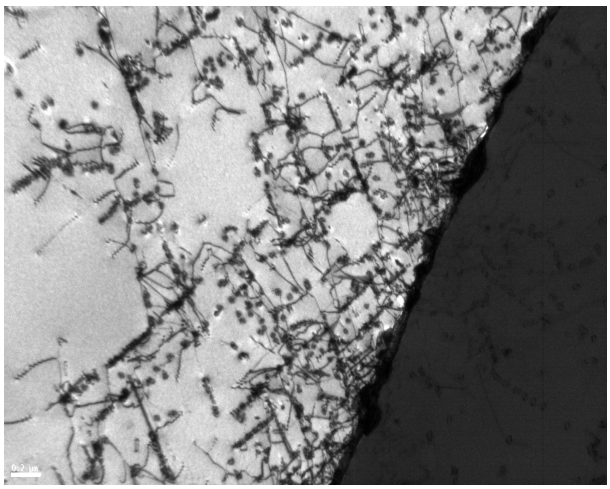
68 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 25 000 kartų



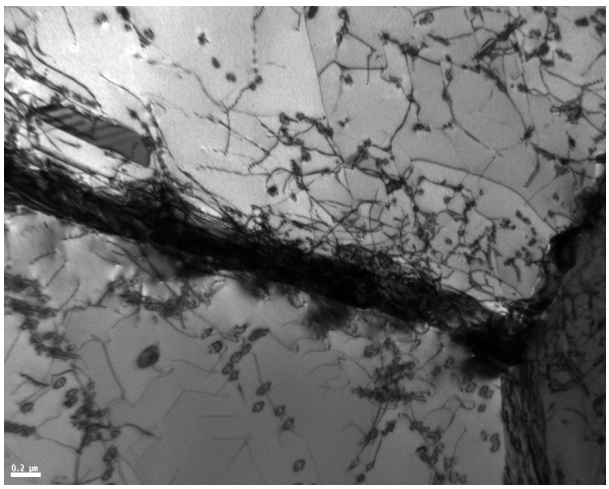
69 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 50 000 kartų



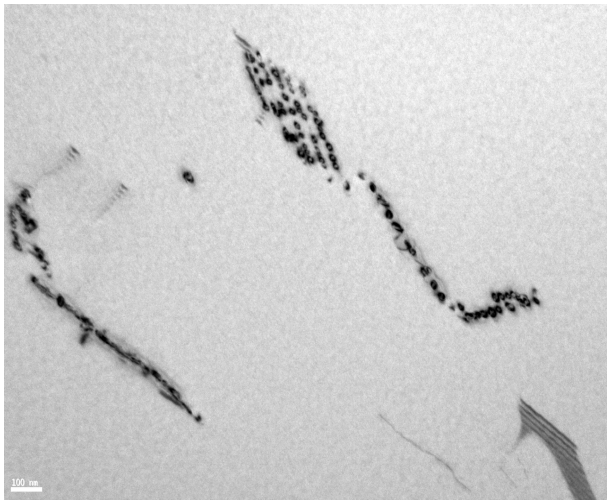
70 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 50 000 kartų



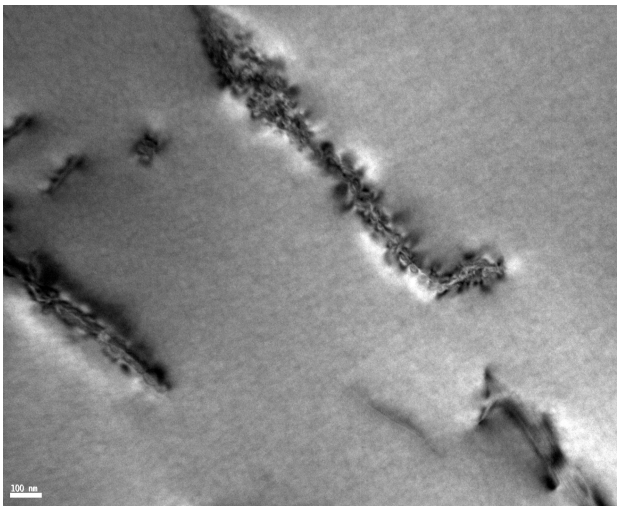
71 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 50 000 kartų



72 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 50 000 kartų



73 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 100 000 kartų



74 pav. Seno vamzdžio struktūra padidinta 100 000 kartų

Iš gautų mikrostruktūrų matome tipišką užterštos struktūros medžiagą, dirbusią ilgą laiką aukštoje temperatūroje. Puikiai išsiskiria: dislokacijų linijos; įvairių priemaišų ir karbidų išsidėstymas grūdų ribose; chaotiškai išsibarstę chromo karbidai; tarpgrūdeliniai mikronevientisumai. Agresyvi aplinka ir aukšta temperatūra per ilgą eksploatacijos laiką iššaukia struktūros pasikeitimus: auga grūdeliai, chromo karbidai difunduoja į grūdelių pakraščius, jungiasi į karbidų kolonijas, smulkių, dispersiškų karbidų grūdeliuose beveik nebelieka.

