VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Vigantas KUMŠLYTIS

TERMINIO APDOROJIMO POVEIKIS CHROMO-MOLIBDENO PLIENŲ SUVIRINTŲJŲ JUNGČIŲ MECHANINĖMS SAVYBĖMS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (09T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2009

Disertacija rengta 2005–2009 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Algirdas Vaclovas VALIULIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

http://leidykla.vgtu.lt
VGTU leidyklos TECHNIKA 1679-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-506-9

© Kumšlytis, V., 2009
© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2009
Vigantas.Kumslytis@orlenlietuva.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Vigantas KUMŠLYTIS

EFFECT OF POST-WELD HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CHROME-MOLYBDENUM STEEL WELDED JOINTS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (09T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2009

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2005–2009.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Algirdas Vaclovas VALIULIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama terminio apdorojimo parametrų įtaka chromo-molibdeno (5 % Cr–0,5 % Mo) grupės plienų suvirintųjų jungčių mechaninėms savybėms. Pagrindiniai tyrimo objektai yra termiškai apdorotos chromo-molibdeno plieno suvirintosios jungtys ir ilgą laiką aukštoje temperatūroje eksploatuoti vamzdyno elementai, kuriuose pastebėta mechaninių charakteristikų degradacija. Šių objektų detalūs tyrimai bei gautų rezultatų analizė leidžia parinkti tinkamiausius tiriamo plieno suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo parametrus. Pagrindinis disertacijos tikslas yra ištirti legiruoto plieno mechaninių savybių degradacijos priežastis eksploatacijos bei įrenginių gamybos metu ir sukurti metodiką, skirtą chromo-molibdeno plienų suvirintųjų jungčių optimaliems terminio apdorojimo parametrams nustatyti. Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plienų suvirintųjų jungčių mechaninių charakteristikų ir terminio apdorojimo parametrų tarpusavio priklausomybės nustatymas, optimalios temperatūros ir laiko parametro reikšmės nustatymas, taip pat tiriamo plieno mechaninių charakteristikų pokyčių, degradacijos priežasčių nustatymas. Pirmasis uždavinys suformuluotas atsižvelgiant į tai, kad įrenginiai iš šių plienų yra labai brangūs ir pavojingi, o gaminant juos gali būti pasirinkti mažinantys eksploatacijos laiką suvirinimo ir terminio apdorojimo parametrai. Atlikta literatūros analizė parodė, kad iki šiol nebuvo tirti šių plienų grupės mechaninių charakteristikų pokyčiai, naudojant labai intensyvų lokalinį suvirintųjų jungčių terminį apdorojimą, koks dažnai naudojamas gaminant įrenginius. Antrasis uždavinys susijęs su plieno mikrostruktūros tyrimais. Atliekant šiuos tyrimus nustatytos ilgą laiką eksploatuoto plieno degradacijos ir naujų jungčių mechaninių savybių pokyčių priežastys.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir rezultatų apibendrinimas. Įvade nagrinėjamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas, pristatomi autoriaus pranešimai ir publikacijos, disertacijos struktūra. Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame apžvelgti darbai, kuriuose nagrinėjami chromo-molibdeno plieno panaudojimo pramonėje ypatumai, šių plienų suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo bei ilgalaikės eksploatacijos problemos. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir konkretizuojami disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje, metodinėje dalyje, pateikta tyrimų metodika. Aprašyta bandymo metodų esmė, taikymas, eksperimentų atlikimas bei rezultatų apdorojimo metodai. Trečiajame skyriuje, eksperimentinėje dalyje, aprašyta eksperimentų atlikimo eiga, gauti rezultatai ir jų analizė. Pateikti ginamųjų teiginių įrodymai.

Disertacijos tema perskaityti 6 pranešimai Lietuvos bei kitų šalių konferencijose ir paskelbti 7 straipsniai.

Abstract

The dissertation analyses the impact of heat treatment parameters on the mechanical properties of chrome-molybdenum (5% Cr–0,5% Mo) steel welded joints. The key objects of research are heat-treated chrome-molybdenum steel welded joints and piping elements operated at high temperature for an extensive period of time, where degradation of mechanical properties has been observed. Detailed analysis of these objects allow selecting the most appropriate heat treatment parameters for the investigated steel welded joints. The main objective of the thesis is to investigate the causes of degradation of alloy steel mechanical properties during operation and fabrication of the equipment, and to develop a methodology for identification of optimum heat treatment parameters for chrome-molybdenum steel welded joints. A few key issues are addressed in the thesis: identification of dependence of chrome-molybdenum (5% Cr–0,5% Mo) steel welded joint mechanical properties on heat treatment parameters, identification of the optimum value of temperature/time parameter, and identification of causes of the investigated steel mechanical property changes and degradation. The first objective was formulated considering the fact that the equipment made of those steels are very expensive and hazardous, whereas welding and heat treatment parameters reducing the service life may be chosen during their fabrication. The performed reference literature analysis revealed that mechanical property changes of these steels, using very intensive local heat treatment of welded joints, which is frequently used while fabricating the equipment, has not been yet investigated. The second objective is related to steel microstructure testing. Upon the performance of this testing it is possible to identify the causes of steel, operated for an extensive period of time, degradation as well as causes of new welded joint mechanical property changes.

The dissertation consists of the introduction, three chapters and general conclusion. The introduction analyses the topicality of the issue, formulates the objective and tasks of the thesis, describes the scientific novelty of the thesis, and introduces author's presentations and publications, and structure of the dissertation. The first chapter covers the literature reference review. The chapter provides the review of works analyzing the peculiarities of industrial appliance of chrome-molybdenum steels, the issues of heat treatment and long-term service of welded joints of those steels. The second chapter, the methodology section, describes the research methodology. The essence of testing methods, their application, testing performance and the methods of result processing are described in this chapter. The third chapter, the experimental section, describes the experiment performance sequence, the results obtained and their review. Arguments for the defended statements are presented.

6 presentations were made at the conferences in Lithuania and other countries and 7 articles published on the topic of the dissertation.

Simboliai ir santrumpos

P – terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parametras;
LMP – Larsono–Millerio parametras;
R_m – stiprumo ribos įtempiai, N/mm^2;
R_e – takumo ribos įtempiai, N/mm^2;
$R_{p0,2}$ – sąlyginės takumo ribos įtempiai, N/mm^2;
A_5 – santykinis pailgėjimas tempiant, %;
KCV – smūginis tąsumas, v formos įpjova, J/cm^2;
$KCVWT$ – suvirinimo siūlės smūginis tąsumas, J/cm^2;
$KCVHT$ – terminio poveikio srities smūginis tąsumas, J/cm^2;
TPS – terminio poveikio sritis;
PWHT – suvirintųjų jungčių terminis apdorojimas *(post-weld heat treatment)*;
LST – Lietuvos standartas;
EN – Europos standartas;
EDS – energijos dispersijos spektrometras.

Turinys

ĮVADAS 1
Problemos formulavimas 1
Darbo aktualumas 2
Tyrimų objektas 3
Darbo tikslas 3
Darbo uždaviniai 3
Tyrimų metodika 4
Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė 4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė 4
Ginamieji teiginiai 5
Darbo rezultatų aprobavimas 5
Disertacijos struktūra 6

1. CHROMO-MOLIBDENO PLIENŲ SUVIRINTŲJŲ JUNGČIŲ EKSPLOATACIJOS PROBLEMOS 7
1.1. Karštyje patvarūs plienai energetikos ir naftos chemijos pramonėje 7
1.1.1. Chromo-molibdeno plienai 8
1.1.2. Mechaninių savybių degradacijos priežastys 12
1.2. Suvirintųjų jungčių liekamieji įtempiai 14
1.2.1. Vidinių liekamųjų įtempių sumažinimo metodai 16
1.2.2. Chromo-molibdeno plieno suvirintųjų jungčių terminis apdorojimas 17
1.3. Norminių dokumentų rekomendacijos dėl chromo-molibdeno plienų terminio apdorojimo 23
1.4. Temperatūros ir laiko parametro taikymas suvirintųjų jungčių mechaninių savybių nustatymui 25
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas 30

2. TYRIMŲ METODIKA 31
2.1. Bandinių paruošimas tyrimams 31
2.2. Tyrimų ir analizės apimtis 34
2.2.1. Radiografinė kontrolė 34
2.2.2. Kietumo tyrimas 34
2.2.3. Tempimo bandymas 35
2.2.4. Smūginio tąsumo bandymas 36
2.2.5. Tempimo ir smūgio bandymų lūžių analizė, fraktografija 37
2.2.6. Mikrostruktūros tyrimai 41
2.2.7. Lyginamoji analizė ir skaičiavimo metodų taikymas 41
2.3. Antrojo skyriaus išvados 43

3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ 45
3.1. Chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių mechaninės savybės 45
3.1.1. Kietumo bandymų rezultatai 45
3.1.2. Tempimo bandymų rezultatai 47
3.1.3. Smūginio tąsumo bandymo rezultatai 53
3.2. Mikrostruktūros tyrimas 61
3.3. Suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo kaitinimo spartos apskaičiavimas 77
3.4. Optimalių terminio apdorojimo parametrų, temperatūros ir išlaikymo laiko nustatymas 80
3.5. Trečiojo skyriaus išvados 81

BENDROSIOS IŠVADOS IR APIBENDRINIMAI 83

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI ....

AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA ....

PRIEDAI 91
A priedas. AB „Mažeikių nafta“ suremontuotų riformingo vamzdynų suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo technologija. 91
B priedas. Mechaninių bandymų rezultatai 96

Contents

INTRODUCTION 1
The Investigated Problem 1
Importance of the Thesis 2
The Object of Research 3
The Goal of the Thesis 3
The Tasks of the Thesis 3
Research Methodology 4
Importance of Scientific Novelty 4
Practical Significance of Achieved Results 4
The Defended Statements 5
Approval of the Results 5
Dissertation Structure 6

1. THE EXPLOITATION PROBLEMS OF CHROME-MOLYBDENUM STEEL WELDED JOINTS 7
1.1. Heat Resistant Steels in Energy and Petrochemical Industry 7
1.1.1. Chrome-Molybdenum Steels 8
1.1.2. Causes of Mechanical Properties Degradation 12
1.2. Residual Stresses of Welded Joints 14
1.2.1. Methods of Internal Residual Stress Relieving 16
1.2.2. Post-Weld Heat Treatment of Chrome-Molybdenum Steel 17
1.3. Requirements of Standards for Chrome-Molybdenum Steel Heat Treatment 23
1.4. The Temperature-Time Parameter Application for Welded Joints Mechanical Properties Determination 25
1.5. Conclusions for Chapter 1 and Allocating Tasks for the Dissertation 30

2. RESEARCH METHODOLOGY 31
2.1. Preparation of Specimens for Research....31
2.2. The Scope of Tests....34
2.2.1 Radiographic Inspection....34
2.2.2 Hardness Test....34
2.2.3 Tensile Test....35
2.2.4 Impact Test....36
2.2.5 The Fracture Analysis of Tensile and Impact Tests, Fractography....37
2.2.6 Microstructure Tests....41
2.2.7 Comparative Analysis and Calculation Methods....41
2.3. Conclusions for Chapter....43

3 TEST RESULTS AND THEIR ANALYSIS....45
3.1. Mechanical Properties of Chrome-Molybdenum 5%Cr - 0,5%Mo SteeloWelded Joints....45
3.1.1. Hardness Test Results....45
3.1.2. Tensile Test Results....47
3.1.3. Impact Test Results....53
3.2. Microstructure Test Results....62
3.3 The Calculation of Post-Weld Heat Treatment Heating Rate....77
3.4 The Setting of Optimal Post-Weld Heat Treatment Parameters....80
3.5 Conclusions for Chapter....81

GENERAL CONCLUSIONS....83

REFERENCES....85

LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION....89

ANNEXES....91
Annex A. The Post-Weld Heat Treatment Technology of AB „Mažeikių Nafta" Pipelines....91
Annex B. Mechanical Tests Result....96

Įvadas

Problemos formulavimas

Vieni iš pavojingiausių naftos chemijos pramonės įrenginių pagaminti iš legiruotų chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plienų. Įrenginių eksploatacijos temperatūra yra apie 530 °C, o darbinis slėgis siekia 4 MPa. Įrenginiuose esančios terpės savaiminio užsiliepsnojimo ore temperatūra yra žemesnė už eksploatacijos temperatūrą, todėl būtina imtis visų įmanomų prevencijos priemonių siekiant užtikrinti įrenginio patikimą darbą. Pagrindinė tokių įrenginių avarijų priežastis yra suvirintųjų jungčių plyšiai. Užtikrinti suvirintųjų jungčių patikimumą – viena iš prevencijos priemonių. Įrenginių montavimo norminiuose dokumentuose nurodyti suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo parametrai tiksliai neapibrėžia išlaikymo laiko atleidimo temperatūroje. Standartuose nurodoma minimali ir maksimali atleidimo temperatūra, tačiau nurodomas tik minimali išlaikymo trukmė. Daugelyje mokslo darbų yra įrodyta, kad anglinių plienų ir mažai legiruotų plienų mechaninių savybių reikšmės mažėja labai padidinus terminio apdorojimo temperatūrą arba išlaikymo trukmę. Remontuojant ar rekonstruojant chromo-molibdeno įrenginius terminio apdorojimo išlaikymo trukmė yra sąmoningai pernelyg padidinama siekiant užtikrinti reikalingą metalo kietumo reikšmę, nes kietumo matavimo reikšmė yra pagrindinis terminio apdorojimo įvertinimo kriterijus. Iki šiol nėra gerai ištirta intensyvaus terminio apdorojimo įtaka 5 % Cr–

0,5 % Mo grupės plienų mechaninėms savybėms ir mikrostruktūrai. Todėl kompleksinis šių plienų suvirintųjų jungčių mechaninių savybių bei mikrostruktūros prikausomybės nuo terminio apdorojimo parametrų tyrimas yra viena iš avarijų prevencijos priemonių. Šių tyrimų rezultatas yra optimalių suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo parametrų nustatymo metodika. Disertacijoje nagrinėjami termiškai apdorotų, taikant įvairius režimus, chromo-molibdeno plienų suvirintųjų jungčių ir ilgą laiką eksploatuoto plieno mechaninių savybių bei mikrostruktūros tyrimų rezultatai. Nustatyta, kad, pasirinkus labai intensyvius naujų jungčių terminio apdorojimo parametrus, gaunama nepriimtina metalo mikrostruktūra ir nepriimtinos mechaninės savybės, tokios pat kaip ilgai aukštoje temperatūroje eksploatuoto plieno. Nustatyta mechaninių savybių ir terminio apdorojimo parametrų tarpusavio priklausomybė, šiuolaikiškais mikrostruktūrų tyrimais nustatytos mechaninių savybių pokyčių priežastys. Šių tyrimų pagrindu sudaryta 5 % Cr–0,5 % Mo plienų grupės optimalių terminio apdorojimo parametrų parinkimo metodika.

Darbo aktualumas

Daugelis potencialiai pavojingų naftos chemijos įrenginių yra pagaminti iš chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plieno. Šio plieno suvirinamumas yra ribotas (Valiulis 2007). Po suvirinimo būtina atlikti terminį apdorojimą norint sumažinti įtempius ir išvengti trapių struktūrų susidarymo. Suvirintųjų jungčių terminis apdorojimas turi ir kai kurių neigiamų savybių, tokių kaip stiprumo ar smūginio tąsumo sumažėjimas, dispersinis kai kurių medžiagų kietėjimas, dėl kurio gali atsirasti trapios sritys. Todėl būtina pasirinkti tokius terminio apdorojimo parametrus, kurie užtikrintų optimalias mechaninių savybių reikšmes, taip užtikrinant įrenginio patikimą darbą. Pagrindiniai terminio apdorojimo parametrai yra temperatūra ir išlaikymo laikas. Buvo nustatyta, kad daugeliu atvejų norimą rezultatą galima pasiekti varijuojant šiais dviem parametrais (Orie 2003). Daugelyje tyrimų ilgalaikiam temperatūros ir laiko poveikiui įvertinti yra naudojamas temperatūros ir laiko parametras P arba Larsono–Millerio parametras *LMP,* išreiškiamas temperatūros ir išlaikymo laiko toje temperatūroje funkcija (Upitis 2003). Nustačius šio parametro ir mechaninių savybių tarpusavio priklausomybę, galima pasirinkti optimalų terminio apdorojimo režimą, užtikrinantį geras suvirintųjų jungčių savybes. Ilgalaikė chromo-molibdeno plieno įrenginių eksploatacija aukštoje temperatūroje sukelia plieno savybių degradaciją (Hong 2003). Netinkamai parinktas terminio apdorojimo režimas gali sukelti ankstyvą plieno savybių degradaciją net nepradėjus eksploatuoti įrenginio (Kumšlytis 2008).

Tyrimų objektas

Disertacijos tyrimų objektai:

- suvirintos ir termiškai apdorotos chromo-molibdeno (5 % Cr–0,5 % Mo) grupės plieno vamzdžių jungtys;
- apie 100 000 valandų 530 °C temperatūroje eksploatuoto 15X5M (GOST 20072) plieno vamzdžiai;
- naujas chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plieno vamzdis.

Darbo tikslas

Šio darbo pagrindinis tikslas – nustatyti chromo-molibdeno (5 % Cr–0,5 % Mo) grupės plieno suvirintųjų jungčių mechaninių savybių ir terminio apdorojimo parametrų tarpusavio priklausomybę. Taip pat disertacijoje siekiama:

- sukurti metodiką, skirtą optimaliems terminio apdorojimo parametrams nustatyti;
- ištirti legiruoto plieno mechaninių savybių pokyčių priežastis.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Ištirti chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plieno įvairiais režimais termiškai apdorotų suvirintųjų jungčių mechanines savybes ir mikrostruktūrą.
2. Ištirti ilgą laiką aukštoje temperatūroje ir agresyvioje terpėje eksploatuoto chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plieno mechanines savybes ir mikrostruktūrą.
3. Palyginti ir išanalizuoti mechaninių savybių ir mikrostruktūros tyrimų rezultatus, nustatyti mechaninių savybių pokyčių priežastis.
4. Nustatyti chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plieno mechaninių savybių ir terminio apdorojimo parametrų tarpusavio priklausomybes.
5. Sudaryti optimalių terminio apdorojimo parametrų nustatymo metodiką, pagrįstą tyrimais ir literatūros analize.

Tyrimų metodika

Disertacijoje taikomi analitiniai ir eksperimentiniai tyrimo metodai ir lyginamoji analizė.

Eksperimentų metu buvo tiriamos termiškai apdorotos suvirintosios jungtys, keičiant terminio apdorojimo parametrus. Suvirintosios jungtys, eksploatuotas ir naujas plienas buvo tiriami klasikiniais mechaninių savybių nustatymo metodais. Tyrimams buvo panaudoti šiuolaikiški nuskaitančiosios elektroninės mikroskopijos, rentgeno spindulių difrakcijos, optinės mikroskopijos metodai. Terminio apdorojimo parametrų nustatymo metodika parengta taikant analitinius skaičiavimus ir eksperimentinių tyrimų rezultatų lyginamąją analizę.

Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

Rengiant disertaciją buvo gauti šie inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Nustatytos legiruoto chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plienų suvirintųjų jungčių pirmalaikės mechaninių charakteristikų degradacijos priežastys įrenginių gamybos metu.
2. Sudaryta legiruoto chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plienų suvirintųjų jungčių optimalių terminio apdorojimo parametrų nustatymo metodika.
3. Nustatyta legiruoto chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plienų suvirintųjų jungčių mechaninių savybių ir terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parametro *P* tarpusavio priklausomybės.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Projektuojant karštyje patvarių chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plienų įrenginius reikia atsižvelgti į disertacijoje nustatytą suvirintųjų jungčių mechaninių savybių ir terminio apdorojimo parametro *P* tarpusavio priklausomybę. Žinant terminio apdorojimo parametro *P* reikšmę, galima prognozuoti suvirintųjų jungčių mechanines savybes. Gaminant šiuos įrenginius suvirintųjų jungčių optimalūs terminio apdorojimo parametrai pasirenkami pagal sudarytą nomogramą. Tyrimais nustatyta 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių mechaninių savybių ir terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parametro *P* tarpusavio priklausomybė ir sudaryta terminio apdorojimo optimalių parametrų parinkimo nomograma buvo pritaikyta AB „Mažeikių nafta“

riformingo ir dyzelino hidrovalymo chromo-molibdeno vamzdynų remontui. Pagal eksploatuoto metalo tyrimų rezultatus buvo sudarytas šių vamzdynų apkrovimo grafikas paleidimo metu.

Ginamieji teiginiai

1. Legiruoto chromo molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių optimalių terminio apdorojimo parametrų parinkimo nomograma.
2. Legiruoto chromo molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių mechaninių savybių ir terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parametro *P* tarpusavio priklausomybė.
3. Nuostatos, kad nukrypus nuo chromo-molibdeno plieno suvirintųjų jungčių optimalių terminio apdorojimo parametrų sukeliama pirmalaikė metalo savybių degradacija ir sutrumpinamas įrenginio eksploatacijos laikas.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra paskelbti 7 moksliniai straipsniai: trys periodiniuose mokslo žurnaluose, įtrauktuose į Thomson ISI sąrašą (Kumšlytis 2007, Kumšlytis 2008, Jurčius 2008); du konferencijų medžiagoje, referuotoje ISI duomenų bazėje (Kumšlytis 2008, Jurčius 2008); vienas Tarptautinio suvirinimo instituto (IIW) konferencijos medžiagoje (Kumšlytis 2008); vienas tarptautinės konferencijos medžiagoje (Kumšlytis 2005).

Disertacijos tyrimų rezultatai buvo paskelbti šešiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- tarptautinėje konferencijoje „Welding and powder metallurgy“ 2005 m. Jūrmaloje (Latvija);
- tarptautinėje konferencijoje „Machine-building and technosphere the XXI century“ 2005 m. Sevastopolyje (Ukraina);
- respublikinėje konferencijoje „Medžiagų inžinerija“ 2006 m. Kaune;
- tarptautinėje konferencijoje „Mechanika“ 2008 m. Kaune;
- tarptautinėje konferencijoje „Safety and reliability of welded components in energy and processing industry“ 2008 m. Grace (Austrija);
- tarptautinėje konferencijoje „Mechatronic Systems and Materials“ 2009 m. Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai ir rezultatų apibendrinimas. Yra du priedai.

Pirmajame skyriuje pateikti atliktos literatūros analizės rezultatai, antrajame aprašyta tyrimų metodika, trečiajame skyriuje aprašyta eksperimentų atlikimo eiga, gauti rezultatai bei jų aptarimas.

Darbo apimtis yra 90 puslapių (neskaičiuojant priedų), tekste panaudota 11 numeruotų formulių, 59 paveikslėliai ir 14 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 59 literatūros šaltiniai.

1

Chromo-molibdeno plienų suvirintųjų jungčių eksploatacijos problemos

1.1. Karštyje patvarūs plienai energetikos ir naftos chemijos pramonėje

Karštyje patvariais vadiname plienus, kurie skirti ilgalaikei eksploatacijai temperatūroje iki 600 °C. Šie plienai naudojami energetikos ir naftos chemijos įrenginiams gaminti. Plienai, kurie ilgą laiką yra veikiami įtempių ir aukštos temperatūros, turi turėti tokias savybes, kaip atsparumas valkšnumui, ilgalaikis stiprumas, savybių stabilumas ir patvarumas karštyje. Ekonomiškai legiruojant, išvardintos savybės pasiekiamos panaudojus mažai legiruotus chromo-molibdeno, chromo-molibdeno-vanadžio perlitinės klasės plienus. Ferito-perlito struktūros chromo molibdeno plienai P12, P22, P5 (JAV); 13CrMo4-5, 12CrMo9-10, X12CrMo5 (EN); 12MX, 15XM, 15X5M (Rus) naudojami gaminti įrenginiams ar jų elementams, eksploatuojamiems 500 ÷ 550 °C temperatūroje. Chromo-molibdeno-vanadžio plienai C23, C24 (JAV); 24CrMoV5-5, 21CrMoV5-7 (EN); 12X1MΦ, 15X1MΦ (Rus) naudojami įrenginiams, dirbantiems 550÷580 °C temperatūroje. Chromo–molibdeno–vanadžio plienų didesnį stiprumą aukštoje temperatūroje lemia ne tik karbidinės fazės

stabilizacija vanadžiu, bet ir sustiprinančio terminio apdorojimo taikymas (Zemzin 1972).

Be perlitinių plienų, darbui aukštoje temperatūroje naudojami ir daugiau legiruoti martensitinės klasės plienai. Jų atsparumas kaitroje nedaug didesnis už perlitinių plienų, tačiau jie atsparesni oksidacijai, ypač vandens garuose ir kūryklų dujose. Martensitinių plienų yra dvi pagrindinės grupės:

- mažo anglingumo (0,10–0,15 % C) plienai, legiruoti 10–12 % Cr ir nedideliais Mo, V, Nb,W, Ni kiekiais (X11CrNiWMoV11-2-2, X15CrMoV11, X15CrWNiMoV12 ir pan.);
- plienai, turintys ~0,4 % C, legiruoti 5–10 % Cr ir 2–3 % Si. Pastarieji dažnai vadinami silchromais.

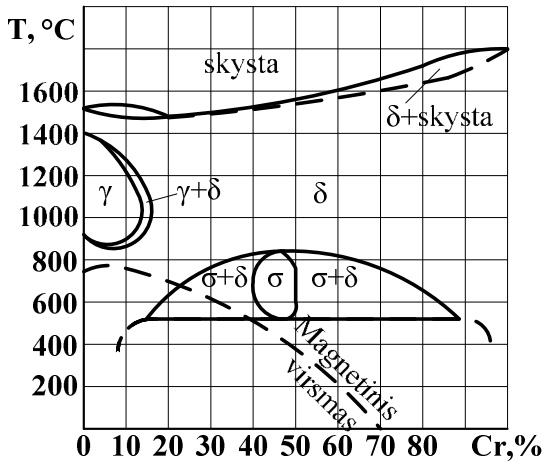
Pirmosios grupės plienai naudojami apdoroti termiškai – grūdinti arba normalizuoti (~950–1100 °C) ir vėliau atleisti 600–740 °C temperatūroje. Termiškai apdorotų plienų struktūrą sudaro ferito ir smulkių karbidų mišinys. Esant plienuose daug chromo bei kitų feritizuojančių elementų (Mo, Si, V) ir mažai anglies, jie tampa martensitiniai-feritiniai. Paprastai tokių plienų struktūroje ferito būna nedaug, todėl jų savybės mažai tesiskiria nuo martensitinio plieno savybių.

Galima paminėti, kad eksploatacijai 600–750 °C temperatūroje naudojami austenitinės klasės plienai (Folkhard 2004). Atsparumui kaitroje padidinti šie plienai gausiai legiruojami Cr, Ni, Mn, Mo, V, W ir kitais elementais, sustiprinančiais tarpatominius ryšius geležies kristalinėje gardelėje bei keliančiais plienų rekristalizacijos temperatūrą. Didžiausią atsparumą kaitroje austenitiniams plienams suteikia stambiagrūdė daug legiruota γ kietojo tirpalo struktūra, sustiprinta smulkiomis karbidų (TiC, VC, ZrC, NbC, $M_{23}C_6$, MC ir kt.) arba intermetalidų (Ni_3Ti, Ni_3Al, Ni_3Nb ir kt.) dalelėmis. Karbidai aukštoje temperatūroje daugiau koaguliuoja negu intermetalidai. Dėl to intermetalinio sustiprinimo plienai (X10NiCrTiB20-11-3, X10NiCrNiTiMoB23-11-3, X12CrNiTi18-10 ir kt.) išlieka stiprūs aukštesnėje temperatūroje negu karbidinio sustiprinimo plienai (X40CrNiMnVMoSi15-7-7-2, X40CrNiWMo14-14-2 ir kt.).

Karbidinio ir intermetalidinio sustiprinimo austenitiniai plienai naudojami apdoroti termiškai. Jų tradicinis terminis apdorojimas yra grūdinimas (1050–1200 °C, aušinant ore, vandenyje arba alyvoje) ir sendinimas (600–850 °C, 3–25 h). Sendinimo metu vyksta dispersinio kietėjimo procesas – iš austenito išsiskiria dispersiškos karbidų arba intermetalidų dalelės.