Korozinis plieno atsparumas priklauso nuo struktūros fazinio, struktūrinio ir cheminio vienodumo, nes visi šie veiksniai lemia metalo paviršiaus elektrocheminio potencialo tolygumą. Dėl visa tai chromo karbidų ir kitokių junginių susidarymas blogina korozinį plieno atsparumą. Ilgą laiką eksplotuojamame aukštoje temperatūroje pliene iš kietojo austenito tirpalo ant grūdelių ribų matome išsiskyrusius chromo karbidus, nes aukštoje temperatūroje (apie 500 °C) vyksta atomų

difuzija. Grūdelių sandaroje susidarius karbidinei fazei, atsiranda zonos, turinčios skirtingą elektrocheminį potencialą. Esant agresyviai elektrolitinei terpei, tarp skirtingo elektrinio potencialo fazių prasideda elektrocheminė korozija. Susidarę chromo karbidai, chromas iš paviršinių grūdelio zonų pereina į karbidus. Kietajame tirpale sumažėjus chromo kiekiui iki 10 – 12 %, šis tirpalas netenka korozinio atsparumo. Išsiskyrę grūdelių paviršiuje chromo karbidai sukelia lokaliuosius įtempius, taip pat mažinančius korozinį kietojo tirpalo atsparumą. Chromo karbidai išsiskiria tik pliene, ilgą laiką veikiamame aukštos temperatūros. Suvirinimo metu terminio poveikio zonos vietose metalas įkaista iki temperatūros, kurioje iš kietojo tirpalo taip pat išsiskiria karbidai. Naudojant suvirintą gaminį, tokiose vietose plinta tarpkristalinė korozija. Ji vyksta ir tose gaminio ar siūlės vietose, kurios suvirinimo metu pakartotinai įkaitinamos, kaip senasis vamzdis. Titanas yra stabilizuojantis elementas, turi didesnį gimiringumą angliai, todėl su anglimi dažniausiai sudaro patvarius TiC karbidus. Mes matome, kad titanas sudaro ne tik karbidus, bet ir nitridus.

Susidarę karbidai išsidėsto grūdelių paribiuose, ant pačių grūdelių, šalia dislokacijų. Šios fazės lengviausiai išsiskiria ant grūdelių ribų, nes čia reikalinga nedidelė aktyvacijos energija. Taip pat karbidai silpnina grūdelių tarp atominius ryšius, dėl to įtrūkims plisti ir medžiagai suirti yra sudaromos visos sąlygos.

Apibendrinant bandymo rezultatus galima teigti, kad seno vamzdžio medžiaga parodė tipišką užterštos medžiagos struktūrą, eksplotuotos ilgą laiką aukštoje temperatūroje. Karbidų kolonijos, išsidėstymas tinkleliu, atskleidė tikslią įtrūkių atsiradimo priežastį. Palei grūdų ribas, matomi nepertraukiamu tinkleliu išsidėstę karbidai, kurie sukėlė tarpkristalinę koroziją austenitiniame nerūdijančiame pliene, o iš to išsivystė apskritiminiai įtrūkiai, statmeni vamzdžio ašiai. Nors stebėti bandiniai ir neparodė didesnių mikro tuštumų ar mikroįtrūkimų, tačiau tai nereiškia, kad jie negali išsiskirti senojo vamzdžio medžiagoje.

4.9 Skaičiavimai baigtinių elementų metodu

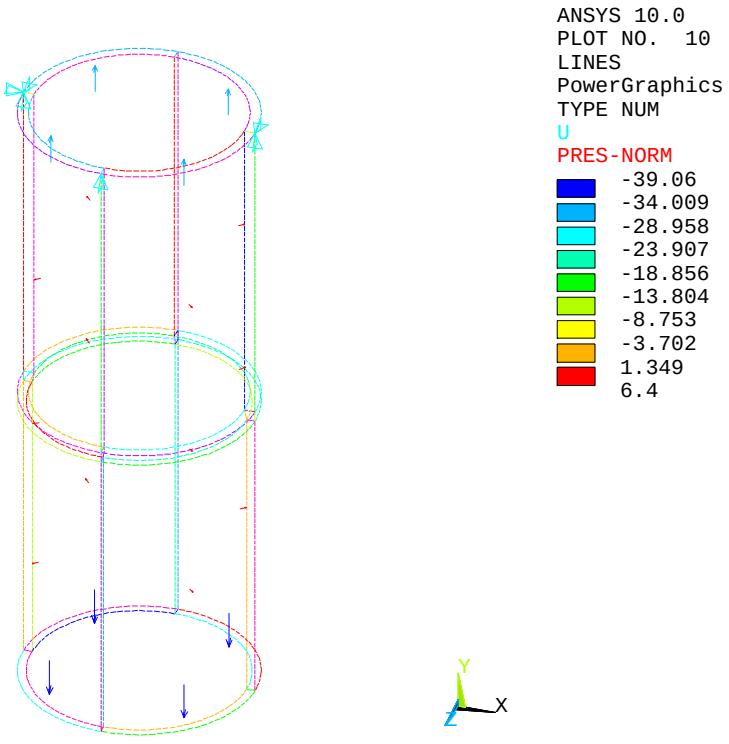
Siekiant nustatyti maksimalius įtempimus vidiniuose vamzdžių paviršiuose veikiant darbiniui slėgiui, buvo pasitelkti matematiniai skaičiavimai baigtinių elementų metodu.