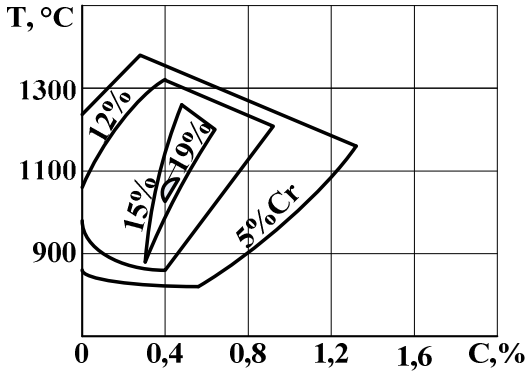
1.1.1. Chromo-molibdeno plienai

Nuo pat lydymosi temperatūros iki labai žemų temperatūrų chromo kristalinė gardelė yra kubinė centratūrė, izomorfinė α geležiai. Tai reiškia, kad geležies legiravimas chromu susiaurina γ tirpalų sritį (Akulov 1978). Fe-Cr būvio diagrama parodyta 1.1 paveiksle.

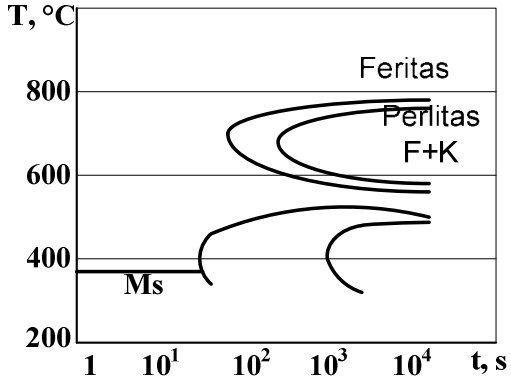


1.1 pav. Fe-Cr būvio diagrama (Akulov 1978)
Fig. 1.1. Fe-Cr phase diagram (Akulov 1978)

Pagal chromo įtaką γ-sričiai Fe-Cr būvio diagramoje sąlygiškai galime išskirti plienus: 1) su γ↔ α virsmais; 2) be γ↔ α virsmų; 3) su daliniais virsmais. Chromas pasižymi didesniu gimiringumu deguoniui nei geležis ir sudaro Cr_2O_3 oksidą, kurio labia aukšta lydymosi temperatūra. Taip pat chromas pasižymi didesniu gimiringumu angliai ir yra karbidus sudarantis elementas. Jis gali būti karbidų $(Fe, Cr)_3C$ sudėtyje, taip pat sudaryti Cr_7C_3 ir $Cr_{23}C_6$ tipo karbidus. Chromo karbidai yra termiškai patvaresni nei geležies karbidai, jie tirpsta lėčiau ir žymiai aukštesnėse temperatūrose. Dėl to, norint homogenizuoti Fe-Cr-C kietuosius tirpalus, reikia aukštesnės temperatūros ir ilgesnio išlaikymo laiko. Chrominių plienų temperatūrinė γ- fazės egzistavimo sritis priklauso nuo anglies ir chromo kiekio juose (1.2 pav.), kitų elementų kiekis tirpale taip pat turi įtakos, bet daug mažiau. Chrominiai plienai, kurių sudėtyje yra C<0,1 % ir Cr>15 %, bet kokioje temperatūroje, nuo kambario iki lydymosi temperatūros, neturi γ-fazės ir vadinami feritiniais plienais. Disertacijos tyrimų sritis apima chrominius plienus, kurių sudėtyje yra ~5 % Cr, šiuose plienuose galimi daliniai γ↔α virsmai ir jie gali būti vadinami martensitiniais plienais. Chromas dėl γ↔ α virsmų proceso sulėtinimo sumažina kritinius aušinimo greičius (Totten 1997). Todėl martensitas gaunamas bedifuzinio austenitinio virsmo metu, net kai anglies koncentracija pliene yra žemesnė nei nelegiruotuose angliniuose plienuose (1.3 pav.).



1.2 pav. Chrominio plieno γ-fazės egzistavimo sritis priklausomai nuo chromo ir anglies kiekio (Akulov 1978)
Fig. 1.2. Chromium Steel γ-phase existence zone, depending on the chromium and carbon (Akulov 1978)



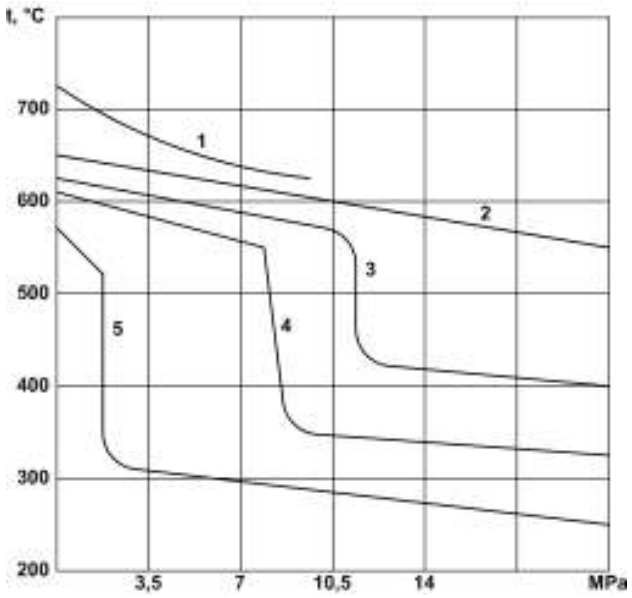
1.3 pav. Chrominio plieno (0,2 % C ir ~5 % Cr) izoterminio virsmo diagrama (Totten 1997)
Fig. 1.3. Isothermal transformation diagram of chromium (0,2 % C and ~5 % Cr) steel (Totten 1997)

Esant žymiai didesnei chromo koncentracijai austenito stabilumas pakankamai didelis, kad net mažiausio austenito patvarumo temperatūroje (~700 °C) austenito virsmui reikia apie 300 s. Net esant nedideliems aušinimo greičiams (~ 0,2 °C/s) 800–650 °C temperatūrų intervale, suvirinimo metu nepertraukiamai aušinant, gaunama martensitinė struktūra. Suvirintųjų jungčių

optimalios mechaninės savybės, t. y. didelis stiprumas, esant pakankamai aukštai plastiškumo reikšmei gali būti pasiektos po jungčių terminio apdorojimo – aukšto atleidimo. Legiruoti chrominiai plienai, papildomai legiruoti molibdenu, volframu, niobiu, vanadžiu, o kartais ir nikeliu, pasižymi atsparumu valkšnumui, dirbant aukštoje temperatūroje ir įtemptame būvyje.

Vidutiniškai ir daug legiruoti chrominiai plienai (iki 13 % Cr ir C ≥ 0,05 %), kurių austenitinė sritis yra aukštoje temperatūroje, pakankamai lėtai savaime aušdami, kambario temperatūroje bus martensitinės struktūros. Esant didesniam chromo kiekiui (C – const) plieno struktūroje kaitinant, be austenito, bus ir tam tikras kiekis feritinės fazės. Tokį plieną ataušinus gaunama martensitinė-feritinė struktūra. Chromo kiekio didinimas sąlygiškai didina ir struktūros feritinės dedamosios dalį. Tolesnis chromo kiekio didinimas lemia tai, kad esant bet kokiai temperatūrai struktūra bus feritinė. Tokia struktūra išlieka ir esant bet kokiam aušinimo greičiui.

Projektuojant naftos chemijos pramonės įrenginius jų plienas dažnai parenkamas naudojantis Nelsono diagrama (1.4 pav.).



1.4 pav. Nelsono diagrama (Bailey 1994).
1 – 7 % Cr–0,5 % Mo; 2 – 5 % Cr–0,5 % Mo; 3 – 2,25 % Cr–0,5 % Mo;
4 – 1,25 % Cr–0,5 % Mo; 5 – anglinis plienas

Fig. 1.4. Nelson diagram
1 – 7 % Cr–0,5 % Mo; 2 – 5 % Cr–0,5 % Mo; 3 – 2,25 % Cr–0,5 % Mo;
4 – 1,25 % Cr–0,5 % Mo; 5 – carbon steel

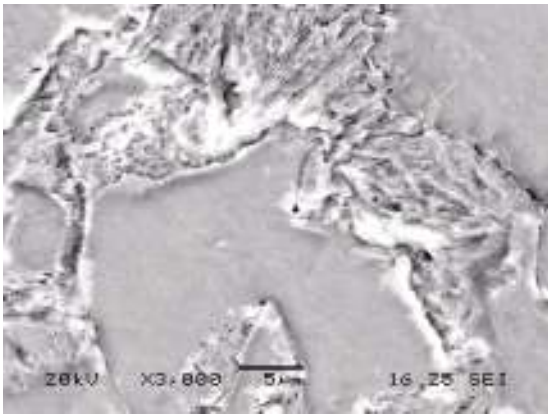
Gaminant įvairią įrangą naftos chemijos objektams, labai aktualūs klausimai, susiję su metalų ir jų suvirintųjų jungčių apsauga nuo neigiamai veikiančių įvairių perdirbamų terpių agresyvių komponentų. Visų pirma gamintojai atkreipia dėmesį į tokius komponentus, kaip vandenilis ir sieros vandenilis. Plienuose, dirbančiuose vandenilinėje terpėje, pastebima viena iš korozijos rūšių – vandenilinė korozija. Pagal G. Nelsono tyrimų rezultatus, gautus išanalizavus didelį kiekį įvairių legiravimo sistemų plienų suvirintų įrenginių, eksploatuotų vandenilinėse terpėse, galime pasirinkti kiekvienu atveju tinkamiausią legiravimo sistemą priklausomai nuo darbinių parametrų – temperatūros ir vandenilio parcialinio slėgio (Bailey 1994). Matome, kad tokie elementai kaip chromas ir molibdenas didina plieno atsparumą vandenilinei korozijai.

1.1.2. Mechaninių savybių degradacijos priežastys

Daugelis energetikos ir naftos chemijos pramonės įrenginių yra eksploatuojami jau 20, o kai kurie ir 30 metų, tai yra daug daugiau nei projektinis darbo resursas. Ilgą laiką veikiamame aukštos temperatūros ir įtempių energetinių įrenginių elementų pliene įvyksta struktūriniai pokyčiai. Aukštose temperatūrose patvarių plienų struktūra per visą eksploatacijos periodą nėra stabili, vyksta karbidinės fazės sferoidizacija, legiruojančių elementų iš kieto tirpalo feritinės fazės perėjimas į karbidus, vienų karbidinių fazių virsmai kitomis (Robson 1996). Ilgainiui, veikiant aukštoms temperatūroms ir pastoviems įtempiams, vyksta legiruojančių elementų difuzija iš feritinės matricos. Legiruotas feritas ir perlitas ima irti, o legiruojantys elementai ir pradinė karbidinė fazė – cementitas (Fe3C) ferito grūdelių ribose pradeda sudaryti stambius specialiuosius, termodinamiškai patvaresnius karbidus. Dėl struktūrinių virsmų sumažėja plieno mechaninės stiprumo savybės, taip pat vystosi plastinė deformacija, vyksta valkšnumo procesas (Rudzinskas 2003). Ypač jautrios struktūros pokyčių požiūriu virintinių jungčių zonos. Jau pradinėse eksploatacijos stadijose grūdelių pakraščiuose pastebimos karbidų sankaupos, tai gali būti sukelta netinkamu plieno suvirintųjų jungčių terminiu apdorojimu (Kumšlytis 2008). Valkšnumo proceso metu metalo grūdelių viduje vyksta dislokacijų judėjimas. Dislokacijų reakcijos lemia naujų dislokacijų generavimą. Dėl metale esančių įtempių laukų atsiranda kryptingas difuzinis vakancijų srautas. Grūdelių ribos tampa vakansijų sankaupos vieta (Manson 2006). Vakansijų judėjimas tarp grūdelių yra didesnis nei judėjimas grūdelių viduje. Judėdamos tarp grūdelių jos susikaupia prie kliūčių – dislokacijų sankaupų, karbidų ir nemetalinių intarpų. Pagrindinės tokios kliūtys chromo molibdeno pliene yra karbidai (Levinskas 2008). Kai vakansija pasiekia kritinį dydį, ji tampa stabili. Taip atsiranda submikroskopinė tuštuma – artimos apskritimui formos pora. Grūdelių

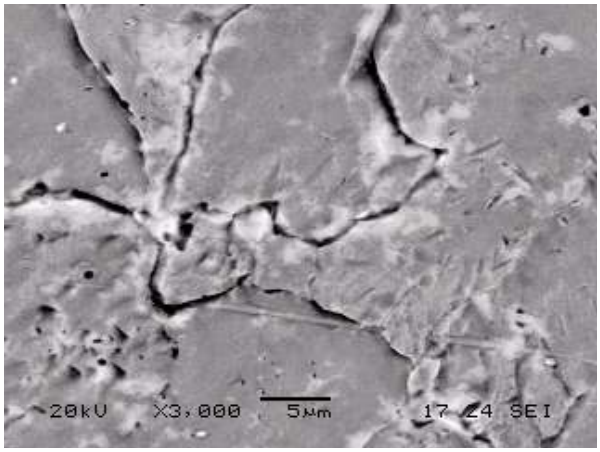
ribose dėl kryptinės difuzijos poros augimas vyksta išilgai grūdelio ribos ir statmenai maksimaliems tempimo įtempimams. Dėl šių vyksmų grūdeliai įgauna netaisyklingą formą. Tarp grūdelių susikaupiančios mikroskopinės poros laikui bėgant susilieja į makroskopines, iš kurių išsivysto makroskopiniai įtrūkimai. Vakansijos, išdėstytos grūdelių ribose, turi mažiausią potencinę energiją ten, kur yra laisvas jų išėjimas į metalo paviršių. Būtent dėl šitos priežasties eksploatacijos metu pirmos submikroskopinės poros atsiranda ant vamzdžių paviršiaus įtempimų koncentracijos vietose. Dažniausiai jos atsiranda suvirinimo jungčių terminio poveikio srityse ir fasoninių vamzdyno elementų formavimo metu ištemptose vietose. Optinės ir skenuojančiosios elektroninės mikroskopijos metodais nustatyta eksploatuoto ir laboratorinėmis sąlygomis sendinto plieno paviršiaus mikrostruktūra ir morfologija. Naudojant elektrocheminį ėsdinimą ir rentgeno spinduliuotės difrakcinius tyrimus, atlikta 227 000 val. 550 °C temperatūroje eksploatuoto plieno karbidinių junginių kokybinė analizė. Įvertinus Fe_3Cl ir $M_{23}C_6$ smailių integralinį intensyvumą, karbidų susidarymo kinetiką lygtimis, nustatyta, kad eksploatacijos metu plieno perlitas visiškai suyra, o legiruojantieji elementai difunduoja į tarpgrūdelines sritis ir sudaro specialiuosius legiruotuosius karbidus (Baltušnikas 2007).

Neeksploatuoto plieno optinės mikroskopijos nuotraukose stebimi perlito ir ferito grūdeliai, tačiau sunku identifikuoti smulkius karbidų darinius. Neeksploatuoto 12X1MF plieno SEM nuotraukoje (1.5 pav.) aiškiai matyti ferito ir perlito grūdeliai.



1.5 pav. Neeksploatuoto 12X1MF plieno bandinių paviršiaus mikrostruktūra, nustatyta SEM (Baltušnikas 2007)
Fig. 1.5. Microstructure (SEM) of 12X1MF steel, virgin state (Baltušnikas 2007)

Aukštose temperatūrose ferito ir perlito grūdeliai pradeda irti, ir jų ribose susiformuoja legiruotųjų karbidų grandinėlės. Pasak Lietuvos energetikos instituto mokslininkų (Baltušnikas 2007), bandinių, ėsdintų Nitalio tirpalu, legiruotuosius karbidus sunku identifikuoti optinės mikroskopijos metodu dėl per mažos jos skiriamosios gebos. Išbuvus plienui 227 000 val. 550 °C temperatūroje, perlito grūdeliai visiškai suyra, susiformuoja dideli ferito grūdeliai, kurių ribose išsidėsto specialūs legiruotieji karbidai (1.6 pav.).



1.6 pav. Plieno 12X1MF, eksploatuoto 227 000 val. 550 °C temperatūroje, bandinių paviršiaus mikrostruktūra, nustatyta SEM (Baltušnikas 2007).
Fig. 1.6. Microstructure (SEM) of 12X1MF steel, 227000 h exploited at 550 °C (Baltušnikas 2007)

1.2. Suvirintųjų jungčių liekamieji įtempiai

Liekamieji įtempiai yra įtempiai, kurie lieka konstrukcijos elemente pašalinus bet kokį išorinį mechaninį ar terminį poveikį. Vidiniai liekamieji įtempiai metalo struktūroje atsiranda dėl įvairių gamybos procesų, tokių kaip valcavimas, kalimas, lenkimas, suvirinimas. Suvirinimo liekamieji įtempiai atsiranda šiluminių procesų metu, suvirinimo metalui ir terminio poveikio sričiai kaistant ir auštant bei vykstant faziniams virsmams. Jie atsiranda visose suvirinimo jungties srityse ir mikroskopiniame lygmenyje vystosi dėl šiluminio plėtimosi ar susitraukimo, metalo apimties, tūrio pokyčių sąveikoje su fazių transormacija (Epselis 1996). Kadangi likę įtempiai gali paveikti konstrukcijos eksploatacines savybes ir elgseną, svarbu numatyti ir modeliuoti likusius vidinius įtempius pagal

skirtingus scenarijus. Liekamųjų įtempių modeliavimas nėra paprasta užduotis, nes yra daug kintamųjų:

- konstrukcijos konfigūracija,
- medžiagos tipas, savybės,
- medžiagos matmenys,
- gamybos procesas, temperatūra, laikas.

Liekamieji įtempiai pagal atsiradimo mechanizmą gali būti klasifikuojami:

- įtempiai, atsiradę dėl konstrukcijos standumo gamybos metu,
- įtempiai, atsiradę dėl netolygaus perėjimo į tamprų įtempių būvį kartu su mechaniniais ir terminiais įtempiais (ASM Handbook 1994).

Abu šie minėti mechanizmai yra galimi su visais suvirinimo procesais ir medžiagomis.

Kitas liekamųjų įtempių klasifikavimo metodas apibrėžia jų atsiradimo ir pasiskirstymo sritis. Šioje klasifikacijoje yra mikroskopiniai ir makroskopiniai vidiniai įtempiai.

Makroskopiniai liekamieji įtempiai atsiranda pakankamai plačioje, makroskopinėje jungties dalyje (Feng 2005). Vidiniai įtempiai atsiranda srityse aplink prilydytą metalą. Taip pat žinoma, kad net šlifavimo operacijos sukelia lokalizuotus vidinius įtempius plonuose sluoksniuose, subpaviršiuje.

Mikroskopiniai įtempiai atsiranda pakankamai mažose srityse, jie kyla deformuojantis kristalinėms gardelėms, atsirandant dislokacijoms. Truputį didesniu mastu įtempiai gali atsirasti dislokacijų susidūrimų metu. Mikroskopiniai vidiniai įtempiai vaidina fundamentalius vaidmenis sukeliant plastinę deformaciją ar nuovargio plyšio vystymąsi.

Liekamieji įtempiai gali išaugti iki takumo ribos arba net viršyti ją, sukeldami nepageidaujamą plastinę deformaciją.

Kitas liekamųjų įtempių atsiradimo procesas mikroskopiniame lygyje yra martensito susidarymas. Šis procesas būdingas disertacijoje tiriamiems chromo-molibdeno plienams. Žema aplinkos temperatūra ir greitas suvirinimo siūlės aušinimas kai kuriems plienams yra tipiški martensitinį virsmą lemiantys veiksniai. Martensitinis virsmas susijęs su suvaržytu tūriniu plėtimusi, mažėjančiu plastiškumu. Šio virsmo pabaigoje atsiranda lokalizuoti vidiniai įtempiai (Feng 2005). Vykstant martensitiniam virsmui γ-geležies kristalinė gardelė keičiasi į α-geležies kristalinę gardelę, anglies atomai, esantys γ-geležies gardelėje, lieka ir α-geležie*s* gardelėje. Dėl to šio virsmo produktas – martensitas yra persotintas kietas anglies tirpalas α-geležyje. Anglies atomai iškreipia α-geležies kristalinę gardelę. Buvusi kubinė gardelė tampa tetragoninė (aukštinė nelygi pagrindo kraštinei).

Kitaip nei perlitinis, martensitinis virsmas nevyksta izoterminėmis sąlygomis. Temperatūros M_S ir M_f austenito izoterminio virsmo diagramoje pažymėtos tik sąlygiškai. Kad nuosekliai vyktų martensitinis virsmas, būtina nepertraukiamai

aušinti nuo M_S iki M_f. Šiame temperatūrų intervale nutraukus aušinimą martensitinis virsmas sustoja ir tęsiasi tik atnaujinus aušinimą. Tačiau ir baigus aušinti iki M_f temperatūros ne visas austenitas virsta martensitu. Dalis jo lieka plieno struktūroje ir yra vadinamas liekamuoju austenitu (Van Bohemen 2001).

Martensito kristalai yra plokštelių formos. Mikrošlifo plokštuma šias plokšteles kerta skirtingais kampais, todėl mikroskopo stebėjimo lauke martensito kristalai yra adatėlių formos.

Suvirinimas yra viena iš pagrindinių liekamųjų įtempių atsiradimo priežasčių. Žemesnės temperatūros pagrindinis metalas sulaiko siūlės metalo susitraukimą auštant, taip neišvengiamai sukuriami dideli vidiniai įtempiai. Faziniai ir tūriniai pokyčiai mikroskopiniame lygyje suvirinimo metu daro įtaką vidinių įtempių susidarymo procesui. Būtų labai gerai, jei galėtume valdyti likutinių vidinių įtempių susidarymo procesą. Modeliuoti liekamuosius vidinius įtempius yra labai sunki užduotis, nes yra daug kintamų parametrų, turinčių įtakos šiam procesui:

- temperatūra;
- laikas;
- jungties geometrija;
- prilydyto metalo kiekis;
- suvirinimo procesas;
- pagrindinio ir pridėtinio metalo cheminė sudėtis;
- šilumos įvedimas.

Svarbiausia liekamųjų įtempių suvirintosiose jungtyse atsiradimo priežastis yra ta, kad šiluma yra įvedama lokalioje srityje ir visa suvirintoji jungtis pasižymi nevienalyčių temperatūrinių sričių gausa (ASM Handbook 1994).

Liekamieji įtempiai turi didelę įtaką medžiagos mechaninėms savybėms, tokioms kaip valkšnumas ar atsparumas nuovargiui. Suvirinant storasienius ruošinius keliais ar net keliolika ėjimų, siūlės ir terminio poveikio srityje susidaro skirtingų krypčių liekamieji įtempiai, kurie „užsirakina“ medžiagos mazguose. Tai sukelia ne tik dideles įtempių sankaupas, bet ir ruošinių deformacijas. Jei įtempiai viršija medžiagos takumo ribą, prasideda plastinė metalo deformacija ir galimas spontaniškas trūkis – medžiagos suirimas. Dažniausiai liekamieji vidiniai įtempiai nėra vienintelė konstrukcijos suirimo priežastis, tam įtakos turi ir išorinės apkrovos.

1.2.1. Vidinių liekamųjų įtempių sumažinimo metodai

Suvirintųjų jungčių liekamųjų įtempių sumažinimas gali būti atliekamas įvairiais metodais. Plačiausiai taikomi šie metodai:

- vibracinis įtempių sumažinimas;
- mechaninis smūginis apdorojimas;

- terminis apdorojimas;
- termomechaninis apdorojimas;
- priešingų įtempių technika.

Vibracinis įtempių sumažinimas atliekamas tiek suvirinimo metu, tiek po suvirinimo. Suvirinama konstrukcija yra padedama ant gumos arba kitokios medžiagos, neslopinančios konstrukcijos vibracijos, pagrindo ir vibraciniu įtaisu vibruojama. Priklausomai nuo pasirinktos metodikos gali būti taikomas konstrukcijos vibracijos rezonansinis, ikirezonansinis ir viršrezonansinis dažnis. Išlydyto metalo kristalizacijos metu vibracija palengvina taisyklingos formos gardelių susidarymą, dėl to sumažėja įtempiai mikroskopiniame lygmenyje.

Mechaninis smūginis apdorojimas gali būti atliekamas metalinių šratų srove arba kalant suvirinimo siūlės paviršių buku kaltu. Plastiškai deformuojant siūlės metalą sukuriami įtempiai priešingi vidiniams įtempiams. Šis metodas naudojamas nelegiruotų arba mažai legiruotų manganu ir siliciu plienų suvirintųjų jungčių vidiniams įtempiams sumažinti (Jurčius 2008).

Termomechaninis apdorojimas – mechaninis (gali būti kalimas) suvirintos siūlės apdorojimas aukštoje temperatūroje. Šis metodas – terminio ir mechaninio metodų derinys.

Vienas iš pagrindinių priešingų įtempių technikos pavyzdžių – kai slėginiame įrenginyje sukeliamas vidinis slėgis, siekiantis įrenginio plieno takumo ribą.

Visų anksčiau išvardytų metodų trūkumas yra tas, kad jie negali būti taikomi lengvai užsigrūdinantiems, taip pat disertacijoje tiriamiems chromo-molibdeno plienams, kai suvirinimo siūlės struktūra sudaryta iš martensito ar kitų kietų ir trapių fazių. Mechaniškai apdorojant tokiuose plienuose gali susidaryti plyšiai.

Suvirintųjų jungčių terminis apdorojimas yra labiausiai paplitęs įtempių sumažinimo metodas ir gali būti taikomas visiems plienams.

1.2.2. Chromo-molibdeno plieno suvirintųjų jungčių terminis apdorojimas

Suvirintųjų jungčių terminis apdorojimas yra neatskiriama ir gana brangi procedūra, gaminant ar remontuojant slėginius indus ar vamzdynus. Terminis apdorojimas paprastai yra vidinių įtempių sumažinimo procesas. Vidinių įtempių pašalinimas nėra vienintelis terminio apdorojimo padarinys. Tai taip pat yra (Kumšlytis 2005):

- vandenilio pašalinimas iš prilydyto metalo ir terminio poveikio srities;
- sukietintų sričių kietumo sumažinimas, martensito atleidimas, pasiekiant minkštesnę struktūrą;
- šaltų plyšių atsiradimo tikimybės sumažinimas;
- matmenų stabilumo užtikrinimas, atliekant mechaninį apdorojimą;

- padidinamas atsparumas koroziniam pleišėjimui, veikiant įtempiams.

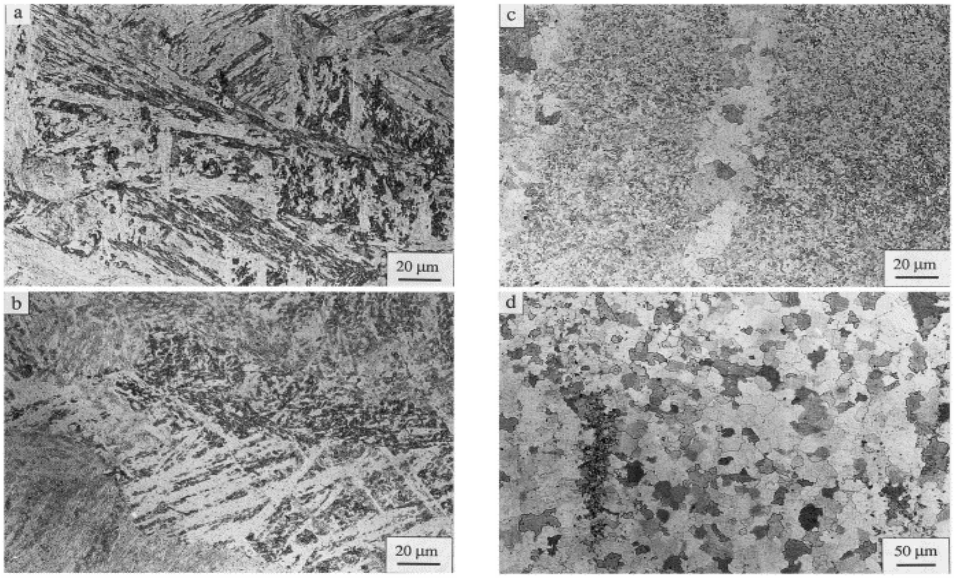
Suvirintųjų jungčių terminis apdorojimas gali būti atliktas įvairiais skirtingais būdais priklausomai nuo konstrukcijos dydžio ir konfigūracijos. Visos konstrukcijos terminis apdorojimas siekiant sumažinti ar panaikinti vidinius įtempius gali būti atliekamas kaitinimo krosnyse, jei apdorojama konstrukcija yra kilnojama ir nedidelių matmenų, taip pat gali būti atliekamas lokalinis suvirintųjų jungčių terminis apdorojimas deguonies-acetileno dujų liepsnos degikliais, lanksčiais varžiniais kaitinimo kilimėliais arba indukcinių ričių pagalba (Totten 2006).

Slėginės įrangos gamyboje terminio apdorojimo tikslumui įvertinti būtinai yra atliekama temperatūros kontrolė viso proceso metu. Tam naudojamos termoporos, sujungtos parodymus fiksuojančia įranga. Kiekvienai termoporai braižoma temperatūros ir laiko diagrama yra nustatyto terminio apdorojimo režimo laikymosi įrodymas.