Kadangi suvirinti vamzdžiai yra skirtingų sienelės storių, todėl įtrūkių atsiradimui galėjo turėti įtakos ir geometrinis vamzdžių nesutapimas (priklausyti nuo vamzdžio geometrijos). Kad patvirtinti arba paneigti šias prielaidas, atliksime geometrinių sujungimų skaičiavimus remiantis baigtinių elementų metodu. Atliksime tokias skaičiavimo užduotis:

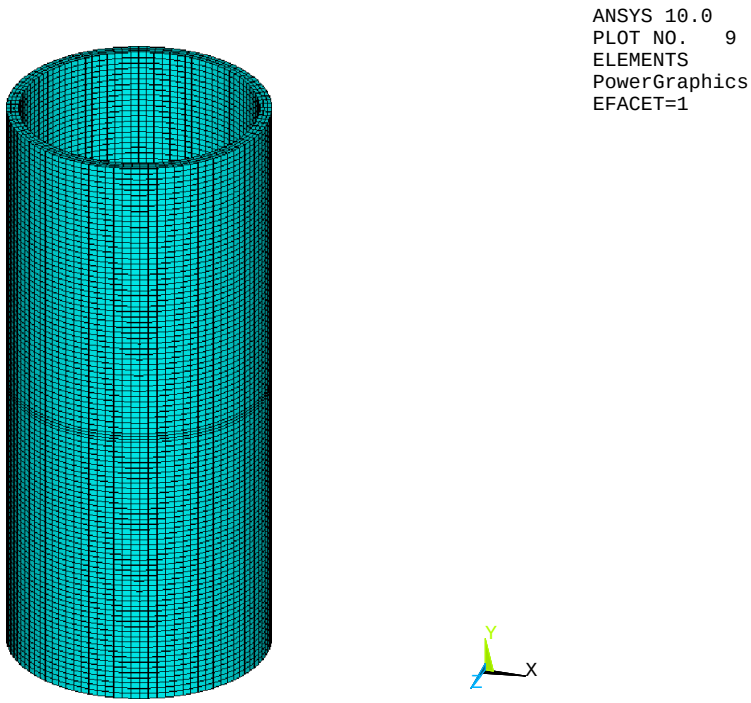
1. Tiesus vamzdžių sujungimas su storio perėjimu nuo 8 iki 10 mm.
2. Skaičiavimų priimtos prielaidos – tiesus sujungimas ir sklandus perėjimas nuo 8mm iki 10 mm sienelių storio.

Skaičiavimai atlikti tiesaus segmento vamzdžių sujungimo, su storio perėjimu nuo 8 mm iki 10 mm, ir 300 mm ilgio vamzdžių i abi puses nuo suvirinimo siūlės. Imamas sklandus perėjimas nuo 10 iki 8 mm, perėjimo ilgis yra 10 mm. Siūlės rumbelė arba išgaubtumas, skaičiavimuose neįvertinamas.

Pagrindinės apkrovos dydis, tai yra darbinis slėgis 6,4 MPa. Ekvivalentus slėgis buvo eksplotuojant šiuos vamzdžius darbiniame režime. Šis slėgis veikia vidinius vamzdžių medžiagos paviršius. Užsiduoti tariami apribojimai yra: kietas standus įtvirtinimas, todėl reakcija tam yra lygi nuliui. Į ekplotuojamos terpės svorį taip pat neatsižvelgiama. Sekančiuose paveikslėliuose pavaizduotas goemetrinis modelis, su apkrovomis ir apribojimais, ir padalijimas į baigtinius elementus.

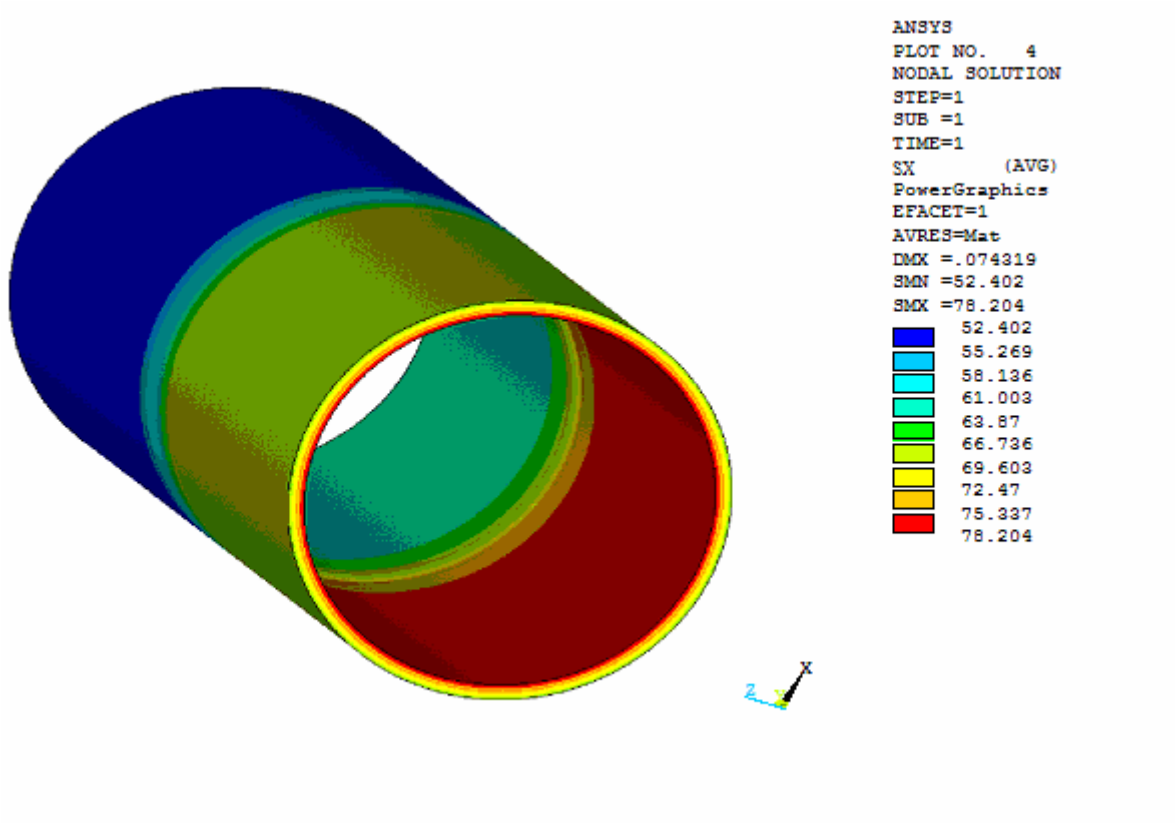


75 pav. Geometrinis modelis su apkrovomis ir apribojimais

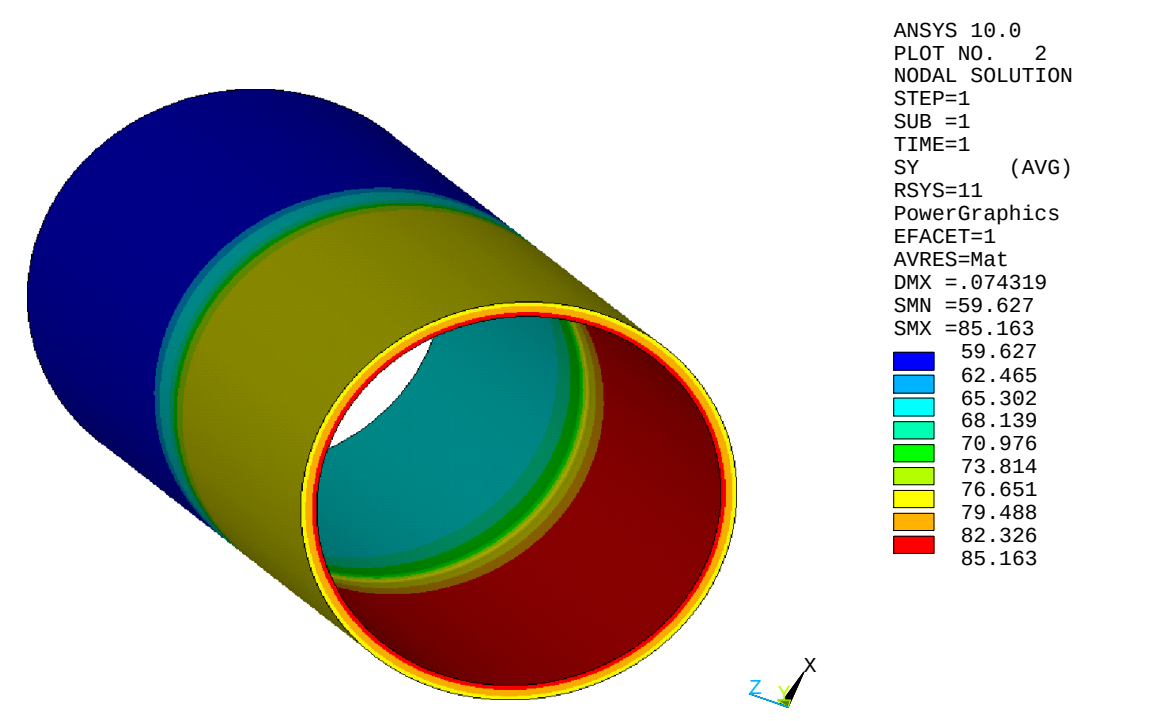


76 pav. Geometrinio modelio padalijimas į baigtinius elementus

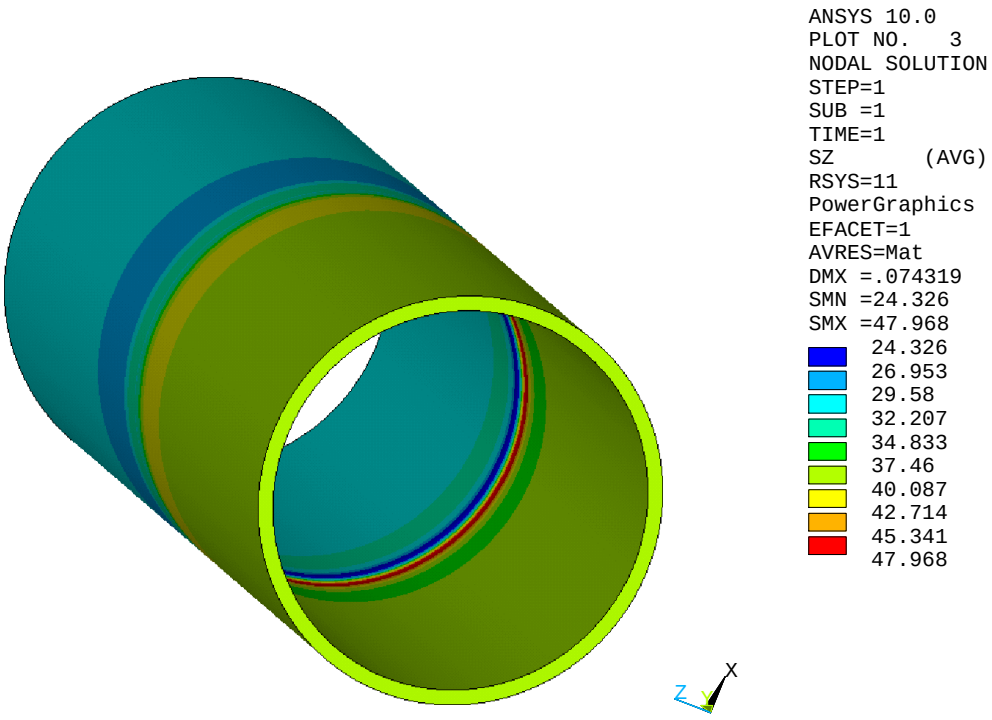
Atlikus skaičiavimus, įtempių reikšmių pagal X ašį buvo nustatyta 78 MPa maksimalūs įtempiai (78 pav.). Gauti maksimalūs 85 MPa apskritiminiai įtempiai pagal Y ašį (79 pav.). Išilginių įtempių (80 pav.) gauta maksimali 48 MPa reikšmė, yra du kartus mažesni negu apskritiminiai įtempimai. Taip pat nėra pastebimas neigiamas poveikis dėl skirtingų vamzdžių sienelių storių. Perėjime nuo 8 mm iki 10 mm didžiausi užfiksuoti 82 MPa veikiant apskritininiams įtempiams. Šios gautos įtempių reikšmės rodo, kad vamzdžių geometrinis nesutapimas neturėjo, arba tik labai nežymią įtaką, įtrūkių atsiradimui, nes plieno stipruminės charakteristikos yra žymiai didesnės. Tai tik apytikslis įtempių skaičiavimas, kadangi neėvertinama eilė faktorių, kurie veikia vamzdį eksploatuojant realybėje. Didžiausi veikiantys vamzdį įtempiai yra apskritiminiai įtempiai. Besiformuojantiems dėl kristalinės korozijos mokroįtrūkimams tarp grūdelių ribų, plisti ir jungtis su kitais yra lengviau didžiausių įtempimų kryptimi.



77 pav. Įtempiai pagal X ašį



78 pav. Apskritiminiai įtempiai



79 pav. Išilginiai įtempiai

APIBENDRINIMAS

Tyrime buvo nustatyta, kad įtrūkiai susidarė dėl tarpkristalinės plieno korozijos. Mechaninių savybių rezultatai atitiko reglamentuojamus standartuose ir tik iš mikrostruktūrų tolimesnio tyrimo įrodėme tarpkristalinės korozijos pasireiškimą austenitiniame pliene. Agresyvi aplinka ir aukšta