Žinoma, kad netinkamas terminio apdorojimo atlikimas, nepasiekta reikiama temperatūra ar išlaikymo laikas gali stipriai lemti mechaninių savybių pokyčius. Pavyzdžiui, atsparumo valkšnumui ar tempimo stiprumo (santykinė stiprumo ir takumo riba) sumažėjimas eksploatacijos temperatūroje. Todėl būtina atsižvelgti į suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo poveikio medžiagų savybėms tyrimų rezultatus. Pasak O‘Brien ir Lumb, ypač daugkartiniai jungčių terminio apdorojimo ciklai gali būti nuovargio plyšių ar valkšnumo proceso iniciatoriai. Tarptautiniai standartai ir projektavimo kodai vis dar ignoruoja ilgalaikio ar daugiaciklio suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo padarinius (Sterjovski 2005).

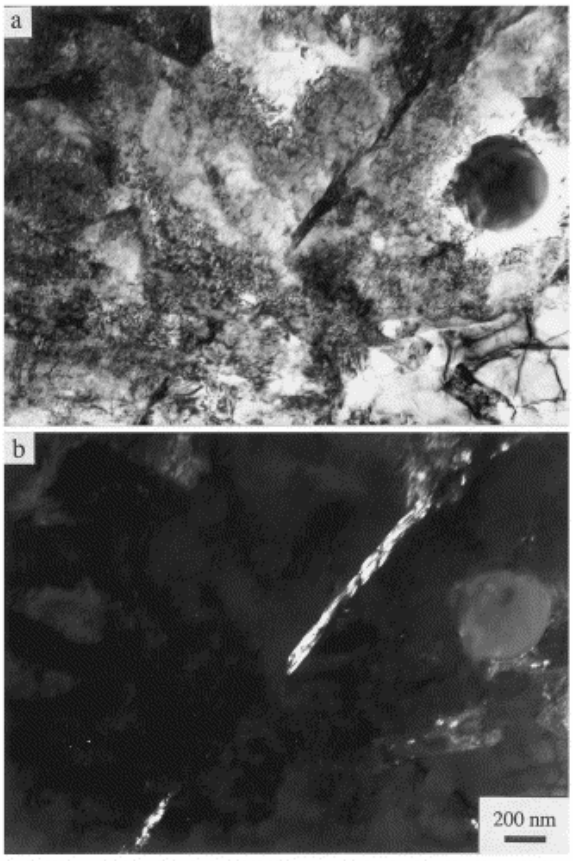
Kaip jau minėta ankstesniuose skyriuose, chromas dėl $\gamma \leftrightarrow \alpha$ virsmų proceso sulėtinimo mažina kritinį lydinio aušinimo greitį. Martensitas gaunamas bedifuzinio austenitinio virsmo metu, net kai anglies koncentracija pliene yra žemesnė nei nelegiruotuose angliniuose plienuose. Esant didesnei chromo koncentracijai austenito stabilumas pakankamai didelis, kad net mažiausio austenito patvarumo temperatūroje (~700 °C) austenito virsmui reikia apie 300 s. Pagrindinė užduotis atliekant 5 % Cr–0,5 % Mo plieno jungčių terminį apdorojimą yra martensitinės dedamosios pašalinimas, pakeitimas į priimtinesnę, plastiškesnę struktūrą. Kartu sumažinami ir liekamieji įtempiai. 1.7 paveiksle parodyta tik suvirinto ir termiškai apdoroto 5 % Cr–0,5 % Mo plieno mikrostruktūra (Guang-Jun 1998). Termiškai neapdorotos, tik suvirintos medžiagos mikrostruktūra sudaryta iš smulkių ferito juostelių (a nuotrauka), kurios sprendžiant iš kryptingo išdėstymo gali būti pavadintos martensito juostelėmis. Gretimos ferito juostelės suformavo kolonų formos grūdus. Viso suvirinimo metalo mikrostruktūra nebuvo vienalytė. Ferito juostelės yra labiau dominuojančios. Jokio mikrostruktūros pokyčio optiniu mikroskopu nepastebėta

iki tol, kol temperatūra buvo padidinta iki 600 °C (b nuotrauka). Termiškai apdorotame, atleistame 600 °C temperatūroje pavyzdyje plokšteliniai kristalų grūdeliai vis dar egzistavo, bet pastebėta ferito rekristalizacija. Kai temperatūra buvo padidinta iki 700 °C, ferito grūdo vystymasis įvyko. Plokštelinis feritas išsivystė į daugiakampius (poligonalinius grūdus) (1.7 pav. c nuotrauka). Po 750 °C atleidimo bandinio mikrostruktūra susidėjo iš daugiakampio (poligonalinio) ferito (d nuotrauka).



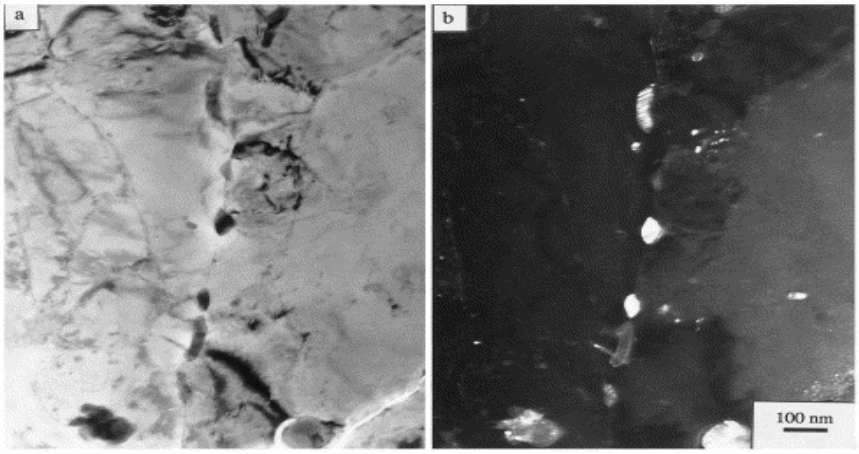
1.7 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno virintinės siūlės metalo mikrostruktūros nuotraukos: a – be terminio apdorojimo; b – terminis apdorojimas 600 °C; c – terminis apdorojimas 700 °C; d – terminis apdorojimas 750 °C (Guang-Jun 1998)
Fig. 1.7. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welds: (a) as-welded; (b) 600 °C tempered; (c) 700 °C tempered; (d) 750 °C tempered (Guang-Jun 1998)

Tyrimas transmisiniu elektroniniu mikroskopu (TEM) parodė, kad ką tik suvirinto 5 % Cr–0,5 % Mo plieno bandinio mikrostruktūroje dominuojanti fazė yra plokštelinis martensitas, taip pat buvo rasta ir netaisyklingo ferito ir beinito. Kol terminio apdorojimo temperatūra buvo padidinta iki 400 °C, nebuvo jokio mikrostruktūros pasikeitimo, išskyrus dislokacijų tankumo mažėjimą (Guang-Jun 1998). Likutinis austenitas vis dar egzistuoja termiškai apdorojus bandinius 400 °C temperatūroje (1.8 pav.).

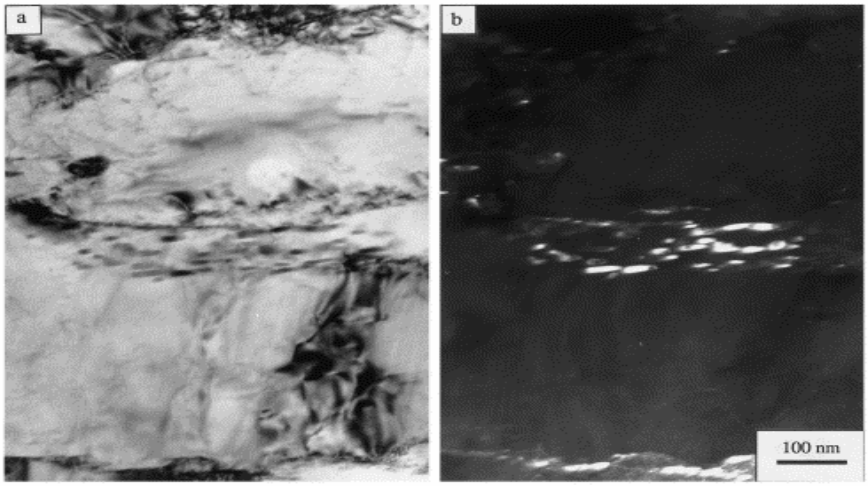


1.8 pav. Termiškai apdoroto 400 °C temperatūroje 5 % Cr–0,5 % Mo plieno virintinės siūlės metalo mikrostruktūros nuotraukos:
a – šviesus vaizdas; b – tamsus vaizdas (Guang-Jun 1998)
Fig. 1.8. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welds tempered at 400 °C:
a – bright field; b – dark field (Guang-Jun 1998)

TEM tyrimu nustatyta, kad plokštelinio ferito rekristalizacija prasideda nuo 500 °C. Taip pat gerai matyti dalelių M_7C_3 (1.9 pav.) ir M_2X (1.10 pav.) susidarymas. Naudojame simbolį M_2X, o ne M_2C, todėl, kad negali būti atmetama galimybė susidaryti junginiams su azotu. M_7C_3 ir M_2X dydis ir forma yra labai panašūs, todėl sudėtinga juos atskirti morfologiškai. M_7C_3 greičiau susidaro ant pirminio austenito grūdelių sienelių ir matrensito plokštelių ribose, kai M_2X jungiasi į grupes ant grūdelių sienelių ir grūdeliuose.

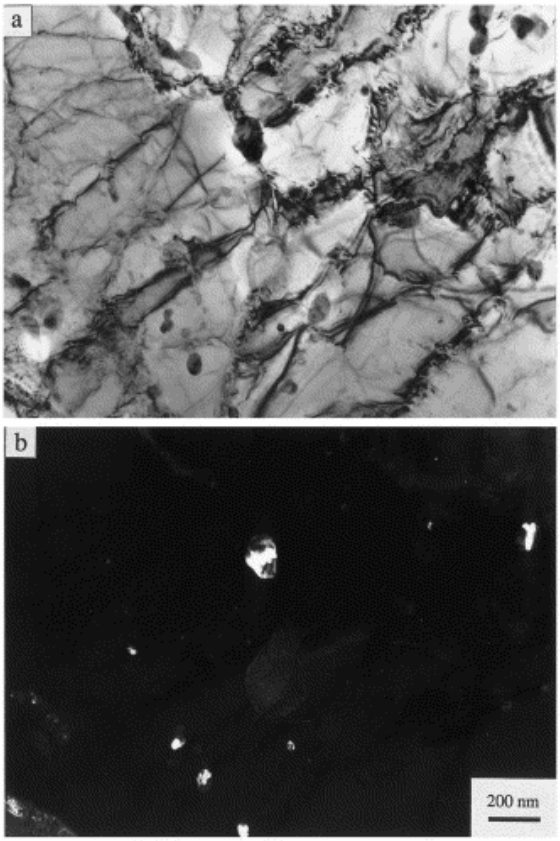


1.9 pav. Termiškai apdoroto 500 °C temperatūroje 5 % Cr–0,5 % Mo plieno virintinės siūlės metalo mikrostruktūros nuotraukos, M_7C_3 dalelės:
a – šviesus vaizdas; b – tamsus vaizdas (Guang-Jun 1998)
Fig. 1.9. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welds tempered at 500 °C, M_7C_3 particles: a – bright field; b – dark field (Guang-Jun 1998)



1.10 pav. Termiškai apdoroto 500 °C temperatūroje 5 % Cr–0,5 % Mo plieno virintinės siūlės metalo mikrostruktūros nuotraukos, M_2X dalelės:
a – šviesus vaizdas; b – tamsus vaizdas (Guang-Jun 1998)
Fig. 1.10. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welds tempered at 500 °C, M_2X particles: a – bright field; b – dark field (Guang-Jun 1998)

600 °C termiškai apdorotos suvirintosios jungties bandinio martensito plokštelių morfologijos pokytis akivaizdus, taip pat žymiai mažėja dislokacijų tankis. M_7C_3 dalelės pasidaro didesnės. Šioje temperatūroje pastebima ir $M_{23}C_6$ ant grūdelių sienelių (1.11 pav.). $M_{23}C_6$ dalelės nereguliarios ir palyginti didelės. Kai terminio apdorojimo temperatūra padidinama iki 700 °C, įvyksta didžiosios dalies plokštelinio ferito rekristalizacija. Kai terminio apdorojimo temperatūra yra 750 °C, ferito grūdai vystosi toliau, ir mikrostruktūra susideda iš daugiakampio ferito su M_7C_3, $M_{23}C_6$ ir M2X dalelėmis.



1.11 pav. Termiškai apdoroto 600 °C temperatūroje 5 % Cr–0,5 % Mo plieno virintinės siūlės metalo mikrostruktūros nuotraukos, $M_{23}C_6$ dalelės: a – šviesus vaizdas; b – tamsus vaizdas (Guang-Jun 1998)

Fig. 1.11. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welds tempered at 600 °C, $M_{23}C_6$ particles: a – bright field; b – dark field (Guang-Jun 1998)

Nustatyta, kad priklausomai nuo atleidimo laiko ir temperatūros karbidai nuo metastabilių fazių pasikeičia į stabilesnes fazes. Tyrimų rezulatuose apie karbidų susidarymą 2,25Cr–1Mo pliene Baker ir Nutting (Baker 1959) teigė, kad karbido susidarymo seka yra tokia, kaip parodyta 1.12 paveiksle.

$$\begin{array}{l} \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow Cr_7C_3 \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \uparrow \qquad\qquad\quad ...\downarrow \\ Cementitas \rightarrow (Mo_2C + cementitas) \rightarrow M_{23}C_6 \rightarrow M_6C \end{array}$$

1.12 pav. Karbidų susidarymo seka 2,25Cr-1Mo pliene (Baker 1959)
Fig. 1.12. Carbide formation in the 2,25Cr-1Mo steel (Baker 1959)

Didesnės Cr koncentracijos pliene karbidų susidarymo seka buvo nustatyta kaip $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$ (Kazakovtseva 1982).

1.3. Norminių dokumentų rekomendacijos dėl chromo-molibdeno plienų terminio apdorojimo

Energetikos ir naftos chemijos pramonės įrenginių gamyba, montavimas, eksploatacija ir remontas yra įstatymais ir norminiais dokumentais reguliuojamos veiklos sritys. Todėl atliekant tyrimus, kurių praktinis pritaikymas skirtas šioms sritims, būtina išanalizuoti ir joms taikytinų norminių dokumentų reikalavimus. Šiame skyriuje apžvelgiami norminiai dokumentai, reglamentuojantys naftos chemijos pramonės slėginių indų ir vamzdynų suvirintųjų jungčių terminį apdorojimą.

Daugelis Lietuvos įrenginių yra pagaminti prieš 20 ar daugiau metų pagal tuo metu mūsų šalyje galiojusius sovietinius standartus, todėl iki šiol jie yra taikomi slėginių indų ir vamzdynų eksploatacijai ir remontui.

Technologinių vamzdynų suvirintųjų jungčių terminis apdorojimas reglamentuotas OCT 36-50-86 standarte. Chromo molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo plieno vamzdynų suvirintosioms jungtims nustatyta terminio apdorojimo temperatūra yra nuo 730 iki 760 °C ir išlaikymo laikas turi būti ne mažesnis kaip 4,8 min vienam sienelės storio milimetrui, o vamzdynams, kurių darbinis slėgis iki 10 MPa, suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo išlaikymo laikas turi būti ne mažesnis kaip 2,5 h. Šiame dokumente nėra nustatyta maksimalaus išlaikymo laiko. Nurodomas įkaitinimo greitis turi būti ne didesnis kaip 100 °C/h ir aušinimas ne greitesnis kaip 200 °C/h. Dokumente nurodomas vienintelis suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo kokybės įvertinimo kriterijus –

sujungimo kietumas, kuris 5 % Cr–0,5 % Mo plienams turi būti ne didesnis kaip 240 HB.

Naftos chemijos įrenginių terminis apdorojimas taip pat nurodytas PTM 26-44-82. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno įrenginių suvirintosioms jungtims nustatyta terminio apdorojimo temperatūra yra nuo 730 iki 780 °C ir išlaikymo laikas – 3 min vienam sienelės storio milimetrui, bet ne mažiau kaip 2 h, įkaitinimas ≤150 °C/h, aušinimas ≤150 °C/h.

AB „Mažeikių nafta“ šiuo metu montuoja daug įrenginių, pagamintų pagal JAV standartus. Slėginiai indai gaminami pagal Amerikos mechanikos inžinierių asociacijos standartus *(ASME boilers and pressure vessels code)*. ASME BPVC VIII dalyje yra reglamentuojami slėginių indų suvirintųjų jungčių terminio apdoprojimo parametrai. Chromo molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintosioms jungtims nustatyta terminio apdorojimo temperatūra yra tik 675 C ir išlaikymo laikas ne mažesnis kaip 1,5 min vienam sienelės storio milimetrui. Šiame standarte 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plienams nurodyti terminio apdorojimo parametrai tokie pat kaip ir mažiau chromu legiruotiems plienams. Šiame standarte apie šios grupės plienus yra nepakankamai informacijos, didesnis dėmesys skirtas 2 % Cr ir 9 % Cr plienams. Sujungimo terminio apdorojimo kokybės įvertinimo kriterijus – sujungimo kietumas, kuris 5 % Cr–0,5 % Mo plienams turi būti ne didesnis kaip 241 HB.

ASME Technologinių vamzdynų standarte (ASME B31.3 *Process piping*) 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plienų suvirintosioms jungtims nustatyta terminio apdorojimo temperatūra yra nuo 704 °C iki 760 °C, taip pat nurodomas išlaikymo laikas – ne mažesnis kaip 1,5 min vienam sienelės storio milimetrui. Nustatytas maksimalus sujungimo kietumas – 241 HB. Abiejuose ASME dokumentuose rekomenduojamas ne didesnis už 75 °C/h įkaitinimo greitis.

Europoje slėginių indų ir vamzdynų gamybai taikomi LST EN 13445 ir LST EN 13480. 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plienai pagal Europos plienų grupavimo sistemą (LST EN ISO 15608) priskiriami 5.3 grupei. Pagal LST EN 13445 – 5.3 grupės plienų suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo temperatūra turi būti nuo 690 iki 730. LST EN 13480 nustatyta temperatūra yra nuo 700 iki 750 °C ir išlaikymo laikas – daugiau kaip 1 minutė vienam apskaičiuoto storio milimetrui, bet ne mažiau kaip 60 min. Įkaitinimo ir aušinimo greitis turi būti ne didesnis kaip 300 °C/h. Kokybė vertinama taip pat pagal sujungimo kietumą, kuris turi būti ne didesnis kaip 300 HV.

Apibendrinant galima teigti, kad įvairių šalių norminiuose dokumentuose tai pačiai plienų grupei yra nustatyti gana skirtingi terminio apdorojimo parametrai. Terminio apdorojimo temperatūra varijuoja gana plačiame intervale, nuo 675 iki 780 °C, o maksimalus išlaikymo laikas tiksliai neribojamas.

1.4. Temperatūros ir laiko parametro taikymas suvirintųjų jungčių mechaninių savybių nustatymui

Temperatūrų, kuriose dirba konstrukcijos, diapazonas platus. Yra konstrukcijų, kurių medžiaga veikiama itin aukštos temperatūros, pavyzdžiui, orinių-reaktyvinių ir raketų variklių kamerų sienelės. Taip pat yra konstrukcijų, kurių elementai eksploatuojami labai žemose temperatūrose, tai šaldymo įrenginių elementai, suskystintųjų dujų rezervuarai. Suprantama, kad ir mechaninės medžiagų savybės skirtingose temperatūrose bus skirtingos.

Apibendrinanti medžiagų analizė įvertinant temperatūros ir eksploatacijos laiką yra gana sudėtinga ir nesutelpa į eksperimentiškai gautas kreives, panašias į tempimo diagramas. Funkcinė keturių parametrų (įtempimų σ, deformacijos ε, temperatūros T°, laiko t) priklausomybė yra nevienareikšmė ir sudaryta iš sudėtingų diferencialinių ir integralinių jos narių santykių. Paprastai analitinio arba grafinio šios funkcijos aprašymo gauti nepavyksta, todėl temperatūros poveikis ir laiko faktorius nagrinėjamas skirstant į užduočių klases (Furillo 1977). Skirstymas į klases dažniausiai atliekamas pagal veikiančių išorinių jėgų tipą. Išskiriamos lėtai kintančios, greitai kintančios ir labai greitai kintančios apkrovos. Pagrindinės medžiagų atsparumo mokslo nagrinėjamos apkrovos – tai lėtai kintančios, arba statinės, apkrovos. Šių apkrovų kitimo greitis laike toks mažas, kad kinetinė energija, kurią įgauna judančios deformuojamo kūno dalelės, sudaro labai mažą išorinių jėgų darbo dalį. Kitaip tariant, išorinių jėgų darbas virsta į tampriąją potencinę energiją ir į šilumos energiją, susijusią su plastinėmis kūno deformacijomis. Medžiagų bandymas vadinamosiomis normaliomis sąlygomis vyksta veikiant statinėms apkrovoms.

Jei tempimo bandymai atliekami skirtingose temperatūrose, pasiliekant „normalių“ deformacijų greičių ribose, tai galima atitinkamame intervale gauti mechaninių charakteristikų priklausomybę nuo temperatūros. Ši priklausomybė lemiama vidinių kristalinių ir tarpkristalinių ryšių temperatūros pokyčių, o kai kuriais atvejais ir medžiagos struktūros pokyčių. Kuo aukštesnė temperatūra, tuo sunkiau nustatyti mechanines medžiagos charakteristikas. Tai vyksta ne vien dėl eksperimento technikos sudėtingumo, bet ir dėl to, kad pačios charakteristikos tampa sunkiau nustatomos, mažiau išreikštos.

Esant statinei apkrovai, pradedant nuo kai kurių temperatūros reikšmių, ryškiai pasireiškia laiko faktorius. Vienoms medžiagoms tai pasireiškia žemesnių temperatūrų intervale, kitoms žymiai aukštesnėse temperatūrose. Laiko faktoriaus įtaka pastebima ir normaliose temperatūrose. Bet metalams ši įtaka labai nepastebima ir į tai galime nekreipti dėmesio.

Deformacijų ir įtempimų pokytis, atsiradęs apkrautoje detalėje, vadinamas valkšnumu. Dalinis valkšnumo pasireiškimas – negrįžtamų deformacijų augimas,

esant pastoviai apkrovai. Kitas valkšnumo pasireiškimas yra relaksacija – savaiminis įtempimų pokytis laike, deformacijai nesikeičiant. Relaksacijos pavyzdys būtų srieginių jungčių atsilaisvinimas aukštose temperatūrose.

Pagrindinės medžiagos charakteristikos valkšnumo sąlygomis yra ilgalaikio stiprumo riba ir valkšnumo riba. Ilgalaikio stiprumo riba vadinama apkrovos, kuriai esant įvyksta ištempto bandinio suirimas per užduotą laiko tarpą, ir pradinio skerspjūvio ploto santykis. Tai reiškia, kad ilgalaikio stiprumo riba priklauso nuo užduoto laiko tarpo iki suirimo momento. Laiko tarpas parenkamas pagal detalės tarnavimo laiką ir kinta nuo dešimčių iki tūkstančių valandų. Atitinkamai pagal tokį platų laiko diapazono kitimą keičiasi ir ilgalaikio stiprumo riba. Didėjant laikui ji atitinkamai krenta. Valkšnumo riba vadinami įtempimai, kuriems esant plastinė deformacija per užduotą laiko tarpą pasiekia užduotą dydį. Kaip matome, norint nustatyti valkšnumo ribą, būtina užduoti laiko intervalą, kuris nustatomas pagal detalės eksploatacijos laiką ir leistinų deformacijų intervalą, lemiamą eksploatacijos sąlygų. Ilgalaikio stiprumo riba ir valkšnumo riba labai priklauso nuo temperatūros. Didėjant temperatūrai jų reikšmės mažėja.

100 000 valandų ilgalaikis stiprumas – pagrindinis veiksnys projektuojant konstrukcijas, kurioms būtina pasirinkti ribinius leistinus įtempius temperatūrų, kuriose pasireiškia medžiagos valkšnumas, diapazone. 100 000 valandų ilgalaikio stiprumo reikšmės gautos žymiai mažesnių laiko atžvilgiu bandymų rezultatų ekstrapoliacija. Bandymai dažniausiai atliekami 1000 valandų. Atlikus daugelį bandymų, nubrėžiamos kreivės – įtempių priklausomybė nuo laiko tam tikroje temperatūroje (Larson 1956). Daugelį metų matematiniai ekstrapoliacijos metodai buvo vystomi. Jie pagrįsti parametrais, kurie priklauso nuo įtempimų, temperatūros ir laiko. Jungtinių Amerikos Valstijų mokslininkų Larsono F. R. (Larson F. R.) ir Millerio I. (Miller I.) metodas buvo pirmas ir dažniausiai naudojamas (Furillo 1977). Daugelis kitų metodų buvo pasiūlyti norint patikslinti šį metodą. Temperatūros ir laiko parametras, kitaip Larsono–Millerio parametras, yra naudingas instrumentas apdorojant, susisteminant atsparumo valkšnumui duomenis. Iš esmės tai yra empirinė schema, kuri buvo sėkmingai gauta, atlikus eksperimentinių duomenų koreliaciją. Jos naudojimas tapo labai efektyvus tyrinėjant branduolinio kuro apvalkalus, dirbančius labai ekstremaliomis sąlygomis. Šis parametras padeda numatyti ribinius įtempius, veikiant ilgalaikėms apkrovoms. Pagrindinė Larsono-Millerio metodo sėkmės priežastis – tai, kad buvo atsitiktinai panaikintas vienas iš dviejų nepriklausomų kintamųjų, absoliuti temperatūra ir pridėti įtempiai, kuriuos galima valdyti, keisti atliekant valkšnumo bandymus (DiMelfi 1978). Jei eksperimentinis bandinys yra įtemptas aukštoje temperatūroje, tai po kurio laiko priklausomai nuo medžiagos parametrų bandinys suirs. Larsonas ir Milleris pateikė paprastą

matematinę priklausomybę, apimančią atsparumą valkšnumui, kuri savo ruožtu yra tik pridėtinės apkrovos, įtempių funkcija:

$$LMP = T\,(C + \log t) = f\,(\sigma), \qquad (1.1)$$

čia *LMP* – Larsono-Millerio parametras; T – temperatūra; C – specifinė medžiagos konstanta, labiausiai paplitusiems plienams ir lydiniams C = 20; t – laikas.

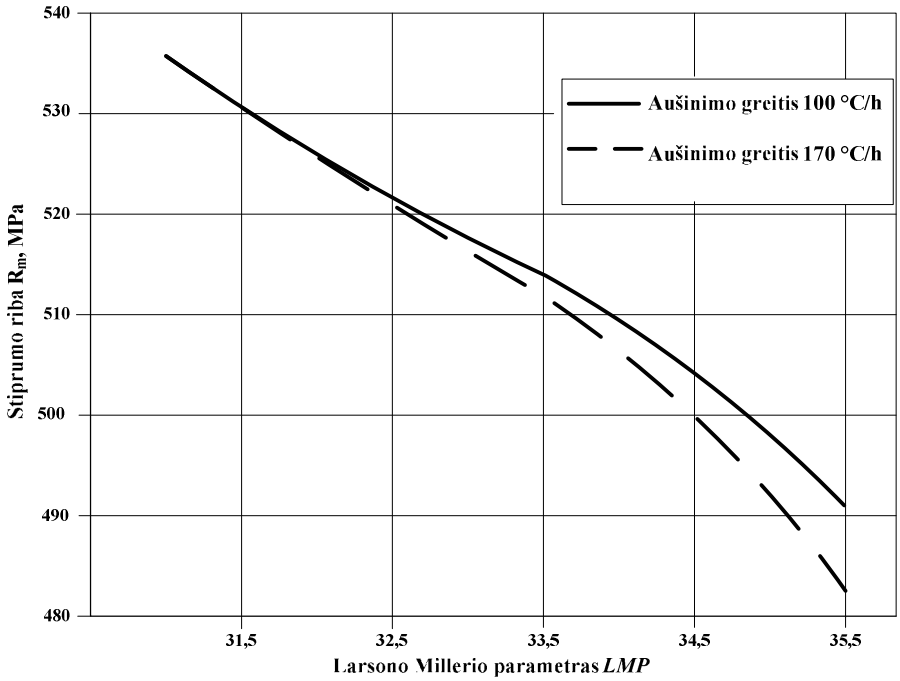
Pašalinus temperatūros priklausomybę galima nubrėžti valkšnumo kreives. Tai Larsono–Millerio metodo pagrindas. Kai funkcija f (σ) nubrėžta grafiškai, nepriklausomai nuo jos algebrinės formos, norint rasti įtempius, reikia žinoti *LMP*. Žinant *LMP*, galima apskaičiuoti eksploatacijos laiką, kaip temperatūros funkciją.