temperatūra per ilgą eksploatacijos laiką iššaukė struktūros pasikeitimus: augo grūdeliai, chromo karbidai difundavo į grūdelių pakraščius, jungėsi į dideles karbidų kolonijas, kol smulkių, dispersiškų karbidų grūdeliuose beveik nebeliko, formavo mikroįtrūkimus, ko pasekoje silpnėjo tarpatominiai ryšiai ir atsirado įtrūkiai. Kietajame austenito tirpale sumažėjus chromo kiekiui iki 10-12%, šis plienas netenka korozinio atsparumo. Išsiskyrę grūdelių paviršiuje chromo karbidai sukelia liekamuosius įtempius, mažinančius korozinį atsparumą. Šie karbidai išsiskiria tik pliene, ilgą laiką veikiamame aukštos 500-700 °C ir agresyvios terpės. Slėgis taip pat padidina įtempius medžiagoje, dėl ko lengviau tampa įtrūkiams susidaryti ir staiga išplisti per visą vamzdžio storį. Nagrinėjamu atveju medžiagos eksploatavimo temperatūra buvo 450 °C ir tai neturėjo įtakoti tarpkristalinės korozijos susidarymo. Iš to galima daryti išvadą, kad eksploatavimo metu buvo nusižengta šiam temperatūrinam režimui. Kaip buvo minėta, nuo 500 °C atsiranda galimybė sparčiai vystytis tarpkristalinei korozijai. Tai atsiliepė vamzdžio eksploatacijos minimaliam 100000 valandų projektiniam ilgaamžiškumui. Buvo išdirbta tik 90000 valandų. Kad išvengti ateityje panašių problemų, brangaus vamzdynų remonto, padidinti tarnavimo laiką, reikalinga įdiegti sienelių temperatūros matavimo prietaisus. Tokie prietaisai gali būti termoporos, fiksuojančios temperatūras. Rekomenduojama įdiegti šiuos prietaisus tiems nerūdijantiems austenitinės klasės vamzdynams, kurių darbinė temperatūra artima 500 °C. Taip bus išvengta sienelių perkaitinimo ir tuo pačiu pavojingos tarpkristalinės korozijos.

IŠVADOS

1. Bandymo skvarbiaisiais dažalais metu buvo nustatyta tiksli įtrūkių susidarymo vieta - terminio poveikio zona ir forma – apskritiminiai, statmeni vamzdžio ašiai.

2. Atlikus cheminės sudėties tyrimus nustatyta, kad abiejų austenitinės klasės vamzdžių, pagamintų iš X8CrNiTi18-10 plieno, cheminė elementų sudėtis atitinka medžiagų standartus.

3. Tempimo bandymas parodė didelį mechaninių savybių skirtumą tarp senojo ir naujojo vamzdžio medžiagos: seno vamzdžio $R_{p0,2}$=254 MPa R_m=566 MPa, naujo vamzdžio $R_{p0,2}$=460 MPa R_m=655 MPa. Stipruminių savybių sumažėjimas rodo ilgai eksploatuotos medžiagos degradaciją. Tačiau gautos vertės nebuvo mažesnės negu reglamentuoja standartas.

4. Smūginio tąsumo bandymo rezultatai parodė aukštas vertes, gautas matuojant kambario temperatūroje: seno vamzdžio KV=175 J/m^2 ir naujo KV=145 J/m^2. Standarte GOST 5632-61 nurodyta ne mažiau 128 J/m^2. Bandinio pagaminto iš metalo ne toli įtrūkių susidarymo vietos gautas smūginis tąsumas KV=111 J/m^2 yra mažesnis už standarte nurodytas vertes.

5. Standarte EN 10216-5:2004 nurodytas praktikoje gautas takumo ribos ($R_{p0,2}$), santykinio pailgėjimo (A_5) ir reikalingos bandiniui suardyti energijos (KV), smūginio tąsumo bandymo metu, minimalias reikšmes, tenkina seno vamzdžio X8CrNiTi18-10 plienas, kurias turi atitikti išdirbęs 100 000 valandų, prie 450 °C temperatūros. Bandinio, padaryto iš metalo, esančio šalia įtrūkio vietos, reikalingos bandiniui suardyti energijos KV, smūginio tąsumo bandymo metu, reikšmė KV=89 J yra mažesnė, negu standarte nurodyta KV=100 J. Gautas reikalingos suardymo energijos KV neatitikimas minimalioms reikšmėms, parodė, jog austenitiniame pliene vystėsi tarpkristalinė korozija.

6. Pagrindinės medžiagos ir terminio poveikio kietumo rezultatai neviršija nurodytų verčių standarte. Todėl įtrūkiai negalėjo susidaryti dėl metalo plastiškumo sumažėjimo ir trapumo padidėjimo.

7. Tiriant optiniu mikroskopu gautos mikrostruktūros parodė tipišką austenitinę struktūrą. Nustatyta, kad grūdai senoje medžiagoje yra 40 % didesni, negu naujo vamzdžio.

8. Skanuojančiosios mikroskopijos būdu gautas legiruojančių elementų pasiskirstymas vidiniuose ir išoriniuose vamzdžių paviršiuose įrodė cheminį vienodumą. Atlikta intarpų

analize nustatėme titano nitridus (TiN) ir sulfidus abiejuose vamzdžiuose. Įtrūkio paviršiaus tyrimas parodė tarpkristalinės korozijos paveiktas metalo grūdų ribas. Tai įrodė, kad įtrūkių priežastis senajame vamzdyje – tarpkristalinė korozija.

9. Mikrostruktūrų tyrimai skanuojančiu elektroniniu mokroskopu nustatyti: chromo karbidai ($Cr_{23}C_6$), išsiskyrę grūdelių ribose (ypač jų sandūroje), dislokacijų linijos, mikroįtrūkimų formavimasis, titano nitridai, karbidai ir kiti metaliniai junginiai. Kokybinis plieno struktūros tyrimas parodė tipišką, ilgai eksploatuotos aukštoje temperatūroje ir agresyvijoe terpėje, medžiagos struktūrą.

10. Atlikti matematiniai skaičiavimai baigtinių elementų metodu įrodė, kad geometrinis vamzdžių nesutapimas neturėjo jokios įtakos įtrūkių atsiradimui. Gauti maksimalūs apskritiminiai įtempiai, iš dalies gali apaiškinti, kodėl senajame vamzdyje įtrūkiai atsirado statmenai vamzdžio ašies.