Neseniai *LMP* pradėtas taikyti terminio apdorojimo procesams. 2003 metų Suvirinimo mokslinių tyrimų tarybos (Welding research council) biuletenyje buvo publikuoti straipsniai (Upitis 2003; Orie 2003), kuriuose labai plačiai aprašyti konstrukcinio mažai legiruoto ASTM A516 Gr.70 plieno pagrindinio metalo ir suvirinimo siūlių stiprumo charakteristikų pokyčiai po terminio apdorojimo. Nustatyta stiprumo charakteristikų priklausomybė nuo temperatūros ir laiko parametro. Temperatūros ir laiko parametras, kitaip Larsono–Millerio parametras (*LMP*), buvo panaudotas ir metalų savybėms analizuoti po terminio apdorojimo. Šiuo atveju jis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$LMP = (T\ °F + 460)\,(20 + \log t) \cdot 10^{-4}, \qquad (1.2)$$

čia *LMP* – temperatūros ir laiko parametras (Larsono–Millerio); T – terminio apdorojimo temperatūra (Farengeito); t – terminio apdorojimo laikas valandomis.

K. Orie išanalizavo įvairius duomenis, gautus iš *Chicago Bridge and Iron* metalų tyrimų laboratorijų. Buvo pastebėta ryškių stiprumo charakteristikų pokyčių keičiant *LMP* parametro reikšmes. Išanalizavus tyrimų rezultatus nustatyta, kad padidinus *LMP* smūgio energijos reikšmės mažėja. Takumo ir tempimo stiprumo ribos sumažėja 7,6 ir 11,7 MPa, atitinkamai kiekvienam *LMP* skaičiaus padidėjimo vienetui (1.13, 1.14, 1.15 pav.) (Orie 2003). Sunkumų analizuojant šiuos duomenis atsirado dėl įvairių skaičiavimo kintamųjų, ypač dėl cheminių, difuzinių procesų terminio apdorojimo metu, kurių neįmanoma realiai įvertinti.



1.13 pav. Plieno A516 Gr.70 38 mm storio lakšto stiprumo ribos priklausomybė nuo Larsono-Millerio parametro (Orie 2003)
Fig. 1.13. Tensile strength dependence of the Larson-Miller parameter, steel A516 Gr.70, 38 mm thick sheet (Orie 2003)

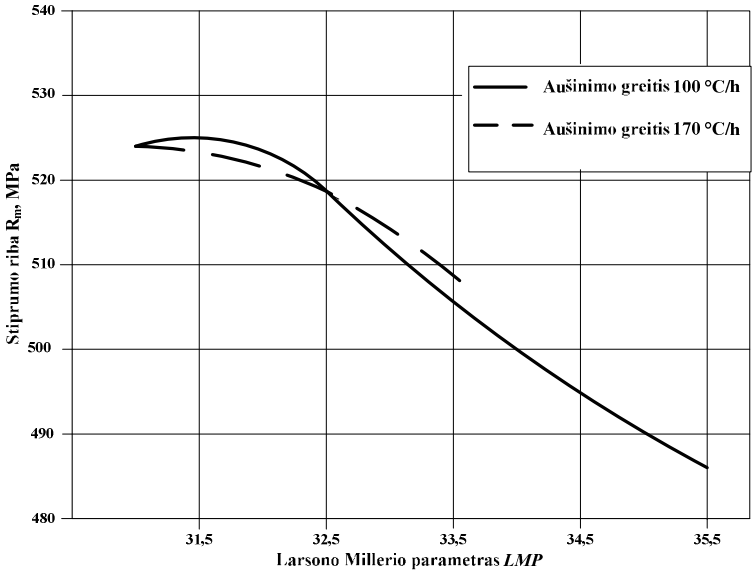
Brūkšninė linija reiškia bandymų rezultatus, kai plieno bandiniai po terminio apdorojimo buvo aušinami maksimaliu leistinu greičiu, ne didesniu, nei leidžia ASME standartas, 170 °C/h. Vientisa linija – bandiniai aušinami ne didesniu nei 100 °C /h greičiu.

Gamintojai, įvertindami savo galimybes tenkinti tam tikrus techninius reikalavimus, turi atsižvelgti į šiuos charakteristikų pablogėjimo padarinius.

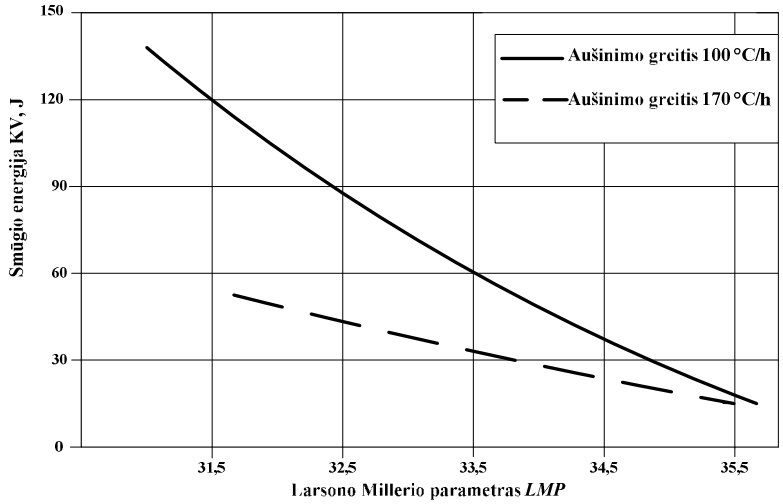
Europos norminiuose dokumentuose naudojamas temperatūros ir laiko parametras *P*, pagal taikymą ir apskaičiavimo metodiką analogiškas Larsono-Millerio parametrui *LMP*. *P* apskaičiuojamas pagal formulę (LST EN 13445):

$$P = \mathrm{T}\,(20 + \lg \mathrm{t}) \cdot 10^{-3}, \qquad (1.3)$$

čia T – terminio apdorojimo temperatūra (Kelvino); t – išlaikymo laikas (h).



1.14 pav. Plieno A516 Gr.70 75 mm storio lakšto stiprumo ribos priklausomybė nuo Larsono-Millerio parametro (Orie 2003).
Fig. 1.14. Tensile strength dependence of the Larson-Miller parameter, steel A516 Gr.70, 70 mm thick sheet (Orie 2003)



1.15 pav. Plieno A516 Gr.70 smūgio energijos priklausomybė nuo Larsono-Millerio parametro, esant +10 °C temperatūrai (Orie 2003)
Fig. 1.15. Impact energy dependence of the Larson-Miller parameter, steel A516 Gr.70, at +10 °C (Orie 2003)

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių optimalios mechaninės savybės, t. y. didelis stiprumas, esant pakankamai aukštai smūginio tąsumo reikšmei, gali būti pasiekiamas tik po terminio apdorojimo.
2. Ilgą laiką aukštoje temperatūroje eksploatuotuose chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo plienuose nustatyti struktūriniai pokyčiai ir savybių degradacija.
3. Suvirintųjų jungčių savybių degradacijos procesą gali paspartinti netinkamas terminis apdorojimas. O tai neįvertinama, atliekant konstrukcijų skaičiavimus ilgalaikiam stiprumui.
4. Chromo-molibdeno plienų suvirintųjų jungčių vidiniams įtempiams sumažinti gali būti taikomas tik terminis apdorojimas. Kiti įtempių sumažinimo metodai šiems plienams yra nepriimtini.
5. Chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo plienų terminio apdorojimo temperatūra turi būti ne žemesnė kaip 600 °C. Tik nuo šios temperatūros pastebima akivaizdi martensito rekristalizacija.
6. Atlikus norminiuose dokumentuose rekomenduojamų 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo parametrų analizę pastebėta, kad taikomi pakankamai intensyvūs režimai, o tai gali pabloginti jungčių mechanines savybes.
7. Nėra duomenų apie 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių mechaninių savybių priklausomybės nuo parametro P tyrimus. Daugelis mokslininkų tiria ilgą laiką eksploatuotų plienų savybes laikydami, kad suvirintosios jungties savybės pagaminus įrenginį buvo lygiavertės pagrindiniam metalui. Bet šių tyrimų rezultatai gali būti netikslūs, nes suvirintojoje jungtyje jau gali būti išprovokuota savybių degradacija, net nepradėjus įrenginio eksploatuoti. Todėl būtina nustatyti optimalius suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo parametrus, kad jungčių mikrostruktūra ir mechaninės savybės būtų lygiavertės pagrindinio metalo savybėms.
8. Temperatūros ir laiko parametras P gali būti sėkmingai naudojamas ne tik plienų eksploatacijos laikui nustatyti, bet ir suvirintųjų jungčių mechaninėms savybėms prognozuoti po terminio apdorojimo. Eksperimentiškai nustačius terminio apdorojimo P ir mechaninių savybių priklausomybes, galima nustatyti optimalius terminio apdorojimo parametrus.

2

Tyrimų metodika

2.1. Bandinių paruošimas tyrimams

Buvo tiriamos 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plieno suvirintosios jungtys ir šios grupės plieno naujo ir eksploatuoto vamzdžio metalas. Suvirintųjų jungčių ir naujo, neeksploatuoto metalo tyrimams buvo panaudotas P5 (ASTM A335) plieno vamzdis Ø219×15. P5 vamzdžių metalo cheminė sudėtis parodyta 2.2 lentelėje, duomenys paimti iš gamintojo pateikto kokybės sertifikato. Eksploatuoto metalo tyrimams buvo panaudotas 100 000 valandų, 530 °C temperatūroje dirbęs Ø550×25, 15X5M (GOST 20072) plieno vamzdis. Metalo cheminė sudėtis parodyta 2.3 lentelėje.

Tiriami bandiniai:

- Nr. 1÷14 – suvirinti ir po suvirinimo termiškai apdoroti taikant skirtingus terminio apdorojimo parametrus P5 plieno bandiniai (2.1 lentelė).
- Nr. 0 – P5 plieno vamzdžio tik suvirintas bandinys, be terminio apdorojimo;
- A – P5 (ASTM A335) plieno vamzdis Ø219×15;
- B – 100 000 valandų, 530 °C temperatūroje eksploatuotas 15X5M plieno vamzdis.

2.1 lentelė. Bandinių terminio apdorojimo parametrai
Table 2.1. Heat treatment parameters of specimens

Bandinio Nr.	Įkaitinimo / aušinimo greitis, °C/h	Temperatūra, °C (K)	Išlaikymo laikas, h	Temperatūros ir laiko parametras *P*
1	50 / 100	500 (773,15)	1	15,46
2	50 / 100	550 (823,15)	1	16,46
3	50 / 100	600 (873,15)	1	17,46
4	50 / 100	650 (923,15)	1	18,46
5	50 / 100	700 (973,15)	1	19,46
6	50 / 100	750 (1023,15)	1	20,46
7	50 / 100	500 (773,15)	8	16,16
8	50 / 100	550 (823,15)	8	17,21
9	50 / 100	600 (873,15)	8	18,25
10	50 / 100	650 (923,15)	8	19,3
11	50 / 100	700 (973,15)	8	20,34
12	50 / 100	750 (1023,15)	8	21,4
13	50 / 100	780 (1053,15)	7	21,95
14	50 / 100	800 (1073,15)	7	22,37

Suvirintųjų jungčių tyrimams atliktas rankinis lankinis suvirinimas nelydžiu volframiniu elektrodu argono dujų aplinkoje su pridėtine viela (procesas 141 LST EN 24063). Suvirinimo vielos tipas – EN12070: W CrMo5 Si. Suvirinimo vielos

markė – BÖHLER CM 5-IG, gamintojas – *Böhler Schweßtechnik Austria*. Suvirinimo vielos prilydyto metalo cheminė sudėtis ir mechaninės savybės 2.4 ir 2.5 lentelėse (gamintojo informacija). Suvirinimas atliktas naudojant išankstinį pašildymą 350 °C, tarpėjiminė temperatūra taip pat ne žemesnė kaip 350 °C. Terminis apdorojimas atliktas iškart po suvirinimo. Terminio apdorojimo parametrai pasirinkti pagal literatūros analizės išvadas, atliktas naudojant išankstinį pašildymą 350 °C, tarpėjiminė temperatūra taip pat ne žemesnė kaip 350 °C. Terminis apdorojimas atliktas iškart po suvirinimo. Terminio apdorojimo parametrai pasirinkti pagal literatūros analizės išvadas. Kiekvienam terminio apdorojimo procesui apskaičiavome temperatūros ir laiko parametrą *P* pagal 1.3 formulę.

2.2 lentelė. P5 plieno cheminė sudėtis
Table 2.2. Chemical composition of P5 steel

Elementų kiekis (masės dalis), %						
C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
0,09	0,34	0,36	4,63	0,48	0,011	0,005

2.3 lentelė. 15X5M plieno cheminė sudėtis
Table 2.3. Chemical composition of 15X5M steel

Elementų kiekis (masės dalis), %						
C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
0,09	0,38	0,43	5,3	0,49	0,010	0,017

2.4 lentelė. BÖHLER CM5-IG prilydyto metalo cheminė sudėtis
Table 2.4. BÖHLER CM5-IG chemical composition of weld metal

Elementų kiekis (masės dalis), %				
C	Si	Mn	Cr	Mo
0,08	0,4	0,5	5,8	0,6

2.5 lentelė. BÖHLER CM 5-IG prilydyto metalo mechaninės savybės +20 °C temperatūroje
Table 2.5. BÖHLER CM5-IG mechanical properties of weld metal at +20 °C

Stiprumo riba R_m, N/mm^2	Takumo riba R_e, N/mm^2	Santykinis pailgėjimas A_5, %	Smūgio darbas ISO-V KV, J
620	510	20	200

2.2. Tyrimų ir analizės apimtis

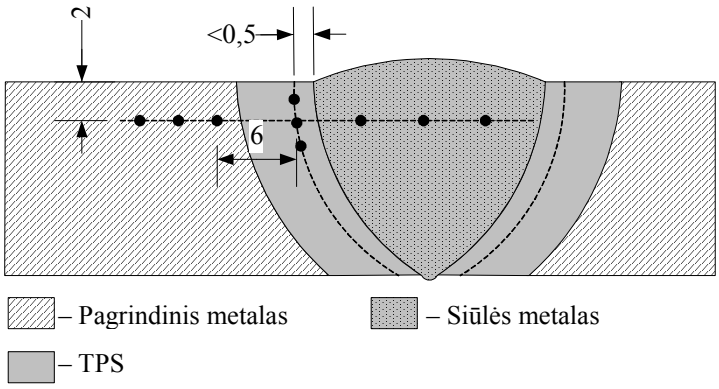
Atlikti tokie tyrimai:
- suvirintų bandinių radiografinė kontrolė;
- mechaninių savybių nustatymo bandymai (kietumo bandymas, tempimo bandymas, smūginio tąsumo bandymas);
- tempimo ir smūgio bandymų lūžių analizė, fraktografija;
- mikrostruktūros tyrimas;
- lyginamoji analizė ir skaičiavimo metodų taikymas.

2.2.1. Radiografinė kontrolė

Radiografinė kontrolė atliekama tam, kad būtų galima užtikrinti kitų bandymų rezultatų patikimumą, norint išvengti virintinės siūlės vidinių defektų įtakos. Suvirintų bandinių radiografinė kontrolė atlikta pagal LST EN1435 „Virintinių siūlių neardomoji kontrolė. Suvirintųjų sujungimų radiografinė kontrolė“ nurodytą metodiką. Įvertinimas atliekamas LST EN 12517 „Virintinių siūlių neardomoji kontrolė. Suvirintųjų jungčių radiografinė kontrolė. Priėmimo lygmenys“. Radiografinė kontrolė atlikta aparatu РАПАН 200/100 (Rusija). Visuose tirtuose bandiniuose defektų, galinčių paveikti mechanines savybes, nenustatyta. Suvirintosios jungtys atitinka LST EN25817, B lygio techninius reikalavimus.

2.2.2. Kietumo tyrimas

Atlikti bandinių kietumo matavimai. Kietumo bandymas atliktas prietaisu MIC 20 KRAUTKRAMER, matavimo skalė HB, matavimo paklaida 1 %. Kietumo matavimo taškų išdėstymas parodytas 2.1 paveiksle. Pagal ASME B31.3-2006 plieno P5 suvirintųjų jungčių kietumas ne didesnis už 241 HB.



2.1 pav. Kietumo matavimo schema
Fig. 2.1. Hardness test scheme

2.2.3. Tempimo bandymas

Sandūrinių suvirintųjų jungčių skersinio tempimo bandymai atliekami pagal LST EN 895. Vamzdžių, kurių skersmuo didesnis nei 50 mm, suvirinimo siūlės perteklinis metalas turi būti pašalintas iš abiejų pusių, kad bandinio storis atitiktų vamzdžio sienelių storį. Bandiniai pjaunami mechaniniu būdu. Iš kiekvienos suvirintosios jungties išpjauta po 2 bandinius. Tempiamo bandinio stiprumas turi būti ne mažesnis už mažiausią pagrindinio metalo stiprumo reikšmę.

Metalo stiprumas, veikiant statinei apkrovai, vertinamas laikinojo stiprumo riba R_m arba takumo ribomis R_e, $R_{p0,2}$ (MPa):

$$\mathrm{R_{p0,2}} = \frac{\mathrm{F_{0,2}}}{\mathrm{S}}; \quad \mathrm{R_e} = \frac{\mathrm{F_e}}{\mathrm{S}}, \qquad (2.1); (2.2)$$

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S}, \qquad (2.3)$$

čia F_{max} – didžiausia jėga, užfiksuota tempiant bandinį, F_e – jėga, kuriai veikiant metalas pradeda deformuotis plastiškai, nedidinant apkrovos, $F_{0,2}$ – jėga, kuriai veikiant liekamasis tempiamo bandinio ilgėjimas sudaro 0,2 % pradinio skaičiuojamojo ilgio, S – pradinis tempiamo bandinio skerspjūvio plotas, R_e – fizinė metalo takumo riba, $R_{p0,2}$ – sąlyginė takumo riba. R_e kriterijumi vertinama tada, kai metalo takumo riba ryški, $R_{p0,2}$ – kai metalas neturi ryškios takumo ribos. Bandymai atliekami universalia tempimo-lenkimo bandymų mašina МИРИ 500К (ООО НИКЦИМ Точмашприбор, Rusija).

2.2.4. Smūginio tąsumo bandymas

Smūginio tąsumo bandiniai ir bandymas atitika LST EN ISO 15614-1 standarto reikalavimus dėl bandinių padėties ir bandymo temperatūros, taip pat LST EN 875 reikalavimus dėl matmenų ir bandymo. Smūginio tąsumo kriterijai rodo metalo sugebėjimą priešintis smūginėms apkrovoms. Smūginis tąsumas KC (J/cm^2) išreiškiamas:

$$KC = \frac{K}{S}, \tag{2.4}$$

čia K – darbas, sunaudotas bandinio suardymui, veikiant smūginei apkrovai, S – bandinio skerspjūvio plotas.

Smūginio tąsumo nustatymui naudojami standartinių matmenų bandiniai su U, V arba T formos įpjovomis. Pagal tai, kokios formos įpjova buvo padaryta bandinio vidurinėje dalyje, smūginis tąsumas žymimas KCU, KCV, KCT. Metalų trapaus suirimo tikimybė didėja, žemėjant temperatūrai. Atliekant bandymus buvo nustatomas KCV.

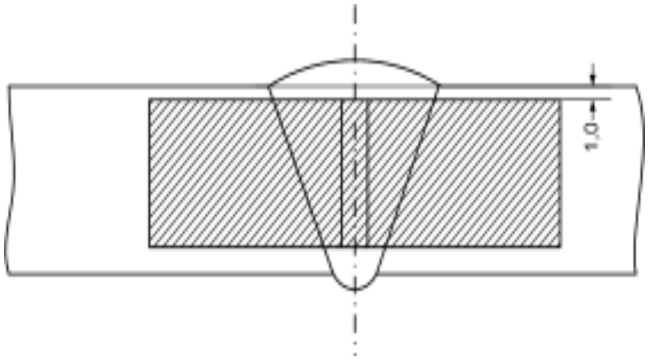
Bandymai atlikti kambario ir 0 °C temperatūroje. Chromo-molibdeno plieno vamzdynai ir kita įranga eksploatuojama aukštose temperatūrose, todėl smūgio bandymus atlikti minusinėje temperatūroje netikslinga. Šių įrenginių elementai gali būti veikiami slėgio 0 °C temperatūroje tik tuo atveju, kai žiemą atliekami stiprumo, sandarumo bandymai arba pradedama jų eksploatacija.

Bandymai atliekami smūginiu švytuokliniu muštuvu 2010KM-30 (Точприбор, Rusija).

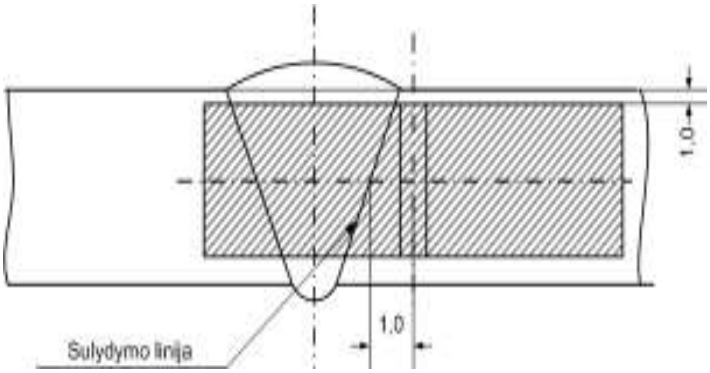
Kiekvienam suvirintosios jungties bandiniui atlikti 3 smūginio tąsumo bandymai siūlės metalui ir 3 bandymai terminio poveikio sričiai, kambario ir 0 °C temperatūroje. Siūlės metalui tirti naudojamas VWT 0/1 bandinio tipas (2.2 pav.): V – Šarpio bandiniai su V įpjova, W – įpjova siūlės metale, T – šoninė įpjova per visą storį, 0/1 – įpjova per siūlės ašinę liniją, bandinio paviršius 1 mm atstumu nuo sujungimo paviršiaus.

Terminio poveikio sričiai tirti naudojami VHT 1/1 tipo bandiniai (2.3 pav.):

V – Šarpio bandiniai su V įpjova, H – įpjova terminio poveikio srityje, T – šoninė įpjova per visą storį, 1/1 – įpjova 1 mm nuo sulydymo linijos, bandinio paviršius 1 mm atstumu nuo sujungimo paviršiaus.



2.2 pav. VWT bandinio išpjovimo vieta
Fig. 2.2. VWTspecimen location



2.3 pav. VHT bandinio išpjovimo vieta
Fig. 2.3. VHT specimen location

2.2.5. Tempimo ir smūgio bandymų lūžių analizė, fraktografija

Lūžių analizė naudojama medžiagų kokybės kontrolei po įvairių apdirbimo būdų – liejimo, karšto deformavimo, terminio ir termocheminio apdirbimo ir kt., taip pat po eksploatacijos įvairiomis sąlygomis.

Lūžių analizei naudojamos metodikos (Hull 1999):

- makroskopinė fraktografija – paviršių tyrimas paprasta akimi arba padidinus vaizdą 20–60 kartų,
- mikroskopinė fraktografija – paviršių tyrimas optiniais ir elektroniniais mikroskopais,

- irimo paviršiaus geometrijos matavimas (šiurkštumo ir elementarių plotelių orientacijos nustatymas),
- irimo paviršiaus fotometravimas,
- lokalinis fazinės sudėties, kristalinės gardelės iškraipymų, mechaninių ir fizinių savybių tyrimas lūžyje įvairiais tyrimo metodais.

Bandinių tyrimams taikyta makroskopinė fraktografija ir mikroskopinė fraktografija. Lūžių tyrimui plačiai naudojami elektroniniai mikroskopai. Tiriant lūžius elektroniniais mikroskopais nustatyta, kad tik išimtiniais atvejais medžiaga yra pagal vieną mechanizmą. Paprastai vienas mechanizmas vyrauja (trapus, grūdelinis, tarpgrūdelinis, plastiškas ir t. t.), kitas sukelia ir palaiko irimą. Pavyzdžiui, trapus metalų irimas iš esmės yra paruošiamas ir lydimas nežymios plastinės deformacijos. Tiriamajame darbe naudojamas nuskaitantis elektroninis mikroskopas Hitachi S-2600N, kurio skiriamoji geba 5,0 nm, greitinančioji įtampa 30 kV.

Irimo paviršius charakterizuojamas tokiais elementais: fasetės, duobutės, laipteliai, grioveliai, liežuvėliai, atplėšimo keteros (ASM 1987). Toliau pateikiami tiriamajame darbe fraktogramų analizei naudojamų terminų paaiškinimai.

Fasetės yra paviršiaus plotai su mažu mikroreljefu ir apibrėžtomis ribomis. Fasetės ribose medžiaga yra viena kryptimi. Stebint optiniu mikroskopu, fasetės matomos kaip blizgantys plotai. Fasetės susidaro esant trapiam ir tąsiam tarpgrūdeliniui irimui arba trapiam grūdeliniui ir kvazitrapiam irimui.

Duobutės – irimo paviršiaus elementai, matomos kaip mikroporos. Susidaro plastiškai tekant metalui. Mikroporų židiniai yra nemetaliniai intarpai arba antros fazės mikronevienodumai grūdelių, subgrūdelių ribose ir poslinkio plokštumose.

Laiptelis yra trapaus ir kvazitrapaus irimo elementas, susidarantis susijungus irimo paviršiams, esantiems skirtinguose lygiuose.Jis taip pat gali susidaryti skylant išilgai dvilinkio ribos. Dažniausiai laipteliai susidaro susijungus dviem skilimo fasetėms (skilimo laipteliai).

Griovelis – skilimo ir kvaziskilimo fasečių paviršių sandaros elementas, susidarantis suyrant sąramoms tarp fasečių, išsidėsčiusių artimiausiose lygiagrečiose viena kitai kristalografinėse plokštumose. Gaunama susijungiančių skilimo laiptelių sistema, išsidėsčiusi skilimo plokštumoje tam tikru kampu tempimo įtempimų krypties atžvilgiu. Skilimo laiptelių susiliejimo į griovelį kryptis sutampa su plyšio plitimo kryptimi.

Liežuvėliai – skilimo fasečių trikampės arba trapecinės formos elementai, susidarę dėl lokalinio irimo išilgai matricos ir dvilinkio skyrimo paviršiaus. Matomi esant grūdeliniam trapiam ir kvazitrapiam irimui.

Atplėšimo krateriai susidaro plastiškai deformuojant ir suardant sąramas tarp kitų lūžio elementų. Matomi kaip ištęsti iškilimai virš irimo paviršiaus. Pastebimi esant grūdeliniam tąsiam ir kvazitrapiam irimui.

Skilimas yra trapaus irimo mechanizmas, kai metalas perskiriamas pagal plokštumas, sutampančias su grūdelių kristalografinėmis plokštumomis (grūdelinis skilimas), arba pagal grūdelių ribų plokštumines dalis (tarpgrūdelinis skilimas). Irimo paviršius susideda iš grūdelių dydžio fasečių, praktiškai nepastebima plastinė deformacija.

Kvaziskilimas yra grūdelinio kvazitrapaus irimo mechanizmas, charakterizuojamas metalo perskyrimu pagal plokštumas, nesutampančias su kristalografinėmis plokštumomis. Irimo paviršius susideda iš fasečių, kurių dydis mažesnis už grūdelių dydį,pastebima silpnai išreikšta plastinė deformacija.

Mikrotuštumų susiliejimas yra grūdelinio ir tarpgrūdelinio tąsaus suirimo mechanizmas, charakterizuojamas metalo perskyrimu, susidarant, augant ir susiliejant mikroporoms plastiškai tekant metalui. Irimo paviršius plastiškai deformuotas su duobėtu mikroreljefu.

Tempimo bandymų lūžių plastiškumui vertinti galima taikyti plastiškumo rodiklį R_L, lūžio paviršiaus ploto ir suirusio bandinio skerspjūvio ploto irimo vietoje santykį. Kai R_L lygus vienetui, tai reiškia, kad medžiaga idealiai trapi. Kuo šis rodiklis didesnis, tuo medžiaga plastiškesnė. Šiame darbe lūžio plotai vertinami tik vizualiai.

Priklausomai nuo susidarymo sąlygų ir priežasčių lūžiai pagal irimo paviršiaus morfologiją skirstomi į tris grupes:

1. pluoštiniai ir kristaliniai lūžiai;
2. lūžiai, kurių susidarymą nulemia metalo nevienodumas;
3. lūžiai, kuriuose pasireiškia metalo defektai.