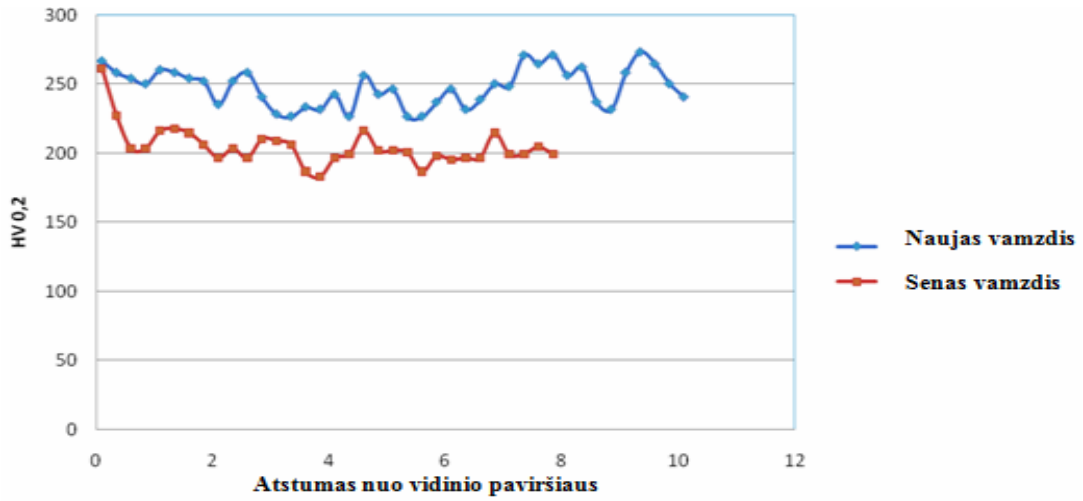
11. Vamzdis neišdirbęs savo minimalaus projektinio laiko tapo nebetinkamas eksploatuoti. Tarpkristalinė korozija vamzdžiui dirbant 440 °C temperatūroje neturėjo intensyviai vystytis ir nutraukti tolimesnę vamzdyno eksploataciją. Tai rodo, kad buvo nusižengta technologiniam – temperatūriniam eksploatacijos režimui ir peržengta 500 °C temperatūra, kuomet intensyviau pradeda išsiskirti chromo karbidai kietajame austenito tirpale ir vystosi tarpkristalinė korozija. Tam kad išvengti šių brangiai kainuojančių klaidų, privaloma sumontuoti temperatūrų matavimo daviklius, kurie neleistų perkaisti vamzdžio sienelėms, taip padidinant eksploatacijos ilgaamiškumą ir patikimumą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Valiulis, A. V. 2007. Legiruotieji plienai ir jų suvirinimas. Vilnius: Technika.
2. Kulikauskas, L. 1997. Medžiagotyra. Konstrukcinės medžiagos. Vilnius: Technika,
3. Valiulis, A. V. 1995. Specialių plienų ir lydinių struktūros ir suvirinimo tyrimai. Vilnius: Technika.
4. Naujokaitis, A. 2005. Medžiagų mokslas. Vilnius: Technika.
5. Mickevičius, D. 1999. Cheminės analizės metaodai 1. Vilnius: Technika.
6. Mickevičius, D. 1999. Cheminės analizės metaodai 2. Vilnius: Technika.
7. ASM Handbook. Metallography and struktures. Volume 9
8. Corosion Phototographs. Available from Internet: <www.hghouston.com/x/5.html
9. Metals handbook. Vol. 7. Atlas of microstructures
10. Metals handbook. Vol. 9. Fractography and atlas of fractographs
11. Journal of materials research. 2007. Volume 22. Number 5
12. Journal of materials research. 2008. Volume 23. Number 1
13. Journal of materials research. 2007. Volume 22. Number 12
14. Journal of materials research. 2009. Volume 24. Number 3

1. PRIEDAS

Mikrokietumas išilgai vamzdžio storio nustatytas Vikerso metodu. Mikrokietumo bandymas atliktas naudojant „ZHV 10" testerį, įspaudžiant 200 g jėgą. Bandymai atlikti pagal LST EN 1043-2:1998 „Metalinės medžiagos. Virintinių siūlių ardomieji bandymai. Kietumo bandymas. 2-oji dalis. Suvirintų sujungimų mikrokietumo bandymas", LST EN ISO 6507-1:2006 „Metalai. Vikerso kiečio nustatymas. Bandymo metodas".



Seno vamzdžio mikrokietumo $HV_{0,2}$, matvimo taškuose, reikšmės.