Konstrukcinių plienų tipiniai lūžiai yra pluoštiniai ir kristaliniai. Pluoštiniai lūžiai skirstomi į ypatingai pluoštinius, į sausus pluoštinius ir nevienalyčius pluoštinius.

Pluoštinis lūžis charakterizuojamas vienalyčiu tąsiu grūdelinio irimo paviršiumi aiškiai išreikšta pagal visą plotą plastine deformacija. Irimo paviršius matinis (be metalinio blizgesio), tamsiai pilkos spalvos. Lūžio šonuose yra susiaurėjimai, kurie didėja didėjant metalo tąsumui. Padidinus (daugiau 30–50 kartų) lūžyje matomas duobėtas mikroreljefas. Plienas, turintis stabilų pluoštinį lūžį, charakterizuojamas geriausiomis mechaninėmis savybėmis, palyginti su plienais, turinčiais kitų tipų lūžius.

Sausas pluoštinis lūžis charakterizuojamas vienalyčiu tąsiu grūdelinio irimo paviršiumi su mažiau išreikšta plastine deformacija. Irimo paviršius matinis, šviesiai pilkos spalvos. Irimas vyksta per grūdelius, bet, kitaip nei pluoštinio lūžio, mažiau deformuojami grūdeliai. Sauso pluoštinio lūžio reljefas mažiau

išreikštas, susiaurėjimas nežymus. Susidaro po grūdinimo ir žemo atleidimo. Po grūdinimo ir aukšto atleidimo sausas pluoštinis lūžis gali susidaryti esant atleidimo trapumui arba kai grūdinant iš austenito susidaro nemartensitiniai virsmo produktai. Pakartotinis aukštai atleisto plieno terminis apdirbimas lemia pluoštinio lūžio susidarymą.

Nevienalytis pluoštinis lūžis charakterizuojamas nevienalyčiu tąsaus irimo paviršiumi su pluoštine sandara ir aiškiai išreikštais plastinės deformacijos požymiais. Pasireiškia deformuotuose plienuose pasižyminčiais makrostruktūriniais nevienodumais. Lūžio paviršiuje pastebimi ilgi iškilimai ir įdubimai, išsidėstę eilėmis, lygiagrečiomis deformavimo krypčiai. Gali būti matomi išplėšimai ir įdubimai su lygiomis sienelėmis, lygiagrečiomis deformavimo plokštumai. Taip pat lūžio paviršiuje gali būti pastebimi žvynai su lygiu paviršiumi, ištęstu išilgai deformavimo krypties. Plienuose su nevienalyčiu pluoštiniu lūžiu pastebima mechaninių savybių anizotropija, ypač smūginio tąsumo bandymuose.

Kristaliniai lūžiai skirstomi atsižvelgiant į fasečių dydį, priklausantį nuo grūdelių dydžio. Būna ypatingai kristaliniai ir smulkiakristaliniai lūžiai.

Ypatingai kristalinis lūžis charakterizuojamas vienalyčiu trapaus irimo kristalinės sandaros paviršiumi be žymių makroplastinės deformacijos požymių. Susidaro žemiau kritinių trapumo temperatūrų, irimo paviršius šviesiai pilkas. Kristalinio lūžio metu metalas yra pagal grūdelių ribas arba pagal grūdelių kristalografines plokštumas, o tai lemia metalinį blizgesį. Lūžio šonuose susiaurėjimo nėra arba jis būna labai mažas. Daug padidinus irimo paviršiuje matomos skilimo, kvaziskilimo arba tarpgrūdelinio irimo fasetės.

Plieno, turinčio kristalinį lūžį, smūginis tąsumas yra blogas, palyginti su tuo pačiu plienu, turinčiu pluoštinį lūžį. Kuo stambesni austenito grūdeliai, tuo trapesnis plienas.

Smulkiakristalinis lūžis yra kristalinis lūžis su smulkiagrūdeline sandara. Irimo paviršius matinis be makroplastinės deformacijos požymių, kristalinė lūžio sandara vizualiai sunkiai pastebima. Plienai su smulkiakristaliniu lūžiu pasižymi pažemintu plastiškumu ir smūginiu tąsumu, esant pakankamai dideliam stiprumui.

Antrai grupei priklauso lūžiai, kurių sandara skiriasi nuo pluoštinių ir kristalinių lūžių, jų susidarymą lemia metalo sandaros nevienodumas:

- cheminis mikronevienodumas (dendritinis lūžis, skilimai dendritiniame lūžyje, šiferinis lūžis, šviesios juostos lūžyje),
- cheminis makronevienodumas (baltos dėmės lūžyje ir juodas lūžis),
- aukštų temperatūrų poveikis (naftalininis, akmeninis).

Trečios grupės lūžių susidarymą lemia defektai, esantys metale:

- skysto metalo tūrio sumažėjimas jam kristalizuojantis (susitraukimo tuštumos, porėtumas),

- porėtumas liejiniuose, susidaręs sumažėjus dujų tirpumui kristalizuojantis skystam metalui (žemiškas lūžis),
- susisluoksniavimas, gautas deformuojant metalą su netolygumais (susisluoksniavimas, medžio tipo lūžis),
- įtrūkimai, susidarantys padidėjus dujų, daugiausia vandenilio, kiekiui (flokenai, šviesios dėmės);
- įtrūkimai, susidarantys dėl vidinių metalo įtempimų (terminiai įtrūkimai, deformaciniai įtrūkimai),
- metalo mikronelygumai, užsivirinę karštai jį deformuojant (sidabrinės linijos).

2.2.6. Mikrostruktūros tyrimai

Suvirintųjų jungčių, taip pat eksploatuoto ir naujo vamzdžio metalo mikrostruktūros tyrimai atlikti:

- optinės mikroskopijos metodu. Tyrimai atlikti optiniu mikroskopu Nikon Epiphot 200 (objektyvo lęšis 50x; okuliaras 10x). Daromos šviesaus lauko nuotraukos. Bandiniai buvo poliruoti ir ėsdinami pikrino rūgšties tirpalu;
- nuskaitančiosios elektroninės mikroskopijos metodu. Tyrimas buvo atliktas mikroskopu Hitachi S-2600N, kurio skiriamoji geba 5,0 nm, greitinančioji įtampa 30 kV. Tokios pat greitinančiosios įtampos ir skiriamosios gebos mikroskopu Hitachi S-3500N su EDS spektrometru buvo nustatyta mikrostruktūroje matomų dalelių cheminė sudėtis. Taip pat dalelių, karbidų sudėtis buvo tiriama mikroskopu Hitachi S-5500 su EDS, kurio skiriamoji geba 0,4 nm, greitinančioji įtampa 30 kV.

Analizuojant mikrostruktūros tyrimų rezultatus nustatomos suvirintųjų jungčių mechaninių savybių pokyčių priežastys.

2.2.7. Lyginamoji analizė ir skaičiavimo metodų taikymas

Visų bandinių tyrimų rezultatai palyginami su norminiuose dokumentuose (ASME B31.3, EN 13480) nurodytais priimtinumo kriterijais. Taip atrenkami bandiniai, kurių mechaninės savybės yra priimtinos eksploatacijai, tai reiškia, kad šių bandinių terminio apdorojimo parametrai taip pat yra priimtini. Suvirintų bandinių mechaninių savybių ir mikrostruktūros palyginimas su eksploatuoto ir naujo vamzdžio bandinių mechaninėmis savybėmis taip pat leidžia nustatyti, kurių bandinių savybės yra priimtinos, artimos naujo ar eksploatuoto ilgą laiką plieno savybėms.

Iš gautų mechaninių bandymų rezultatų sudaromos grafinės mechaninių savybių priklausomybės nuo terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parametro *P*. Analizuojant šias priklausomybes nustatomos optimalios *P*

reikšmės. Iš 1.3 formulės išsireiškiama temperatūra T (2.5) ir išlaikymo laikas t (2.6). Optimalią *P* reikšmę perkėlę į 2.5 ir 2.6 išraiškas, gausime empirines 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo temperatūros ir laiko nustatymo formules.

$$T = \frac{P \times 10^3}{20 + \lg t}, \tag{2.5}$$

$$t = 10^{(Px1000/T)-20}. \tag{2.6}$$

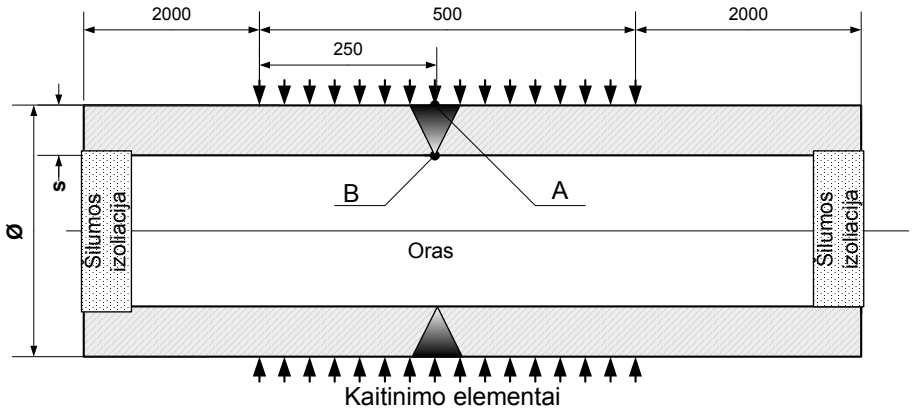
Į 2.5 ir 2.6 formules perkėlus suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo optimalias temperatūros ir laiko parametro reikšmes, sudaroma tiriamų plienų suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parinkimo nomograma.

2.5 ir 2.6 išraiškose nėra įvertinti termiškai apdorojamos suvirintosios jungties matmenys, todėl gali būti, kad reikia padidinti išlaikymo laiko trukmę, kad suvienodintume temperatūrą visame jungties skerspjūvyje. Panaudojus ANSYS programinę įrangą, baigtinių elementų skaičiavimo metodu nustatomas temperatūros pasiskirstymas visame chromo-molibdeno plienų suvirintosios jungties skerspjūvyje terminio apdorojimo metu. Taip galima nustatyti, kiek laiko reikia, kad temperatūra susivienodintų per visą jungties skerspjūvį įvairaus sienelės storio gaminiuose. 2.4 pav. parodytas sudarytas terminio apdorojimo modelis. Buvo parinkti skirtingo skersmens ir sienelės storio modeliai:

Ø – 219 mm; 375 mm; 550 mm; 1000 mm;

S – 13 mm; 20 mm; 25 mm; 50 mm; 70 mm.

Modelis sudarytas pagal praktikoje taikomą vamzdyno suvirintųjų jungčių lokalinio terminio apdorojimo lanksčiais kaitinimo elementais technologiją. Dėl vamzdynų geometrinių matmenų ir konfigūracijos neįmanoma atlikti tūrinio terminio apdorojimo. Kaitinimo elementai montuojami tik iš išorinės vamzdžio pusės, vamzdžio galai yra užsandarinami oro srautą ir šilumą izoliuojančia medžiaga. Terminio apdorojimo temperatūra kontroliuojama kontaktinėmis termoporomis. Temperatūra matuojama tik iš išorinės vamzdžio sienelės pusės (2.4 pav., taškas A), o temperatūra vidinėje vamzdžio sienelės dalyje nežinoma (2.4 pav., taškas B).



2.4 pav. Vamzdžio suvirintosios jungties terminio apdorojimo modelis
Fig. 2.4. Pipe post-weld heat treatment model

Skaičiavimais nustatomos chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo plieno vamzdžio suvirintosios jungties temperatūrų reikšmės taškuose A ir B terminio apdorojimo metu, kai vyksta kaitinimas užduota kaitinimo sparta.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Taikant skyriuje nurodytas tyrimų metodikas sudaromos suvirintųjų jungčių mechaninių savybių (stiprumo, takumo ribos, kietumo, smūginio tąsumo) ir temperatūros ir laiko parametro *P* tarpusavio priklausomybės.
2. Analizuojant priklausomybes nustatomos tokios *P* reikšmės, kurioms esant tiriamo plieno suvirintųjų jungčių mechaninių savybių reikšmės yra optimalios. Tai reiškia, kad nustatomos optimalios 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parametro *P* reikšmės.
3. Bandinių lūžių fraktografija ir mikrostruktūros tyrimai leidžia paaiškinti mechaninių savybių pokyčių priežastis. Taip pat šiais bandymais nustatomos suvirintųjų jungčių struktūrinių pokyčių sąlygos. Nustatoma, nuo kokios temperatūros prasideda martensito virsmas į plastiškesnę struktūrą, kada įvyksta visiška transformacija. Tai labai svarbu žinoti atliekant 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių terminį apdorojimą.
4. Nustačius optimalų 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parametro *P* reikšmių intervalą, sudaroma grafinė 5 % Cr–0,5 % Mo plieno terminio apdorojimo

temperatūros ir išlaikymo laiko tarpusavio priklausomybė – nomograma, kurią taikant gamyboje galima užtikrintai gauti optimalių mechaninių savybių jungtis.

5. Nomogramos reikšmė yra ta, kad gamyboje įvertinant ekonomiškumo aspektus ir įrangos pajėgumus galima nesunkiai pasirinkti terminio apdorojimo parametrus, nesusilpninant jungties eksploatacinių charakteristikų.

3

Tyrimų rezultatai ir jų analizė

Šiame skyriuje aprašyta eksperimentų atlikimo eiga, gauti rezultatai ir jų aptarimas.

Skyriaus medžiaga publikuota septyniuose autoriaus straipsniuose (Kumšlytis 2005, 2007, 2008).

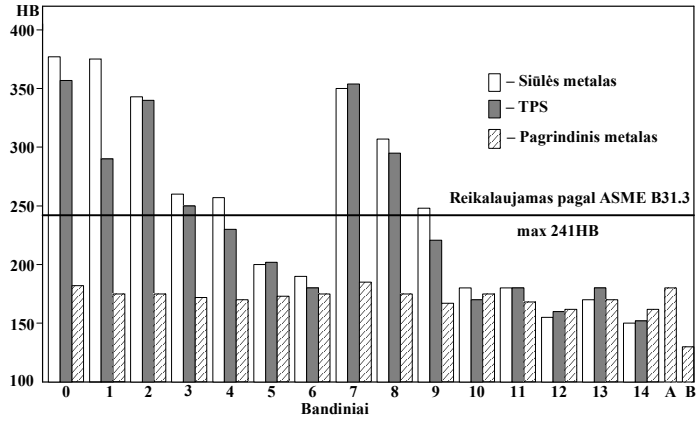
3.1. Chromo-molibdeno 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių mechaninės savybės

3.1.1. Kietumo bandymų rezultatai

Bandinių kietumo bandymų rezultatai pateikti 3.1 paveiksle ir B priede. Buvo matuotas suvirintųjų jungčių siūlės, TPS ir pagrindinio metalo kietumas, taip pat siekiant palyginti rezultatus ir atlikti analizę buvo išmatuotas naujo bei eksploatuoto vamzdžio metalo kietumas. B1 lentelėje pateikti kiekvienos srities trijų matavimų rezultatai, kurių kiekvienas taip pat yra trijų matavimų vidutinė reikšmė.

Pagal kietumo bandymo rezultatus (3.1 pav.) galime teigti, kad bandinių Nr. 0, 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 terminio apdorojimo parametrai yra nepriimtini. Minėtų jungčių kietumas viršija standarto nustatytą minimalią reikšmę. Norint pasiekti priimtiną suvirintosios jungties kietumo reikšmę terminio apdorojimo

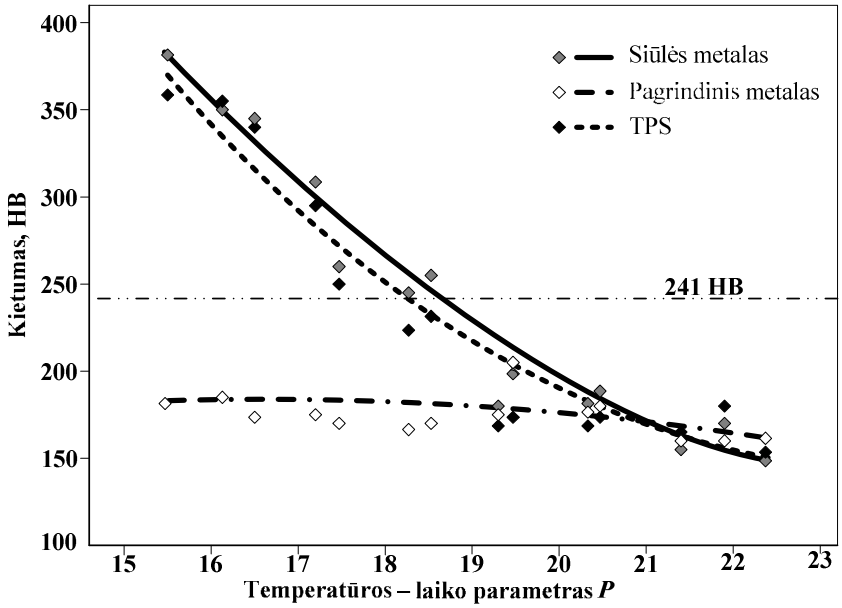
temperatūra turi būti ne mažesnė kaip 650 °C, kai išlaikymo laikas ne mažesnis kaip 8 h. Kai išlaikymo laikas 1 h, priimtinas kietumas pasiekiamas tik esant 700 °C. Norint suminkštinti užsigrūdinusias P5 plieno suvirintosios jungties sritis reikia taikyti tokį terminį apdorojimą, kad temperatūros ir laiko parametras būtų ne mažesnis kaip 18,7. Kitų suvirintųjų jungčių kietumas yra tarp 150 HB ir 200 HB, kaip ir naujo, nevirinto P5 plieno vamzdžio. 100 000 h 530 °C temperatūroje eksploatuoto vamzdžio kietumo reikšmė yra labai maža – 127 HB. Per ilgą eksploatacijos periodą kietumas sumažėjo ~50 HB.



3.1 pav. Kietumo matavimų (HB) rezultatai
Fig. 3.1. Hardness test results

Sudarius jungčių kietumo ir temperatūros ir laiko parametro *P* tarpusavio priklausomybės grafiką (3.2 pav.) matyti, kad siūlės metalo ir TPS kietumas gana tolygiai krenta didinant *P* reikšmę. Priimtiną kietumo reikšmę (241 HB) siūlės metalas pasiekia, esant temperatūros ir laiko parametrui *P* >18,7. Pagrindinio metalo kietumas didinant *P* keičiasi labai nežymiai, didinant *P* nuo 15,5 iki 22,5 pagrindinio metalo kietumas sumažėjo tik per 15 HB.

Terminio poveikio srities kietumo kreivė yra ~10 HB žemiau už siūlės metalo kietumo kreivę ir priimtiną reikšmę pasiekia esant žemesnei *P* reikšmei, bet kadangi vertinamos visos jungties sritys, nors vienai sričiai neatitinkant nustatytų reikalavimų, jungtis vertinama kaip nepriimtina. Todėl pagal sudarytą priklausomybės grafiką galima teigti, kad termiškai apdorota plieno P5 virintina jungtis pasiekia priimtiną kietumo reikšmę, kai terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parametras *P* yra didesnis už 18,7.



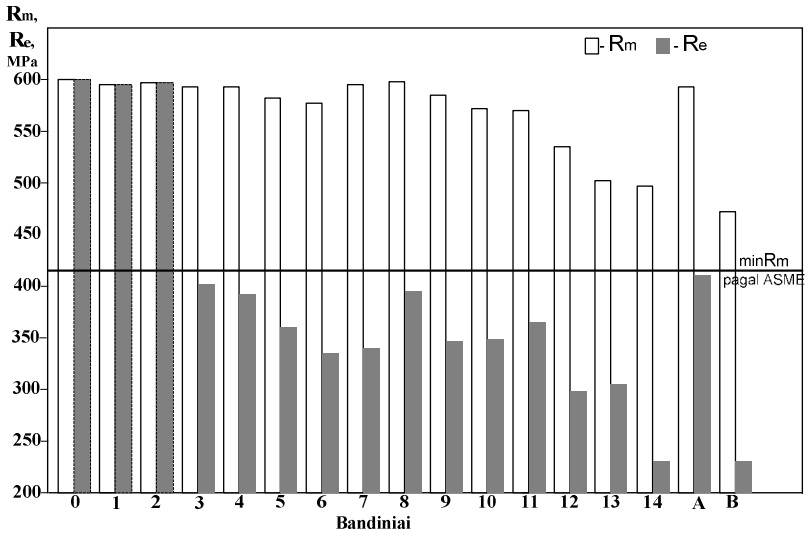
3.2 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių kietumo (HB) priklausomybė nuo temperatūros ir laiko parametro *P*

Fig. 3.2. Dependence of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint hardness (HB) on the temperature/time parameter *P*

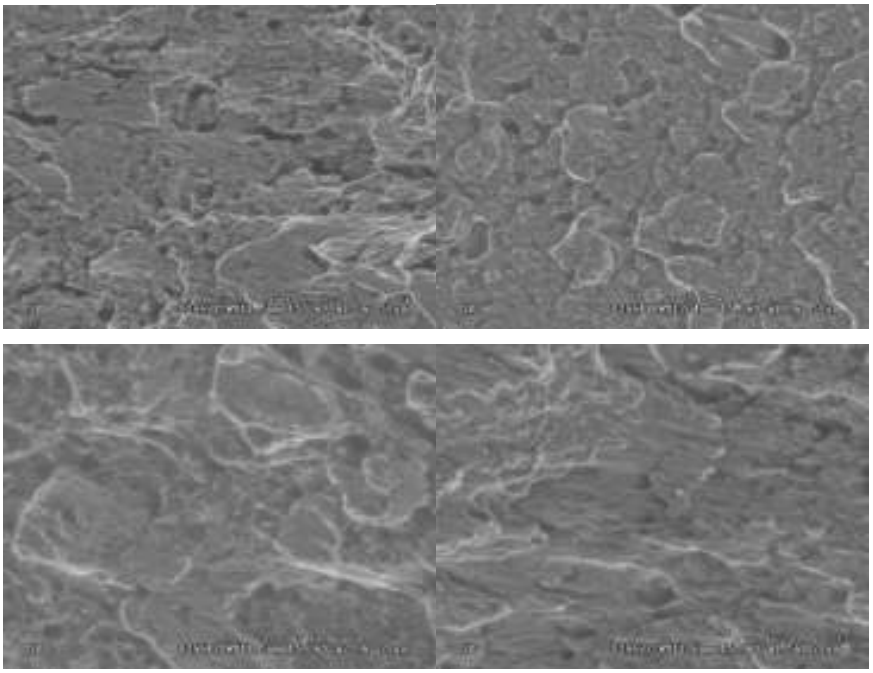
3.1.2. Tempimo bandymų rezultatai

Visi tempiami bandiniai nutrūko per pagrindinio metalo sritį (3.3 pav.). Dėl didesnio mangano ir chromo kiekio (Evans 1997) prilydyto metalo stiprumas yra didesnis už pagrindinio metalo. Prilydytame metale mangano yra apie 0,15 % daugiau nei pagrindiniame, o chromo kiekis didesnis ~1 %. Naudojant daugiau legiruotą pridėtinį metalą, užtikrinamas didesnis siūlės stiprumas, taip kompensuojant jungties susilpninimą nenumatytais, nežymiais siūlės defektais. Kai tempimo bandymo metu suvirintas bandinys suyra pagrindinio metalo srityje, suvirintoji jungtis yra priimtina eksploatacijai. Nes projektuojant įrenginius skaičiavimams naudojami tik pagrindinio metalo leistini įtempiai, sąlygiškai laikant, kad prilydyto metalo leistinų įtempių reikšmės bus ne žemesnės. Atlikus bandinių tempimo bandymus buvo nustatyta stiprumo riba R_m ir takumo riba R_e, rezultatai pateikti 3.4 paveiksle ir B priede.

3.3 pav. Bandiniai 0, 6, 14 po tempimo bandymo
Fig. 3.3. Specimens 0, 6, 14 after tensile test

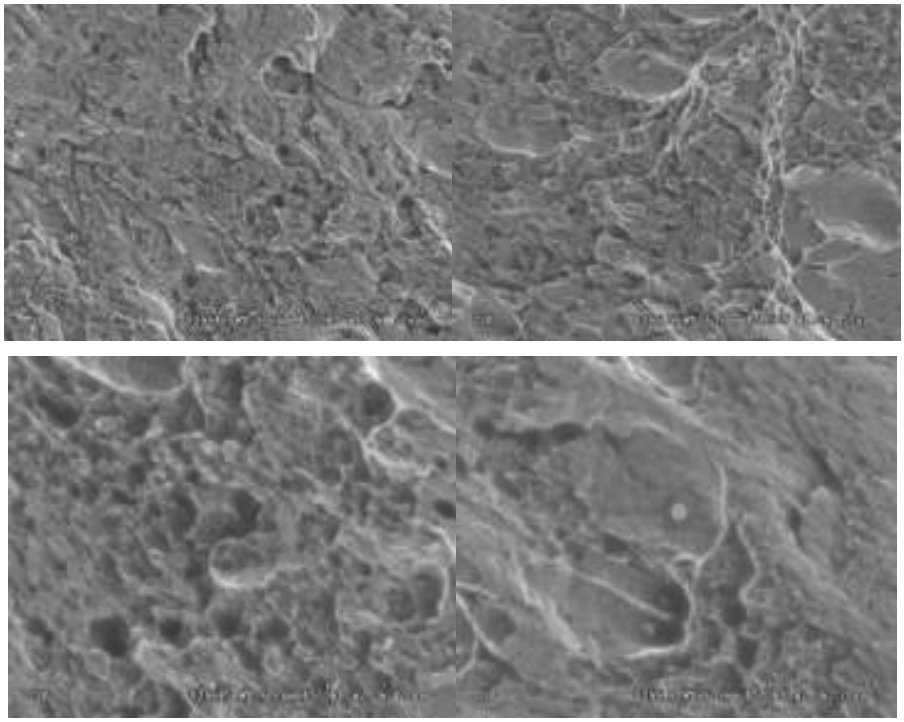


3.4 pav. Tempimo bandymo rezultatai (MPa)
Fig. 3.4. Tensile test results



3.5 pav. 0 bandinio tempimo bandymo irimo paviršiaus fraktogramos
Fig. 3.5. Fractographs of fracture surfaces in the tensile specimens No. 0

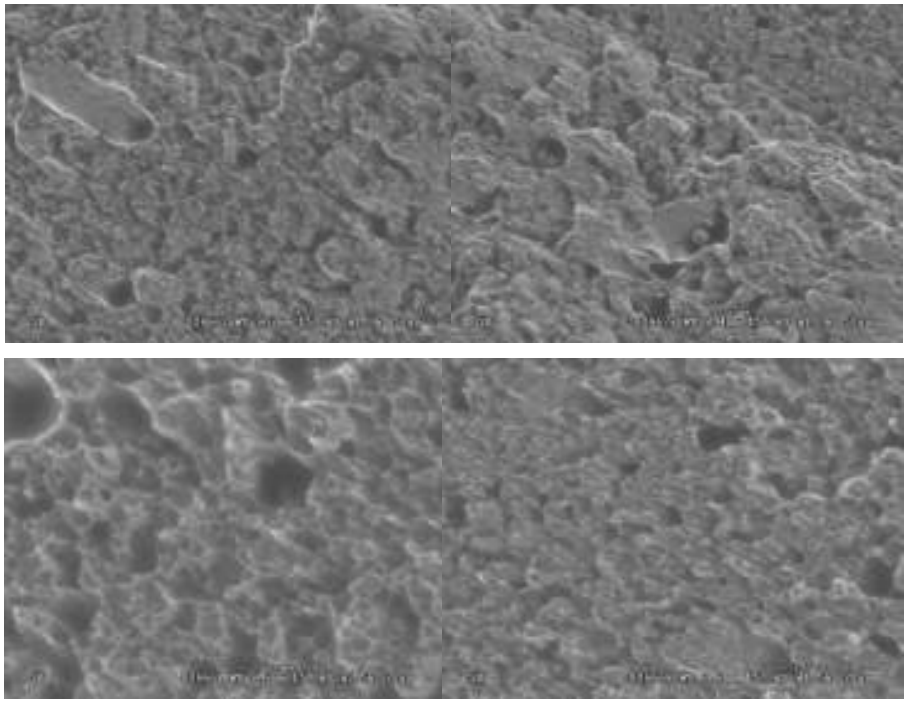
Bandinių 0, 1, 2 takumo riba nenustatyta, nebuvo užfiksuotas takumo laiptelis, kai nedidinant apkrovos vyksta plastinė deformacija. Teoriškai toks rezultatas įmanomas tik idealiai tamprioms, labai trapioms medžiagoms. Realiai trapūs ir kieti metalai bei jų lydiniai tempimo bandymo metu pasiekia tokią ribą, kai nebedidinant tempimo jėgos metalas pradeda plastiškai deformuotis, tik ta riba yra labai neryški ir, norint ją užfiksuoti, reikia tikslesnės bandymo įrangos. Analizuojant šių bandinių fraktogramas (3.5 pav.), pastebimas tarpkristalinis irimas, matomos duobutės, būdingos vienkartiniam tempimui. Kad bandinys trapus, galima teigti iš fraktogramoje matomų apskritos formos plokštelių. Taip pat, lyginant su kitais bandiniais (3.6 pav., 3.7 pav.), vizualiai matoma, kad duobučių gylis žymiai mažesnis. Bandinio trūkis vystėsi dviem būdais: jungiantis mikroporoms ir vykstant trapaus skilimo procesui. Bet didesniąją fraktogramos ploto dalį užima skilimo laiptelių vaizdas.



3.6 pav. 6 bandinio tempimo bandymo irimo paviršiaus fraktogramos
Fig. 3.6. Fractographs of fracture surfaces in the tensile specimens No. 6

Taip pat šių bandinių kietumo reikšmės yra labai aukštos, siūlės metalo kietumas yra apie 350 HB. Bandinių, kuriems nebuvo taikytas terminis apdorojimas (bandinys 0), taip pat termiškai apdorotų 500–550 °C bandinių 1, 2 suvirintųjų jungčių metalas yra labai kietas ir trapus, neplastiškas. Iš tempimo bandymo rezultatų grafinio vaizdo (3.4 pav.) matyti, kad termiškai neapdoroto bandinio stiprumo riba yra aukščiausia iš visų bandinių, bet bandinys praktiškai neturi plastiškumo, nes bandymo metu tempimo mašina takumo ribos laiptelio neužfiksavo. Tokį pat rezultatą matome ir bandinių 1, 2 stiprumo ir takumo reikšmių grafiniame vaizde, t. y. stiprumo riba aukšta, o takumo riba nenustatyta.

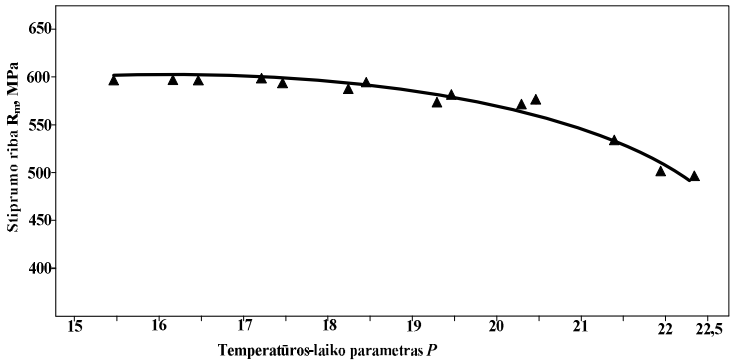
Todėl galima sakyti, kad plieno P5 termiškai neapdorotos jungtys ir jungtys, kurioms taikyta 500–550 °C terminio apdorojimo temperatūra ir išlaikymo laikas 1 h, pagal irimo mechanikos kriterijus yra nepriimtinos naudoti atsakingoms, nešančioms konstrukcijoms (Hertzberg 1983). 3÷13 bandinių stiprumo ir takumo riba yra priimtinos pagal norminių dokumentų reikalavimus. 6 bandinio tempimo fraktogramoje (3.6 pav.) matomos tempimui būdingos duobutės ir grūdelių formos intarpai, kurie buvo trūkio koncentratoriai.



3.7 pav. 14 bandinio tempimo bandymo irimo paviršiaus fraktogramos
Fig. 3.7. Fractographs of fracture surfaces in the tensile specimens No. 14

Bandinio trūkis taip pat vystėsi jungiantis mikroporoms ir trapiai skylant tarp kristalų. Kitaip nei termiškai neapdoroto bandinio fraktogramoje (3.5 pav.), 3.6 pav. mikroporų duobutės užima didesniąją ploto dalį, todėl irimo pobūdis yra plastiškesnis.

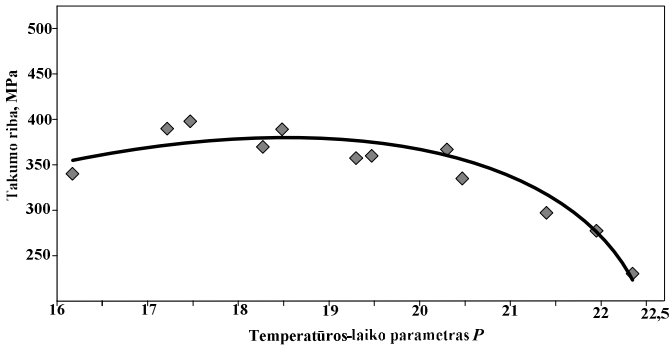
14 bandinio trūkio fraktogramose (3.7 pav.) matyti susijungusių duobučių, mikroporų kolonijos. Tai rodo, kad trūkis buvo plastiškas, bet takumo ir stiprumo riba labai žema, palyginti su kitais bandiniais. Šio bandinio stiprumo ir takumo riba yra tokia pat kaip ir ilgą laiką eksploatuoto B bandinio. Tai reiškia, kad taikydami intensyvų terminį apdorojimą mes sukėlėme medžiagos stiprumo sumažėjimą, tokį pat kaip ir po ilgos eksploatacijos.



3.8 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių stiprumo ribos priklausomybė nuo temperatūros ir laiko parametro P

Fig. 3.8. Dependence of 5 % Cr–0.5 % Mo steel welded joint tensile strength on the temperature/time parameter P

Iš 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių stiprumo bei takumo ribos ir temperatūros ir laiko parametro *P* tarpusavio priklausomybės (3.8, 3.9 pav.) matyti, kad didėjant *P* stiprumo ir takumo riba mažėja. Stiprumo riba krenta tolygiai, kiekvienam *P* padidėjimo vienetui stiprumo riba sumažėja ~15 MPa. Kai *P* reikšmė yra nuo 17 iki 20,5, takumo riba išlieka iš esmės nepakitusi. Toliau didinant *P* reikšmę, kiekvienam *P* padidėjimo vienetui takumo riba sumažėja ~50 MPa. Suvirintųjų jungčių tempimo bandymais nustatyta, kad 5 % Cr–0,5 % Mo plieno takumo ir stiprumo ribos reikšmės yra optimalios, kai *P* reikšmė yra nuo 17 iki 20,5.

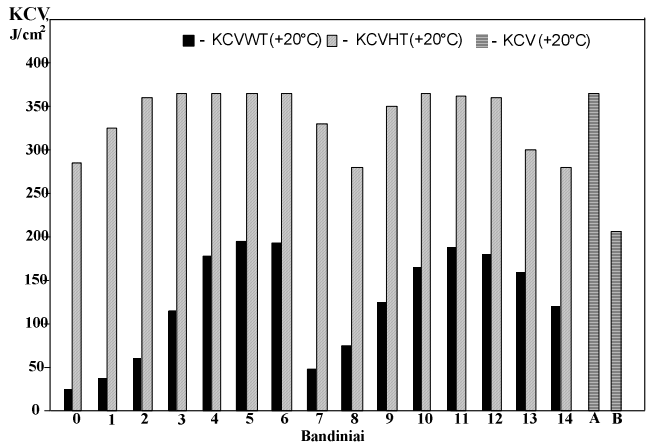


3.9 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių takumo ribos priklausomybė nuo temperatūros ir laiko parametro P
Fig. 3.9. Dependence of 5 % Cr–0.5 % Mo steel welded joint yield strength on the temperature/time parameter P

3.1.3. Smūginio tąsumo bandymo rezultatai

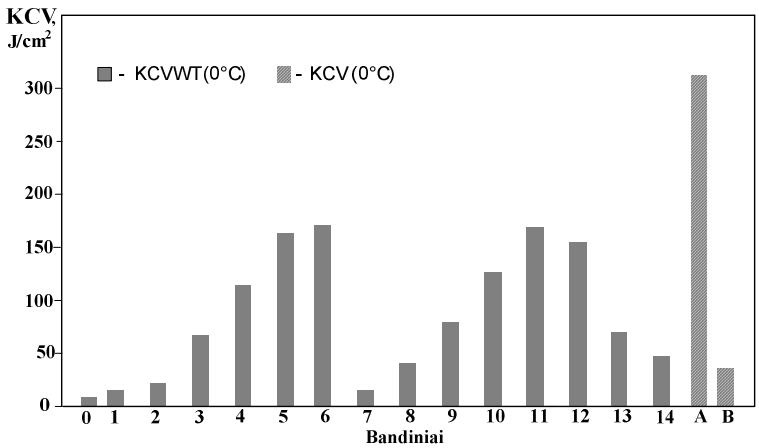
Smūginio tąsumo bandymai buvo atlikti kambario ir 0 °C temperatūroje. Suvirintų bandinių siūlės, TPS, pagrindinio metalo bei naujo ir eksploatuoto vamzdžio metalo bandymų +20 °C ir 0 °C temperatūroje rezultatai pateikti 3.10, 3.11 pav. ir B priede.

Smūginio tąsumo bandymų rezultatų grafinis vaizdas (3.10 pav.) parodo, kad termiškai neapdoroto bandinio ir bandinių, kurių terminio apdorojimo temperatūra yra nuo 500 iki 550 °C (bandinių Nr. 0, 1, 2, 7, 8), siūlės smūginis tąsumas, kai bandymo temperatūra +20 °C, yra mažesnis arba artimas 58,7 J/cm^2.



3.10 pav. Smūginio bandymo +20 °C temperatūroje rezultatai
Fig. 3.10. Impact strength test results at +20 °C

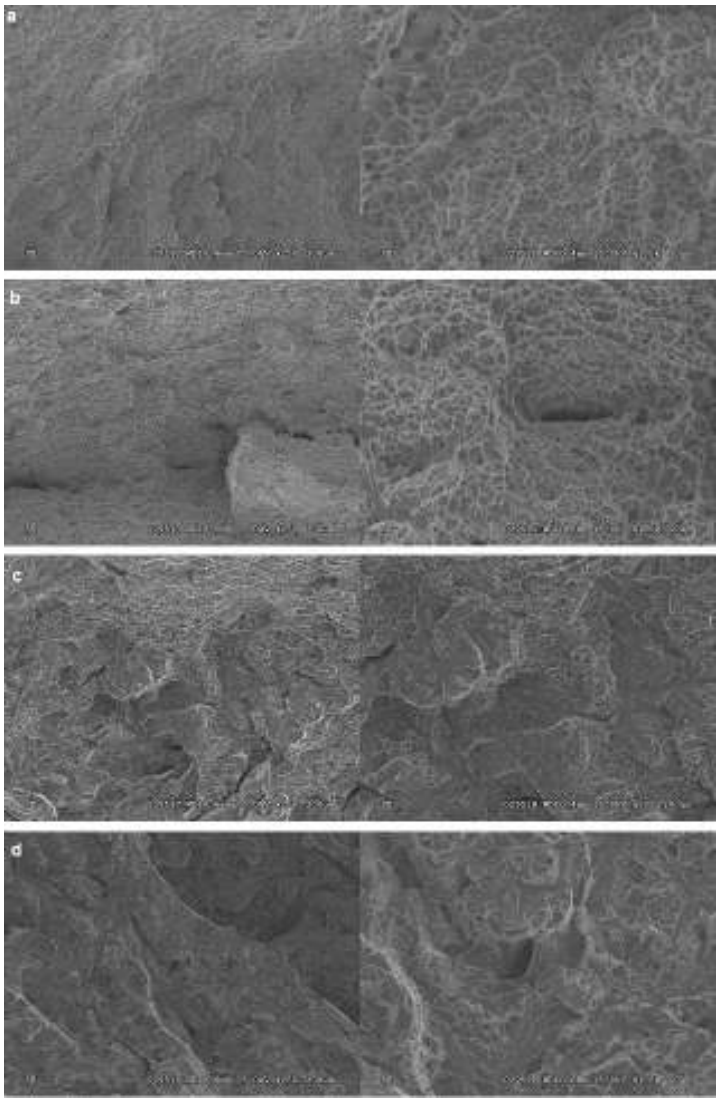
Tai yra minimali priimtina virintinės siūlės smūginio tąsumo reikšmė pagal ASTM standartą. Paprastai šio plieno smūgio bandymas atliekamas tik kambario temperatūroje, nes įrenginiai yra eksploatuojami tik aukštose temperatūrose, bet būna atvejų, kai įrenginys paleidžiamas šaltuoju metų laiku ar atliekami hidrauliniai bandymai vandeniu ir įrenginio sienelės temperatūra būna žemesnė už kambario temperatūrą. Kai bandymo temperatūra yra 0 °C (3.11 pav.), labai sumažėja 3, 9, 13, 14 ir B (eksploatuoto plieno) bandinių smūginis tąsumas, jų reikšmės pasiekia nepriimtiną ribą. Galime teigti, kad šių bandinių terminio apdorojimo parametrai yra nepriimtini, nes toks įrenginys gali patirti avariją paleidimo metu, kol sienelės temperatūra nepasiekė kambario temperatūros.



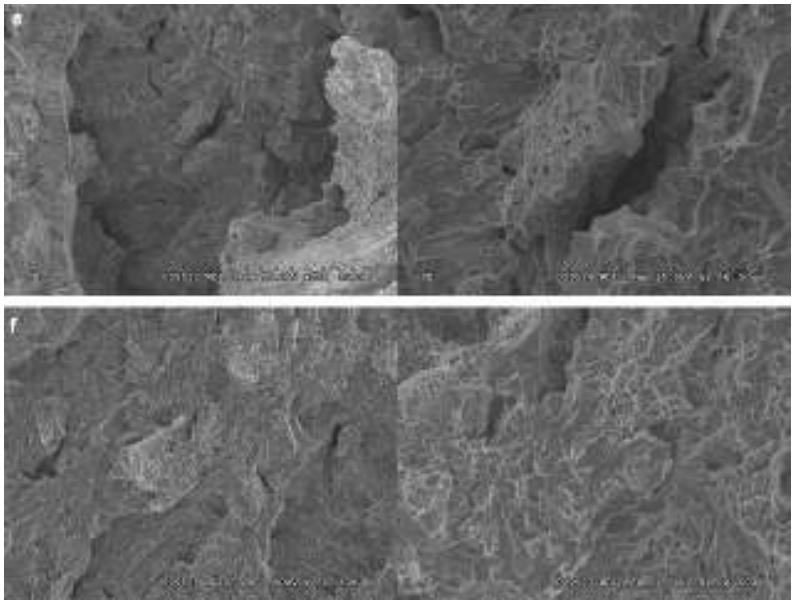
3.11 pav. Smūginio bandymo 0 °C temperatūroje rezultatai
Fig. 3.11. Impact strength test results at 0 °C

Termiškai neapdoroto bandinio (bandinys 0) smūgio bandymo fraktogramose (3.12, 3.13 pav.) matyti, kad lūžis trapus, aptinkamas nevienalytis pluoštinis ir kristalinis irimas, užimantis 1/3 lūžio ploto, pereinantis į trapų kristalinį lūžį, užimantį 2/3 bandinio lūžio ploto. Srityse prie pat įpjovos (a, b) matomos pluoštinį lūžį charakterizuojančios duobutės su išplėšimais. Duobutės pakankamai vienodos formos ir matmenų, tai reiškia, kad lūžio paviršius palyginti plokščias. Duobučių gylis mažas, palyginti su bandinių, kurių smūginio tąsumo reikšmės aukštesnės, fraktogramomis (3.14, 3.15 pav). Plokščias lūžio paviršius ir mažas duobučių gylis charakterizuoja didelio stiprumo, bet mažo plastiškumo medžiagas, tokių medžiagų stiprumo ir takumo ribos santykis yra artimas vienetui. Toliau nuo įpjovos (3.12 c, d ir 3.13 pav.) irimo paviršiuje matomos skilimo, kvaziskilimo arba tarpgrūdelinio irimo fasetės. Tai reiškia, kad pluoštinis irimas pereina į trapų skilimą, o tai būdinga trapioms, martensitinės struktūros medžiagoms (ASM handbook 1987).

Plieno, turinčio kristalinį lūžį, smūginis tąsumas yra blogas, palyginti su tuo pačiu plienu, turinčiu pluoštinį lūžį. Tokie plienai pasižymi žemu plastiškumu ir sūginiu tąsumu, esant pakankamai dideliam stiprumui.

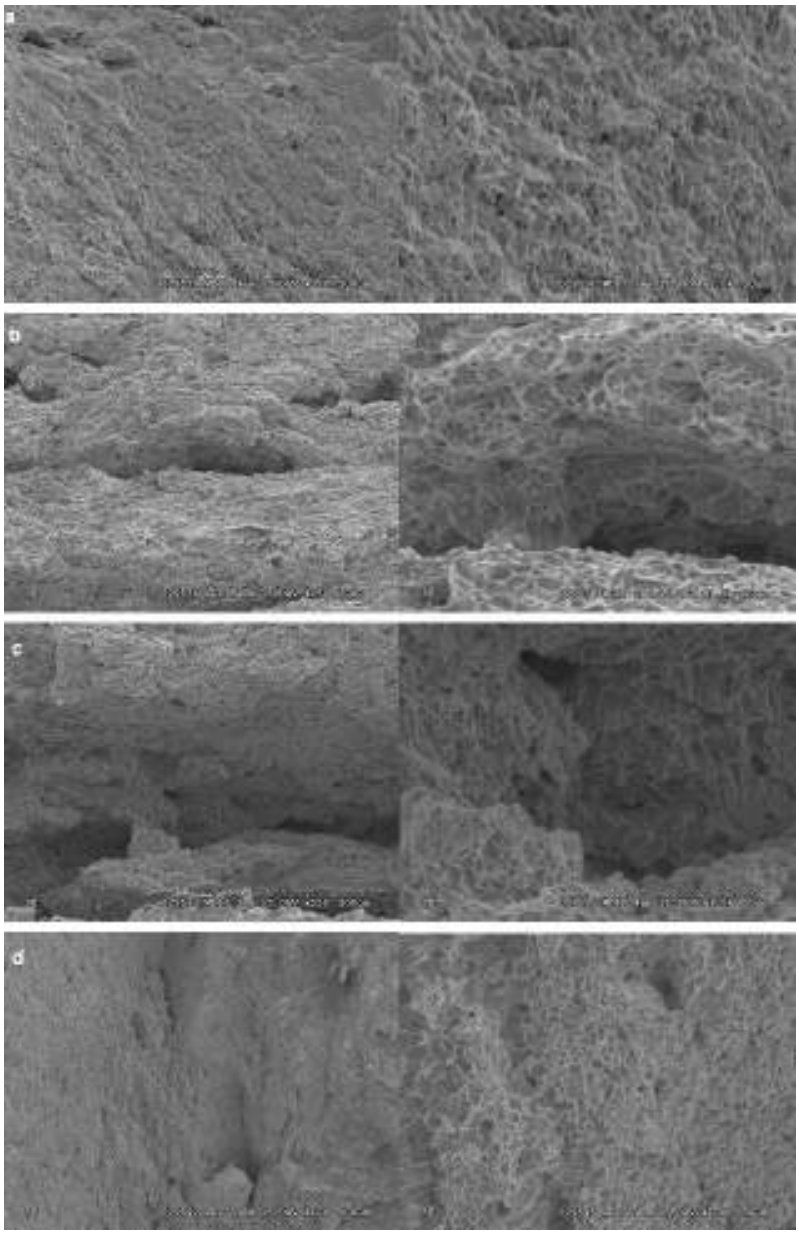


3.12 pav. Termiškai neapdoroto bandinio (0) lūžio fraktogramos po siūlės smūginio bandymo +20 °C temperatūroje (a, b, c, d – tiriamos sritys)
Fig. 3.12. Fractographs of fracture surfaces in the impact specimen No. 0, test temperature +20 °C (a, b, c, d – investigation areas)

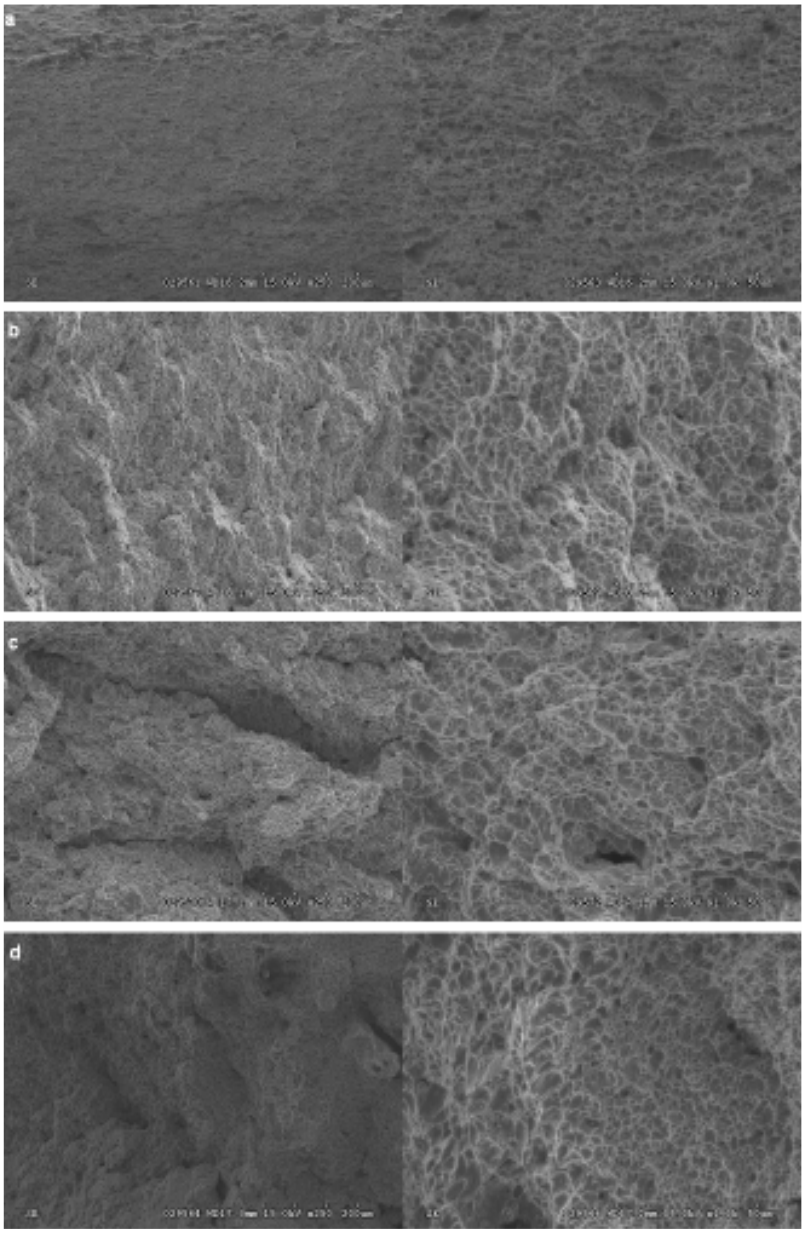


3.13 pav. Termiškai neapdoroto bandinio (0) lūžio fraktogramos po siūlės smūginio bandymo +20 °C temperatūroje (e, f – tiriamos sritys)
Fig. 3.13. Fractographs of fracture surfaces in the impact as welded specimen No. 0, test temperature +20 °C (e, f – investigation areas)

Didėjant terminio apdorojimo parametrams smūginio tąsumo reikšmės taip pat kyla. Aukščiausios plieno P5 smūginio tąsumo reikšmės (3.10, 3.11 pav.), kai terminio apdorojimo temperatūra yra nuo 700 iki 750 °C ir išlaikymo laikas atitinkamai nuo 1 iki 8 h (5 ir 11 bandiniai), kai temperatūra 700 °C, o esant 750 °C temperatūrai – 1 h (6 bandinys). Analizuojant 6 bandinio lūžio fraktogramas (3.14) pastebima, kad lūžis daugiau pluoštinis, charakterizuojantis didesnį plastiškumą nei termiškai neapdoroto (3.12, 3.13 pav.) bandinio. 3.14 pav. a, d nuotraukose matomos neapskritos formos, ištęstos duobutės, tai parodo, kad lūžio paviršius nėra plokščias. b ir c nuotraukose matyti keletas antrinių plyšių, kurių atsiradimas liudija apie smūgio energijos išskaidymą, tai būdinga didesnio smūginio stiprumo medžiagoms. Šio bandinio lūžis nėra visiškai pluoštinis, tąsus – antrinių plyšių paviršiuje matomos nedidelės trapaus skilimo fasetės (b, c nuotraukos).



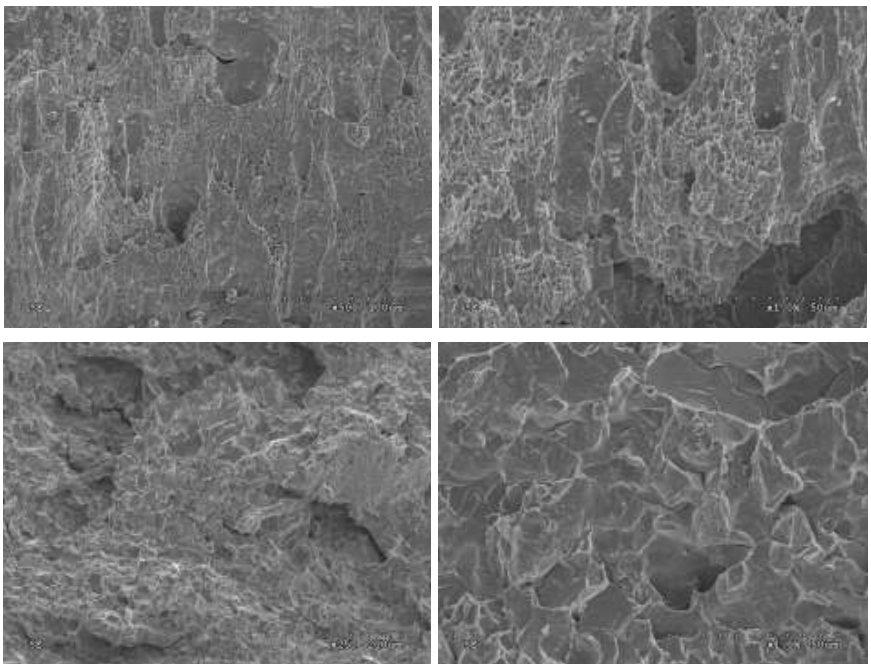
3.14 pav. Termiškai apdoroto 6 bandinio lūžio fraktogramos po siūlės smūginio bandymo +20 °C temperatūroje
Fig. 3.14. Fractographs of fracture surfaces in the post-weld heat treated impact specimen No. 6, test temperature +20 °C



3.15 pav. Termiškai apdoroto 14 bandinio lūžio fraktogramos po siūlės smūginio bandymo +20 °C temperatūroje
Fig. 3.15. Fractographs of fracture surfaces in the post-weld heat treated impact specimen No. 14, test temperature +20 °C

Tai rodo, kad plieno struktūroje gali būti likusios trapios dalys. Kai trapios struktūros dedamosios yra tik pėdsakai, tai didina plieno stiprumą, žymiai nemažinant plastiškumo, kartu suteikiamos geros pasipriešinimo trapiam irimui savybės. Taip pat smulkių, dispersiškų karbidų išsiskyrimas grūdeliuose ir jų ribose didina plieno smūginį tąsumą, sugeriama daugiau smūgio energijos (Tarpani 2002). Tai charakterizuoja smulkios, gilios duobutės.

Žymiai padidinus terminio apdorojimo parametrus (13, 14 bandiniai) smūginio tąsumo reikšmės krenta. Fraktogramose (3.15 pav.) matyti pluoštinis, tąsus irimo charakteris. Lūžio paviršius neplokščias, matyti ištęstos duobutės. Taip pat matyti stambesni gilūs išplėšimai, platesnės duobutės, kurių priežastis gali būti nemetaliniai intarpai tarp grūdelių. Nuotraukose nematyti trapaus irimo požymių, bet smūginio tąsumo reikšmė yra žemesnė už 6 bandinio smūginį tąsumą. Nemetaliniai intarpai taip pat yra žemesnės smūginio tąsumo reikšmės priežastis. 6 bandinio trapios struktūros dedamosios kartu su plastiška, tąsia struktūra didina plieno smūginį tąsumą. Smūgio energija yra išskaidoma, pakeičia kryptį, atsiranda daug antrinių plyšių.