Nr	HV 0.2
1	261.5
2	227.2
3	203.4
4	203.4
5	216.3
6	217.8
7	214.8
8	206.1
9	196.6
10	203.4
11	196.6
12	210.4
13	209.0
14	206.2
15	186.6
16	183.0
17	196.6
18	199.3
19	216.3
20	201.9
21	202.0
22	200.7
23	186.6

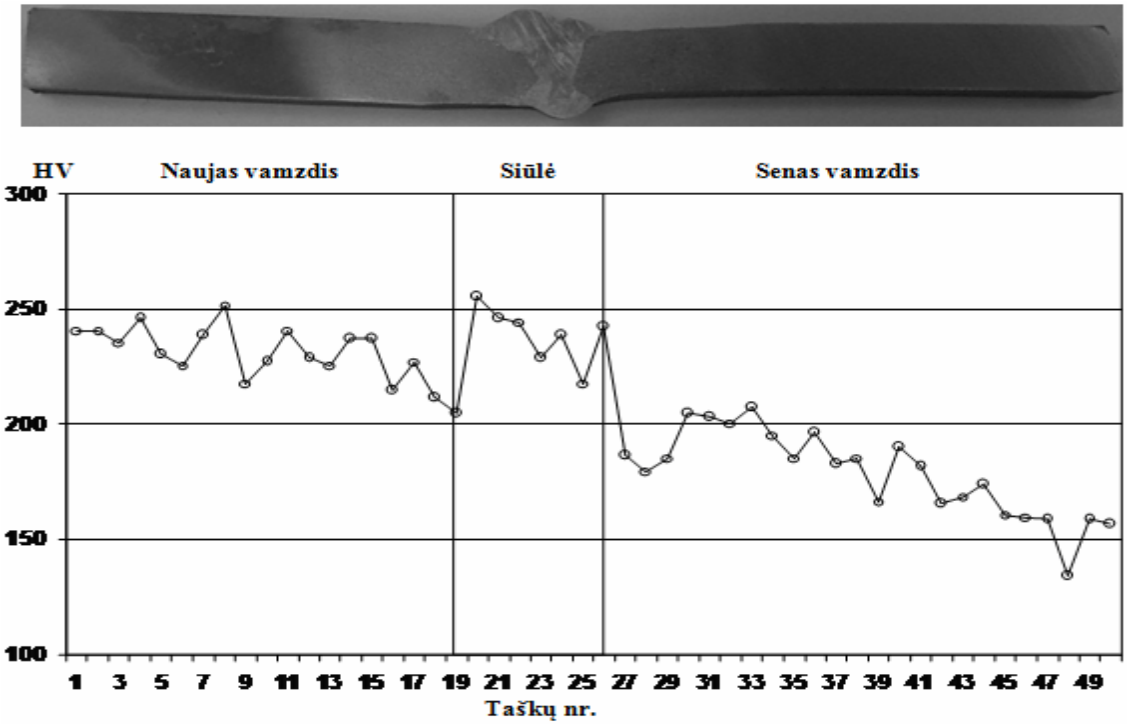
Nr	HV 0.2
1	261.5
24	198.0
25	195.4
26	196.7
27	196.7
28	214.8
29	199.3
30	199.3
31	204.7
32	199.3

Naujo vamzdžio mikrokietumo $HV_{0,2}$, matvimo taškuose, reikšmės.

Nr	HV 0.2
1	266.9
2	258.4
3	254.3
4	250.3
5	260.5
6	258.5
7	254.3
8	252.3
9	235.3
10	252.3
11	258.5
12	240.7
13	228.3
14	226.6
15	233.5
16	231.7
17	242.6
18	226.5
19	256.4
20	242.7
21	246.4
22	226.5
23	226.6
24	237.0
25	246.4
26	231.7
27	238.9
28	250.3
29	248.4
30	271.2
31	264.8
32	271.3
33	256.4
34	262.5
35	237.0
36	231.7
37	258.4
38	273.5
39	264.8
40	250.4
41	240.7

2. PRIEDAS

Mikrokietumas išilgai vamzdžio ašies nustatytas Vikerso metodu. Mikrokietumo bandymas atliktas naudojant „ZHV 10" testerį, įspaudžiant 200 g jėgą. Bandymai atlikti pagal LST EN 1043-2:1998 „Metalinės medžiagos. Virintinių siūlių ardomieji bandymai. Kietumo bandymas. 2-oji dalis. Suvirintų sujungimų mikrokietumo bandymas", LST EN ISO 6507-1:2006 „Metalai. Vikerso kiečio nustatymas. Bandymo metodas".



Vamzdžių mikrokietumo $HV_{0,2}$, matvimo taškuose, reikšmės.

Nr	HV 0.2
1	240.8
2	240.8
3	235.6
4	246.2
5	230.5
6	225.6
7	239.1
8	251.8
9	217.8
10	227.3
11	240.8
12	228.9
13	225.7
14	237.3

Nr	HV 0.2
1	240.8
2	240.8
15	237.4
16	214.8
17	227.2
18	211.9
19	204.8
20	255.7
21	246.2
22	244.4
23	228.9
24	239.1
25	217.8
26	242.6
27	186.6
28	179.6
29	185.4
30	204.8
31	203.4
32	200.6
33	207.6
34	195.3
35	185.4
36	196.6
37	183.1
38	185.4
39	166.6
40	190.3
41	181.9
42	165.6
43	168.7
44	174.0
45	160.7
46	159.7
47	158.8
48	134.5
49	158.8
50	156.9