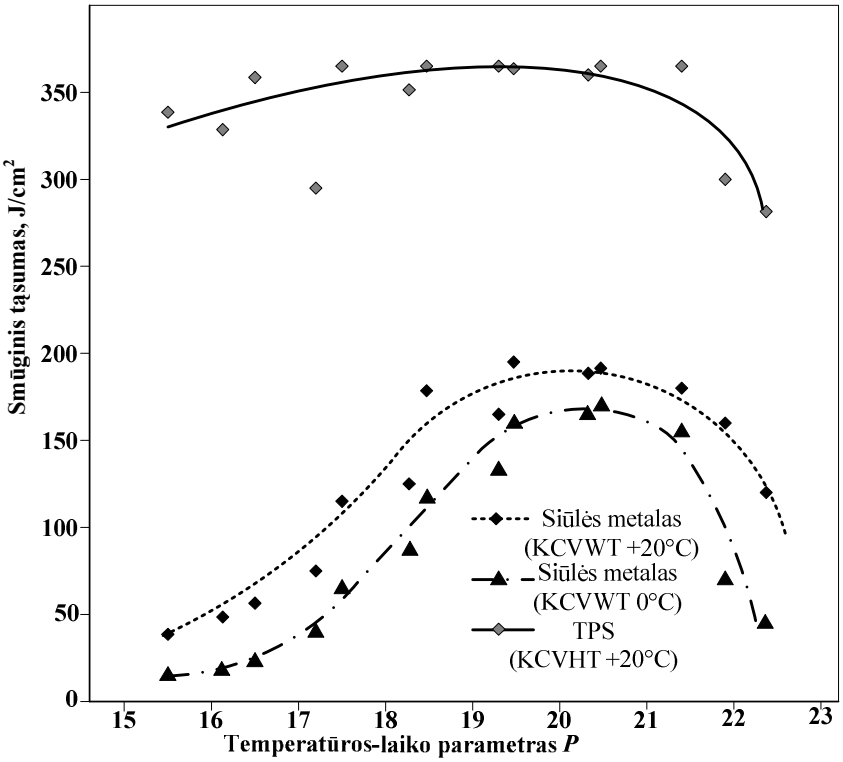


3.16 pav. Eksploatuoto vamzdžio B lūžio fraktogramos po smūginio bandymo +20 °C temperatūroje
Fig. 3.16. Fractographs of fracture surfaces in impact of in servise specimen B, test temperature +20 °C

Eksploatuoto bandinio B lūžio paviršiaus fraktogamose (3.16 pav.) matyti plastiško, nevienalyčio pluoštinio lūžio vaizdas su trapaus tarpkristalinio lūžio fasetėmis. Ryškiai išreikštos duobutės matomos kaip mikroporos. Jos susidaro plastiškai tekant metalui. Mikroporų židiniai yra nemetaliniai intarpai arba antros fazės mikronevienodumai grūdelių, subgrūdelių ribose ir poslinkio plokštumose. Tarpkristalinį trapų lūžį suaktyvina susilpnėjusios tarpgrūdelinės sritys. Ilgą laiką eksploatuojant plieną aukštoje temperatūroje vyksta anglies, molibdeno, chromo atomų difuzija į grūdelių pakraščius ir jų ribose susikaupia nemetalinių intarpų kolonijos. Tokie struktūriniai pokyčiai ir nulemia smūginio tąsumo sumažėjimą.

Iš 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių smūginio tąsumo ir temperatūros ir laiko parametro priklausomybės (3.17 pav.) matyti, kad TPS smūginis tąsumas kambario temperatūroje tolygiai didėja, didėjant *P* nuo 15,5 iki 20,5, nuo 20,5 TPS smūginis tąsumas krenta ~40 J/cm^2 kiekvienam *P* padidėjimo vienetui. Suvirinimo siūlės smūginio tąsumo reikšmės yra žymiai mažesnės, tai galima paaiškinti tuo, kad siūlės metalas, kitaip nei pagrindinis metalas ar terminio poveikio sritis, buvo išlydytas ir ataušintas, jame vyrauja struktūriniai nevientisumai ir dideli įtempiai. Didinant *P* nuo 15,5 iki 19 siūlės smūginis tąsumas didėja ~45 J/cm^2 kiekvienam *P* padidėjimo vienetui. Toliau iki *P* – 20,5 smūginio tąsumo reikšmė išlieka iš esmės nepakitusi ~190 J/cm^2, nuo *P* – 20,5 siūlės smūginis tąsumas mažėja ~35 J/cm^2 kiekvienam *P* padidėjimo vienetui. Siūlės smūginio tąsumo 0 °C temperatūroje priklausomybės nuo parametro *P* kreivės forma labai panaši į priklausomybę esant +20 °C, smūginio tąsumo reikšmės yra žemesnės ~20–50 J/cm^2. Pastebimas staigesnis kreivės kritimas, kai parametras *P* pasiekia 21,4, siūlės smūginis tąsumas mažėja ~100 J/cm^2 kiekvienam *P* padidėjimo vienetui.

Remiantis smūgio bandymo rezultatais, galima teigti, kad 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių terminis apdorojimas yra priimtinas, kai *P* reikšmė yra nuo 19 iki 20,5. Suvirintųjų jungčių, kurių terminio apdorojimo parametras *P* yra didesnis už 20,5, nerekomenduojama eksploatuoti žemesnėje nei kambario temperatūroje. Tai taip pat taikytina ir 530 °C temperatūroje daugiau kaip 100 000 valandų eksploatuoto plieno vamzdynams. Nors chromo-molibdeno plieno vamzdynai eksploatuojami aukštose temperatūrose, būna atvejų, kai vamzdynai, paleidžiami žiemą, yra veikiami vidinio slėgio ir neigiamose temperatūrose. Todėl paleidimą reikia sureguliuoti taip, kad vamzdynai būtų veikiami slėgio tik aukštesnėje nei 20 °C temperatūroje.

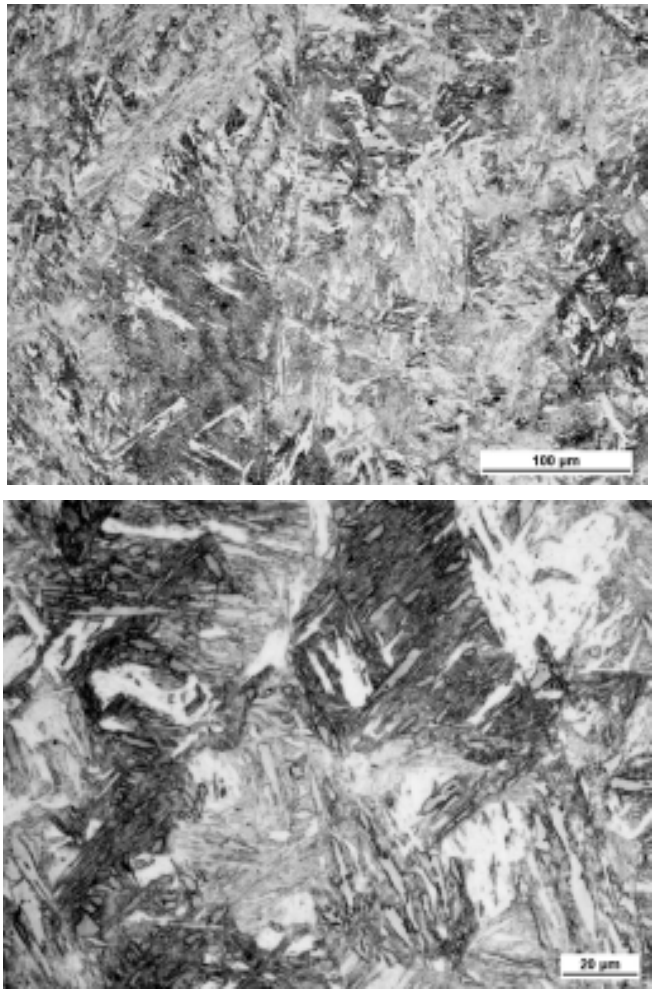


3.17 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių smūginio tąsumo priklausomybė nuo temperatūros ir laiko parametro
Fig. 3.17. Dependence of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint impact strength on the temperature/time parameter P

3.2. Mikrostruktūros tyrimas

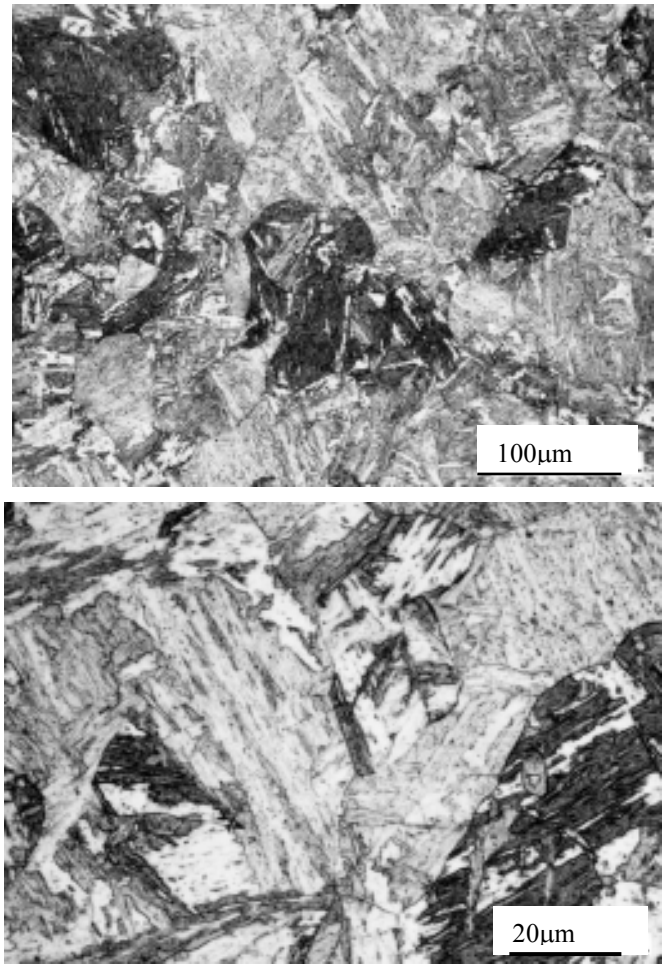
Pagrindinė užduotis atliekant chromo-molibdeno plienų suvirintųjų jungčių terminį apdorojimą yra martensitinės dedamosios pašalinimas, pakeitimas į plastiškesnę struktūrą. Kartu sumažinami ir likutiniai įtempiai.

Termiškai neapdorotos virintinės siūlės mikrostruktūros nuotraukos yra 3.18 paveiksle. Mikrostruktūra sudaryta iš smulkių ferito juostelių, kurios, sprendžiant iš kryptingo išdėstymo, gali būti pavadintos martensito juostelėmis.

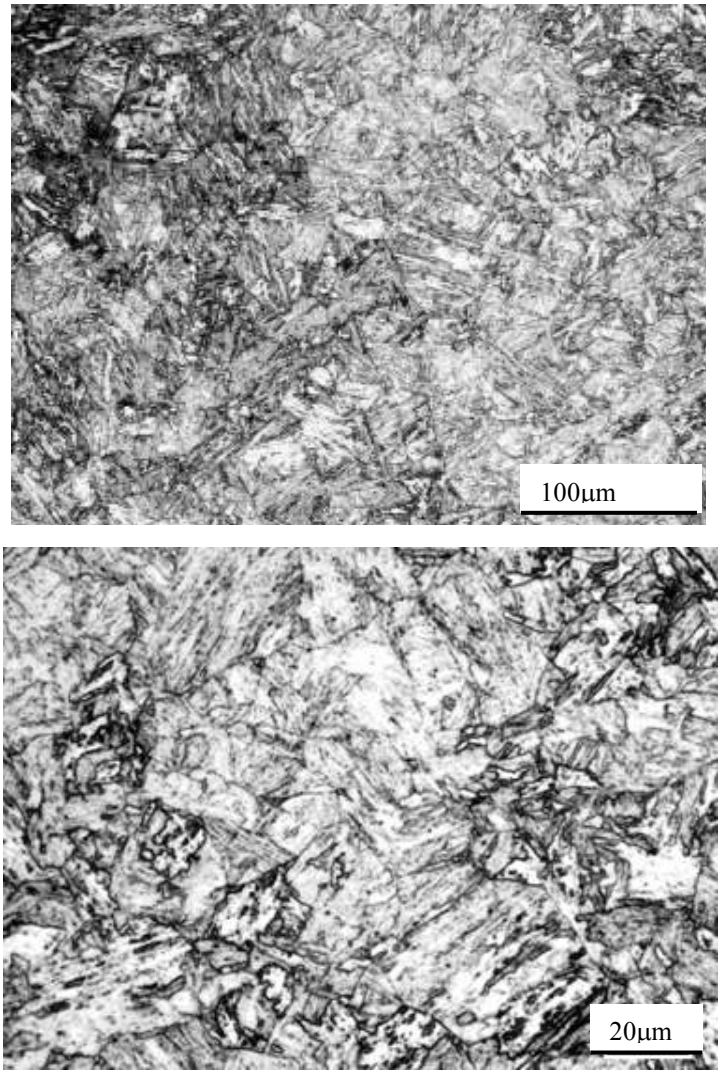


3.18 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių 0 bandinio mikrostruktūra (tik suvirintas bandinys)
Fig. 3.18. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint specimen No.0 (as welded)

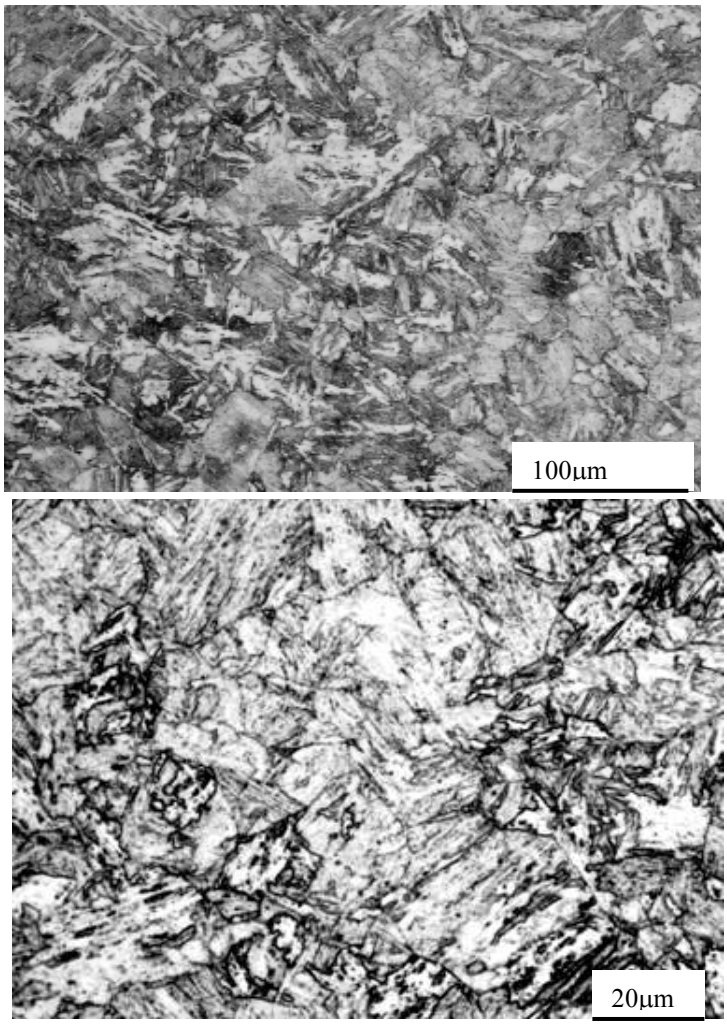
Suvirinimo siūlės metalo struktūra yra nevienalytė, bet dominuoja martensitinės plokštelės. Tikėtina, kad smulkūs karbidai, išsiskyrę stambesnėse martensito adatose, yra cementito plokštelės.



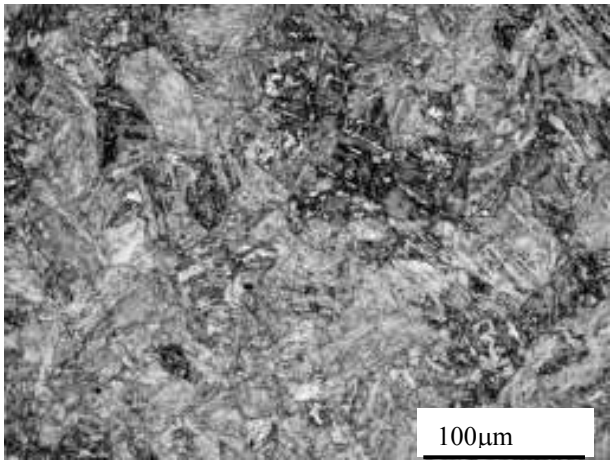
3.19 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių 1 bandinio mikrostruktūra (terminis apdorojimas 500 °C – 1 h)
Fig. 3.19. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint specimen No. 1 (PWHT 500 °C – 1h)



3.20 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių 2 bandinio (terminis apdorojimas 550 °C – 1 h) mikrostruktūra
Fig. 3.20. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint specimen No.2 (PWHT 550 °C – 1h)



3.21 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių 7 bandinio (terminis apdorojimas 500 °C – 8 h) mikrostruktūra
Fig. 3.21. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint specimen No.7 (PWHT 500 °C – 8h)



3.22 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių 8 bandinio (terminis apdorojimas 550 °C – 8 h) mikrostruktūra
Fig. 3.22. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint specimen No.8 (PWHT 550 °C – 8h)

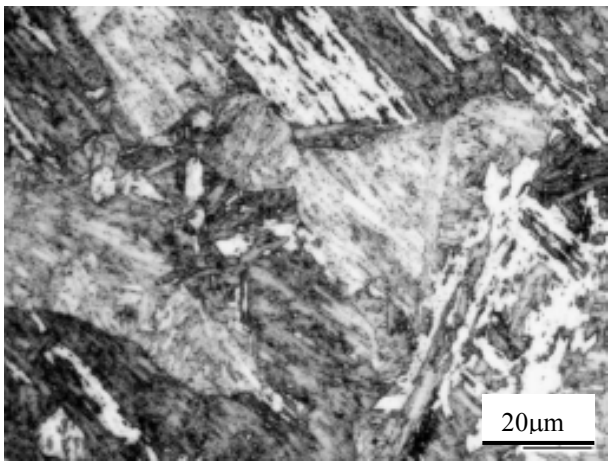
Termiškai apdorotų bandinių mikrostruktūros ryškių pokyčių neįvyko, kol temperatūros ir laiko parametro *P* reikšmė pasiekė 17,46. 1, 2, 7, 8 bandinių mikrostruktūroje ryškiai matomos martensito juostelės. Suvirinimo siūlės metalo struktūra yra nevienalytė, virintinėms siūlėms būdingi dendritai. Tokios struktūros metalas paprastai būna kietas ir neplastiškas (3.19–3.22 pav.).

Keliant terminio apdorojimo temperatūrą iki 700 °C ir didinant išlaikymo laiką nuo 1 iki 8 val., t. y. padidinus *P* reikšmę nuo 19,46 iki 20,34, mikrostruktūros pokyčiai gana ryškūs. Martensitas transformavosi, netaisyklingos formos ferito grūdelių matricoje matomi grūdelių formos, įvairaus dispersiškumo karbidai, taip pat matyti cementito grūdeliai-plokštelės, kurie kartu su ferito grūdeliais sudaro sorbitinę struktūros dedamąją (3.23–3.26 pav.).

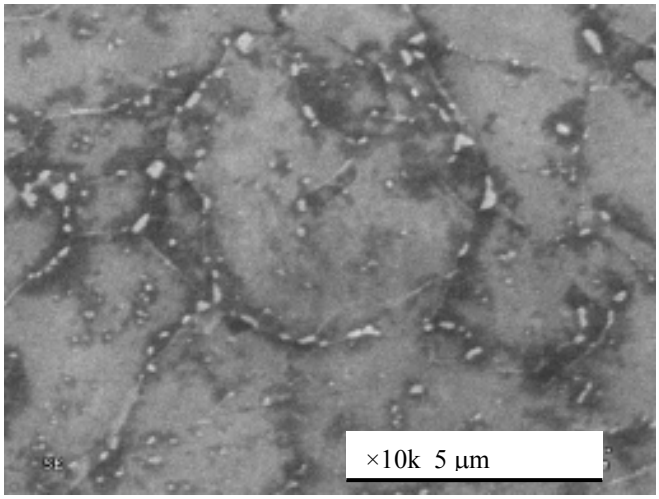
Pakėlus *P* iki 20,46, matyti įvairaus dispersiškumo karbidų grūdeliai, išsidėstę daugiau ferito grūdelių ribose, struktūra panaši į grūdelinio perlito struktūrą (3.27, 3.28 pav.).

Tokia struktūra, kaip parodyta 3.23–3.28 paveiksluose, yra priimtina todėl, kad neliko trapių ir kietų martensito plokštelių ir vyrauja platus įvairaus dispersiškumo karbidų pasiskirstymas. Karbidai didina metalo stiprumą stabdydami dislokacijų persislinkimą. Dar daugiau padidinus terminio apdorojimo temperatūrą (780–800 °C), o kartu ir *P* reikšmę (daugiau kaip 22), karbidai koaguliuoja ferito grūdelių ribose, sudaro karbidų kolonijas, jungiasi į ilgus vientisus junginius, ryškiai matomos grūdelių ribos (3.29, 3.30 pav.). Smulkių, dispersiškų karbidų grūdeliuose iš esmės nelieka. Eksploatuoto

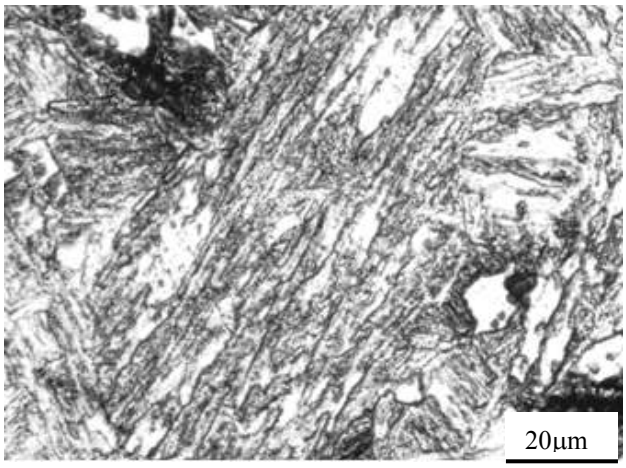
bandinio mikrostruktūra panaši į 14 bandinio, taip pat matyti ryškiai karbidų kolonijomis išskirtos ferito grūdelių ribos, perlito grūdelių iš esmės nematyti (3.31, 3.32 pav.).



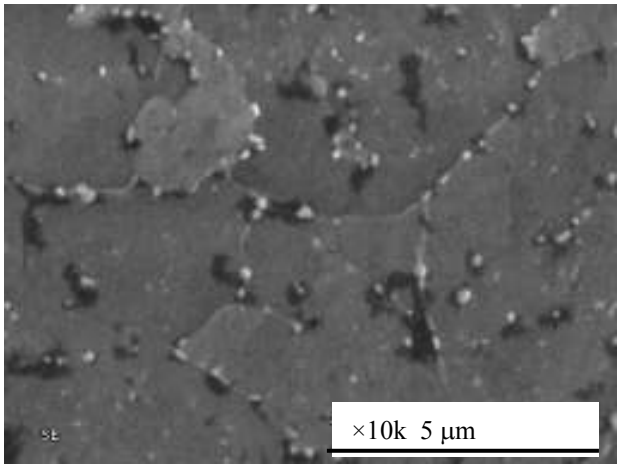
3.23 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių 5 bandinio (terminis apdorojimas 700 °C – 1 h) mikrostruktūra
Fig. 3.23. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo welded joint specimen No. 5 (PWHT 700 °C – 1h)



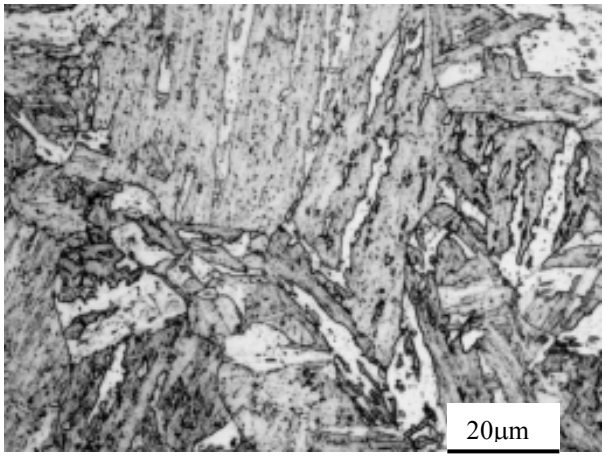
3.24 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių 5 bandinio mikrostruktūra, tyrimas atliktas nuskaitančiu elektroniniu mikroskopu
Fig. 3.24. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint specimen No. 5 (SEM)



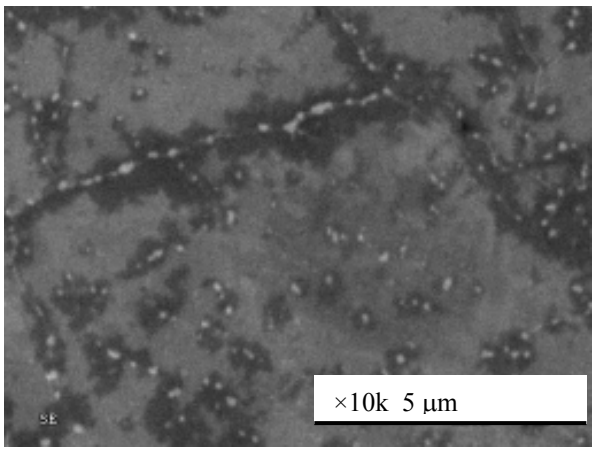
3.25 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių 11 bandinio (terminis apdorojimas 700 °C – 8 h) mikrostruktūra
Fig. 3.25. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint specimen No. 11 (PWHT 700 °C – 8h)



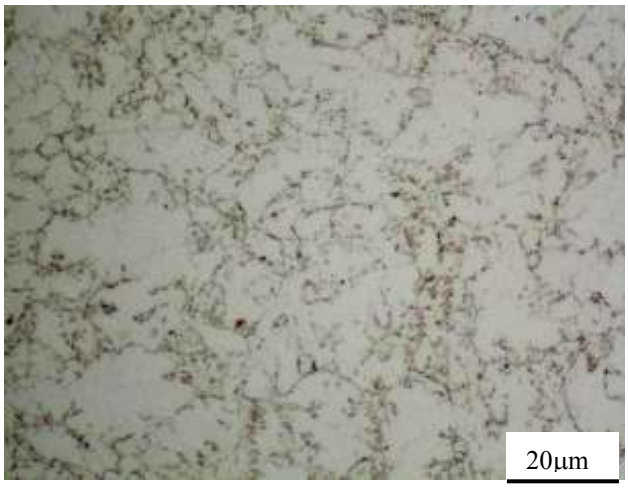
3.26 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių 11 bandinio mikrostruktūra, tyrimas atliktas nuskaitančiu elektroniniu mikroskopu
Fig. 3.26. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint spec. No. 11 (SEM)



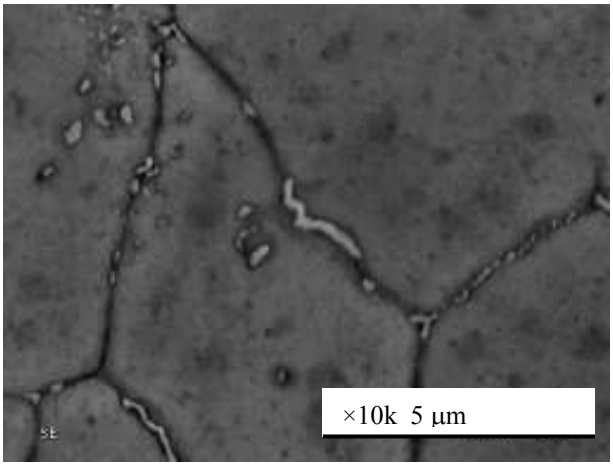
3.27 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių 6 bandinio (terminis apdorojimas 750 °C – 1 h) mikrostruktūra
Fig. 3.27. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint specimen No. 6 (PWHT 750 °C – 1h)



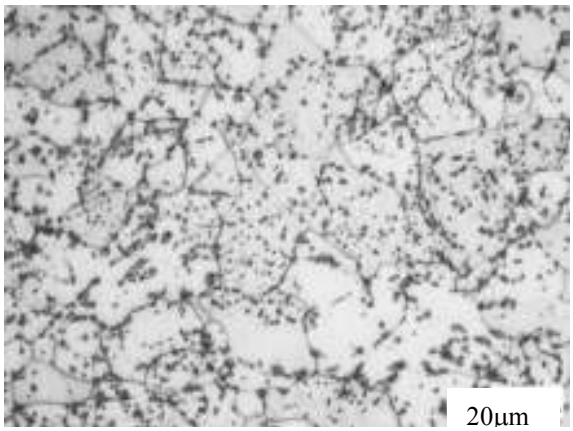
3.28 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių 6 bandinio mikrostruktūra, tyrimas atliktas nuskaitančiu elektroniniu mikroskopu
Fig. 3.28. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint specimen No. 6 (SEM)



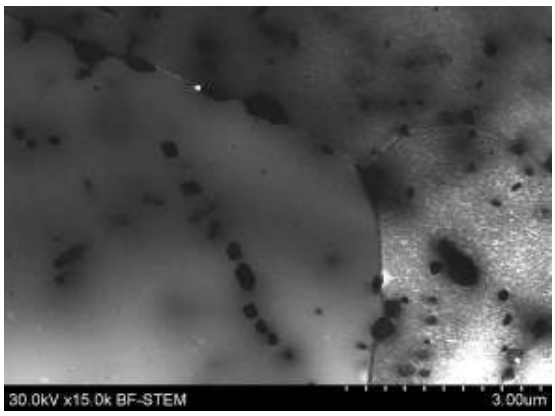
3.29 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių 14 bandinio mikrostruktūra
Fig. 3.29. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint specimen No. 14



3.30 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių 14 bandinio mikrostruktūra, tyrimas atliktas nuskaitančiu elektroniniu mikroskopu
Fig. 3.30. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint spec. No. 14 (SEM)

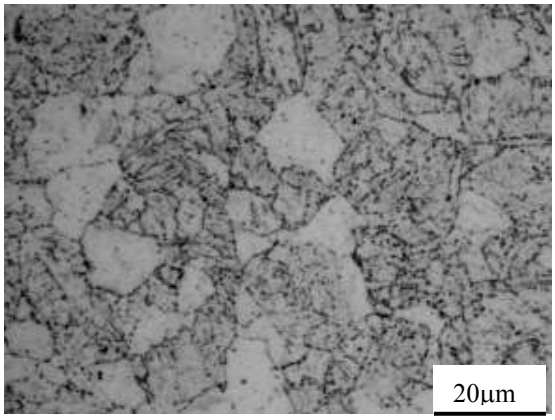


3.31 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno bandinio B (eksploatuotas 530 °C 100 000 h) mikrostruktūra
Fig. 3.31. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel specimen B



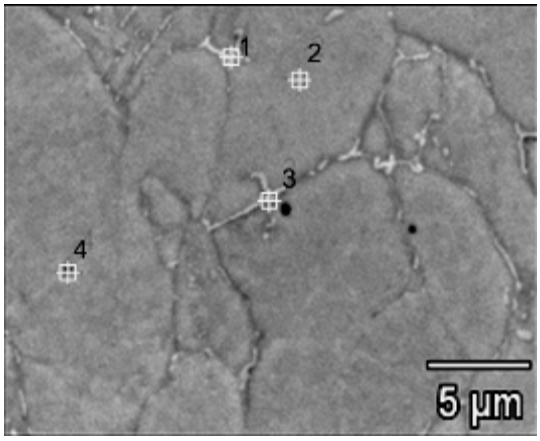
3.32 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno bandinio B (eksploatuoto) mikrostruktūra, tyrimas atliktas nuskaitančiu elektroniniu mikroskopu
Fig. 3.32. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel specimen B (SEM)

Siekiant nustatyti pokyčius, įvykusius termiškai apdorojant ar ilgai eksploatuojant plieną, buvo ištirtas neeksploatuoto 5 % Cr–0,5 % Mo plieno bandinys (3.33 pav.), jo mikrostruktūra sudaryta iš ferito ir panašaus į grūdelinį perlitą dedamųjų. Ferito grūdelių ribose ir pačiuose grūdeliuose matomi įvairaus dispersiškumo karbidai.



3.33 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno bandinio A (naujo plieno) mikrostruktūra
Fig. 3.33. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo new steel specimen A

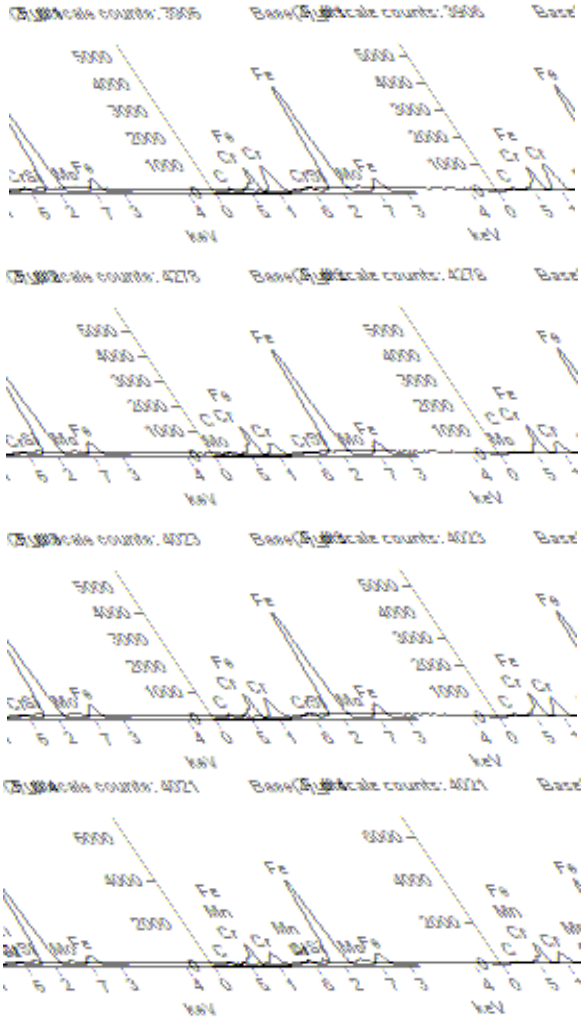
Atlikus suvirintosios jungties 14 bandinio, kuris buvo intensyviai termiškai apdorotas (*P* lygus 22,37) ir eksploatuoto bandinio B mikrostruktūros tyrimą nuskaitančiais elektroniniais mikroskopais Hitachi S-3500N ir S-5500 su integruotais spektrinės analizės įrenginiais, nustatyta mikrostruktūros nuotraukose (3.34–3.38 pav.) matomų struktūros dedamųjų cheminė sudėtis.



3.34. pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno 14 bandinio mikrostruktūra, cheminės sudėties nustatymo taškai
Fig. 3.34. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint specimen No. 14, points of chemical composition detect

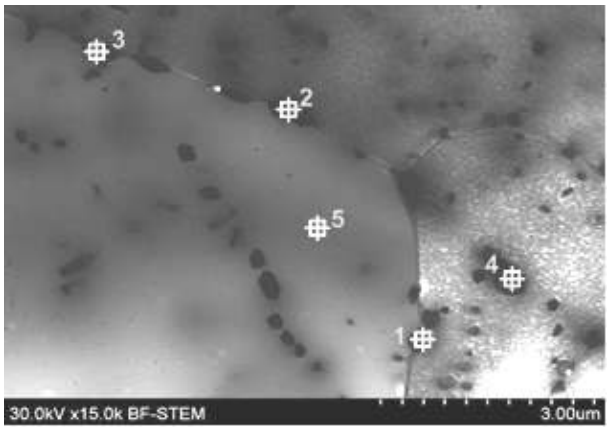
3.1 lentelė. 14 bandinio mikrostruktūros taškų cheminė sudėtis (atomai %)
Table 3.1. Chemical composition microstructure points, specimen No.14 (atoms %)

Nr.	Si-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K	Mo-L
1	0,76	14,45		83,10	0,71
2	0,73	4,95		93,17	0,41
3	0,73	9,57		89,13	0,57
4	2,11	6,76	2,21	86,08	1,05



3.35 pav. 1÷4 taškų (3.34 pav.) cheminės sudėties nustatymo spektrogramos
Fig. 3.35. Spectrogram of chemical compositions, point 1÷4 (Fig. 3.34)

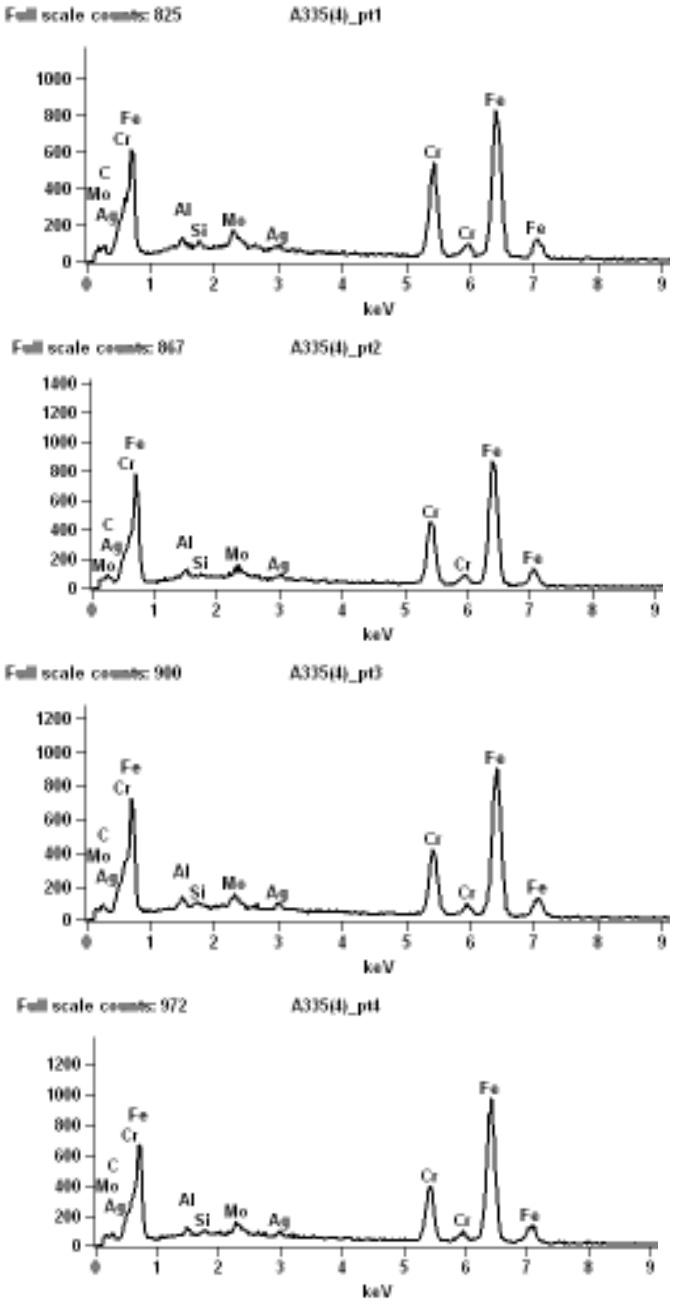
Palyginus šių tyrimų rezultatus galima teigti, kad eksploatuoto bandinio ir termiškai apdoroto 14 bandinio pliene chromas difundavo į grūdelių pakraščius, ribas. Tarp grūdelių yra susikaupę chromo junginiai, karbidai, nes šiuose matomuose intarpuose chromo atomų kiekis daugiau kaip 3 kartus viršija chromo kiekį pačiame grūde.



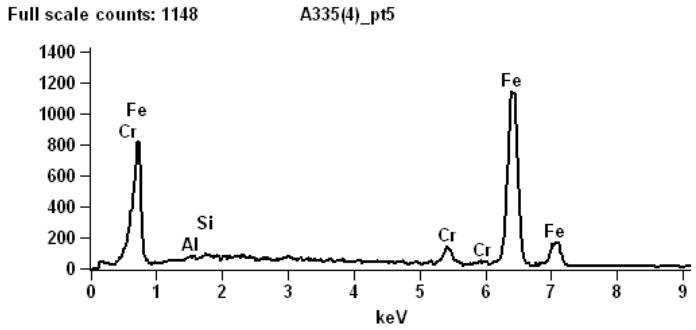
3.36 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo plieno bandinio B mikrostruktūra, cheminės sudėties nustatymo taškai
Fig. 3.36. Microstructure of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joint specimen B, points of chemical composition detect

3.2 lentelė. Eksploatuoto bandinio B mikrostruktūros taškų cheminė sudėtis (atomai %)
Table 3.2. Chemical composition microstructure points, in service specimen B (atoms %)

Taško Nr.	Si-K	Cr-K	Fe-K	Mo-L
1	0,53	23,31	61,17	1,50
2	0,21	22,26	71,50	1,30
3	0,72	20,30	77,44	1,53
4	0,55	19,55	78,58	1,31
5	0,73	4,95	94,31	-



3.37 pav. 1÷4 taškų (3.36 pav.) cheminės sudėties nustatymo spektrogramos
Fig. 3.37. Spectrogram of chemical compositions, point 1÷4 (Fig. 3.36)



3.38 pav. 5 taško (3.36 pav.) cheminės sudėties nustatymo spektrograma
Fig. 3.38. Spectrogram of chemical compositions, point 5 (Fig. 3.36)

Mikrostruktūros tyrimais nustatyta, kad trapios struktūros dalys visiškai pradeda transformuotis tik esant pakankamai aukštai temperatūrai, t. y. didesnei kaip 650 °C. Temperatūra yra pagrindinis ir labiausiai struktūrinius pokyčius lemiantis terminio apdorojimo parametras. Taip pat temperatūros pakėlimas yra labiau *P* pokytį lemiantis veiksnys nei laikas. Norint, kad įvyktų visiška martensito transformacija esant 650 °C temperatūrai, reikia ne mažiau kaip 8 valandų, tuo atveju *P* bus lygus 19,3. Padidinus temperatūrą iki 700 °C martensito transformacija įvyksta per 1 valandą, tada *P* yra lygus 19,46. Padidinus išlaikymo laiką šioje temperatūroje iki 8 valandų, kai *P* padidėja iki 20,36, ryškių struktūros pokyčių neįvyko, palyginti su 1 valandos išlaikymu. Struktūroje nematyti martensito plokštelių, karbidų išsidėstymas priimtinas, nėra sankaupų grūdelių pakraščiuose. Toks pat vaizdas matomas, kai terminio apdorojimo temperatūra padidinama iki 750 °C ir išlaikymas lygus vienai valandai (*P* lygus 19,46). Esant tokiems parametrams struktūra taip pat yra priimtina.

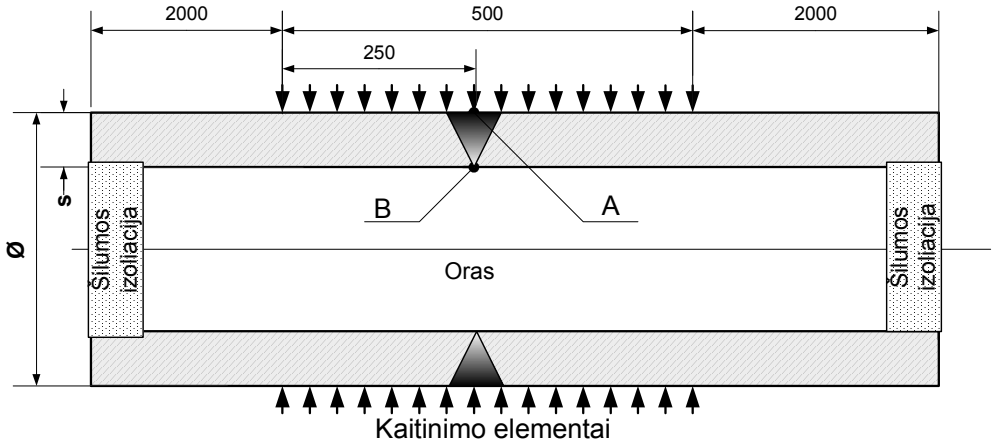
Toliau keliant temperatūrą ir didinant išlaikymo laiką, sparčiau vyksta anglies ir chromo atomų difuzija ir grūdelių pakraščiuose susidaro chromo karbidų sankaupos. Mažėja smulkių, dispersiškų karbidų pačiuose grūdeliuose, o tai mažina plieno stiprumą. Mikrostruktūros cheminė analizė parodė, kad 14 bandinio (terminis apdorojimas, kai $P>22$) ir eksploatuoto bandinio mikrostruktūros nuotraukose (3.29 pav. – 3.32 pav.) matomi intarpai grūdelių ribose yra sudaryti daugiausia iš chromo junginių. Galima teigti, kad tai chromo karbidai. Intarpuose tarp grūdelių chromo koncentracija 3–4 kartus didesnė nei grūdelio viduryje. 14 ir eksploatuoto (100 000 h) bandinio mikrostruktūros labai panašios, o tai reiškia, kad atlikdami terminį apdorojimą mes išprovokavome struktūros degradaciją net nepradėjus eksploatuoti gaminio.

Remiantis šiais rezultatais galima teigti, kad 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių terminis apdorojimas yra priimtinas, kai temperatūra ne mažesnė už 650 °C ir ne didesnė už 750 °C, o *P* reikšmė yra nuo 19,3 iki 20,5.

3.3. Suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo kaitinimo spartos apskaičiavimas

Suvirintųjų jungčių kaitinimo ir aušinimo sparta, greitis terminio apdorojimo metu taip pat vaidina labai svarbų vaidmenį. Cr-Mo plienui kaitinimo sparta turi būti kuo mažesnė, kad dėl tūrinių arba struktūrinių virsmų neatsirastų plyšių ir papildomų įtempių. Kaip minėta pirmame skyriuje, iki 400 °C chromo-molibdeno pliene struktūriniai pokyčiai nevyksta, todėl kaitinimo sparta turėtų būti reglamentuota nuo 400 °C. Europos norminiuose dokumentuose nurodoma kaitinimo ir aušinimo sparta yra pernelyg aukšta – 300 °C/h (LST EN 13445, LST EN 13480), nes taip gali susidaryti trapios struktūros. Taip galima spręsti iš pirmame skyriuje parodytos izoterminio virsmo diagramos (1.3 pav.). Amerikos mechanikos inžinierių asociacijos standartuose nurodyta 50 °C/h *(ASME B and PVC)* kaitinimo ir aušinimo sparta yra priimtina, nes tokiu greičiu kaitinant ir aušinant suvirintąją Cr-Mo plieno jungtį, trapios struktūros nesusidarys ir nebus sukelta papildomų įtempių. Maža kaitinimo sparta turi dar vieną privalumą – tai temperatūros suvienodinimas per visą jungties skerspjūvį. Montuojant technologinius vamzdynus atliekamas lokalinis suvirintųjų jungčių terminis apdorojimas, nes tūrinio terminio apdorojimo praktiškai pritaikyti neįmanoma dėl vamzdynų ir tūrinių kaitinimo krosnių geometrinių matmenų. Dažniausiai naudojami lankstūs varžiniai kaitinimo elementai, kurie montuojami iš vamzdžių išorės. Kaitinimas vyksta tik iš vienos vamzdžio sienelės skerspjūvio pusės ir vidiniame vamzdžio sienelės paviršiuje temperatūra skirsis nuo išorinio sienelės paviršiaus temperatūros. Baigtinių elementų metodu, panaudodami ANSYS programinę įrangą, nustatėme temperatūros pasiskirstymą įvairių storių vamzdžio suvirintos jungties skerspjūvyje, kai kaitinimo greitis yra 50 °C/h. Siekiant palyginti buvo pasirinkti tokie vamzdžių sienelės storiai – 13, 20, 25, 50, 70 mm. Kaip parodyta terminio apdorojimo modelyje (3.39 pav.), lokalinio terminio apdorojimo metu suvirintoji jungtis yra kaitinama iš išorinės vamzdžio pusės. Terminio apdorojimo metu temperatūra yra matuojama taške A, taške B temperatūra nežinoma, todėl visuose norminiuose dokumentuose didinant jungties sienelės storį yra ilginamas išlaikymo laikas. Tai yra neekonomiška ir gali būti, kad kuriose nors vamzdžio sienelės skerspjūvio srityse viršysime nustatytą optimalią *P* ribą ir sukelsime metalo savybių degradaciją. Kaip parodė skaičiavimo rezultatai (3.3 lentelė), jei kaitinimo sparta yra 50 °C/h,

nėra būtina didinti išlaikymo laiką terminio apdorojimo temperatūroje norint suvienodinti temperatūros reikšmes visame vamzdžio sienelės skerspjūvyje.



3.39 pav. Vamzdžio suvirintosios jungties terminio apdorojimo modelis
Fig. 3.39. Pipe post-weld heat treatment model

Kaip parodė skaičiavimo rezultatai (3.3 lentelė), jei kaitinimo sparta yra 50 °C/h, nėra būtina didinti išlaikymo laiką terminio apdorojimo temperatūroje norint suvienodinti temperatūros reikšmes visame vamzdžio sienelės skerspjūvyje. Terminio apdorojimo temperatūrą pakėlus iki 700 °C arba iki 750 °C, kai vamzdžio sienelės storis yra nuo 13 iki 25 mm, temperatūros skirtumas tarp skerspjūvio taškų A ir B yra nuo 0,5 iki 1 °C. Esant pakankamai dideliam vamzdžio sienelės storiui, t. y. 70 mm, ir didžiausiam iš skaičiuotų skersmeniui, kai taške A temperatūra pasiekia 700 °C, taške B temperatūra yra žemesnė tik 10 °C. Kai taške A temperatūra pasiekia 750 °C, vidinėje jungties sienelės pusėje temperatūra bus taip pat ~10 °C žemesnė. Toks temperatūrų skirtumas neturi sudaryti sąlygų tam, kad skirtinguose skerspjūvio taškuose vyktų skirtingi mikrostruktūriniai procesai. Išskyrus tuos atvejus, kai pasirenkami ribiniai terminio apdorojimo parametrai. Remiantis atliktais skaičiavimais ir literatūros šaltinių analize galima nustatyti, kad chromo-molibdeno plienų suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo kaitinimo sparta turi būti 50 °C/h, sparta kontroliuojama nuo 400 °C. Aušinimo sparta taip pat nustatoma 50 °C/h iki 400 °C temperatūros, toliau galima aušinti išjungus temperatūros palaikymo kontrolę, paliekant jungtį savaime aušti po termoizoliacinės vatos sluoksniu.

3.3 lentelė. Apskaičiuota 5 % Cr–0,5 % Mo plieno vamzdžio suvirintosios jungties temperatūra

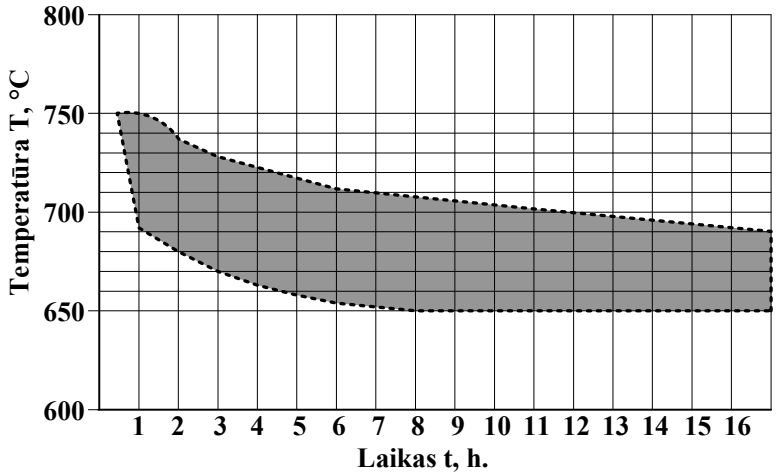
Table 3.3. Calculated temperature of 5 % Cr–0,5 % Mo steel pipe welded joint

Skesmuo, Ø, mm	Sienelės storis, S, mm	Kaitinimo greitis, ˚C/h	A taško temperatūra, T_A, ˚C	B taško temperatūra, T_B, ˚C
219	13	50	700	699,68
		50	750	749,68
	20	50	700	699,27
		50	750	749,27
	25	50	700	698,88
		50	750	748,88
	50	50	700	695,93
		50	750	745,93
	70	50	700	692,92
		50	750	742,6
377	13	50	700	699,67
		50	750	749,67
	70	50	700	691,18
		50	750	741,15
550	13	50	700	699,66
		50	750	749,66
	70	50	700	690,90
		50	750	740,58
1000	13	50	700	699,60
		50	750	749,58
	70	50	700	690,03
		50	750	739,98

3.4. Optimalių terminio apdorojimo parametrų, temperatūros ir išlaikymo laiko nustatymas

Ankstesniuose skyriuose nustatėme, kad atliekant 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių terminį apdorojimą, optimalios mechaninės savybės ir priimtina mikrostruktūra pasiekiama, kai parametro *P* reikšmė yra nuo 19,3 iki 20,5 ir temperatūra nuo 650 iki 750 °C. Terminio apdorojimo parametras *P* yra apskaičiuojamas pagal 1.3 formulę.

Optimalias temperatūros ir laiko parametro *P* ir temperatūros reikšmes perkėlę į šią funkciją sudarėme 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių optimalių terminio apdorojimo parametrų, temperatūros ir išlaikymo laiko nomogramą (3.40 pav.).



3.40 pav. 5 % Cr–0,5 % Mo grupės plienų suvirintųjų jungčių optimalių terminio apdorojimo parametrų parinkimo nomograma
Fig. 3.40. Nomogram of optimal post-weld heat treatment parameters of 5 % Cr–0,5 % Mo steel welded joints

Terminio apdorojimo parametrus reikia rinktis taip, kad jie pakliūtų į nomogramos pilkąją sritį, tuo atveju 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių mechaninės savybės bus optimalios, taip pat bus priimtina mikrostruktūra. Parametrus reikia rinktis atsižvelgiant į ekonomiškumo rodiklius ir įrangos galimybes. Pavyzdžiui, pasirenkant žemesnę temperatūrą, reikalingas ilgesnis išlaikymo laikas ir dėl to užtrunka montavimo darbai, o tai labai nenaudinga naftos chemijos pramonėje. Naftos perdirbimo įmonėje kiekviena prastovos diena sukelia milijoninius nuostolius. Kitu atveju, padidinus temperatūrą, galima

sumažinti išlaikymo laiką, bet tada gali iškilti terminio apdorojimo įrangos pajėgumo problemų. Termiškai apdorojant didelio sienelės storio vamzdynų elementus gali neužtekti įrangos galios norimai temperatūrai pasiekti, todėl tikslinga rinktis vidutines terminių apdorojimo parametrų reikšmes.

Žinodami priimtiną temperatūros ir laiko parametro reikšmių intervalą, pasirenkame vidutinę P reikšmę. Šiuo atveju galima teigti, kad terminis apdorojimas bus optimalus, kai parametro P reikšmė bus lygi 20. Perkėlę šią reikšmę į 2.6 ir 2.7 išraiškas gausime empirines 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių optimalios terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parinkimo formules:

$$T = \frac{20 \times 10^3}{20 + \lg t}, \tag{3.1}$$

$$t = 10^{(20000/T)-20}, \tag{3.2}$$

čia T – terminio apdorojimo temperatūra, K; t – išlaikymo laikas terminio apdorojimo temperatūroje, h.

5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių optimalūs terminio apdorojimo parametrai gali būti parenkami pagal 3.40 paveiksle pavaizduoto grafiko pilkąją sritį arba apskaičiuojami pagal 3.1 ir 3.2 formules.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Termiškai neapdorotos 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintosios jungtys yra netinkamos eksploatuoti, labai trapios ir kietos. Siūlės kietumas yra ~380 HB ir smūginis tąsumas kambario temperatūroje yra ~26 J/cm^2, o 0 °C temperatūroje – tik ~9 J/cm^2. Kaip parodė mikrostruktūros ir lūžių fraktogramų tyrimai, taip yra todėl, kad plieno struktūra yra martensitinė ir trapi.
2. 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių siūlės metalo ir TPS kietumas tolygiai mažėja, didėjant parametrui P. Padidinus temperatūros ir laiko parametro P reikšmę vienetu, kietumas sumažėja ~30 HB. Priimtina jungties kietumo reikšmė pasiekiama, kai P>18,7.
3. Nustatyta, kad 5 % Cr–0,5 % Mo plieno suvirintųjų jungčių takumo ir stiprumo ribos reikšmės yra optimalios, kai terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parametro P reikšmė yra nuo 17 iki 20,5. Stiprumo riba krenta tolygiai, P padidinus vienetu, sumažėja ~15 MPa. Kai P reikšmė yra nuo 17 iki 20,5, takumo riba išlieka iš esmės nepakitusi.

4. 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių smūginio tąsumo reikšmės yra aukščiausios (+20 °C temperatūroje ~190 J/cm^2, 0 °C temperatūroje ~160 J/cm^2), kai *P* reikšmė yra nuo 19 iki 20,5. Didinant *P* nuo 15,5 iki 19 siūlės smūginis tąsumas didėja ~45 J/cm^2 kiekvienam *P* padidėjimo vienetui. Toliau iki *P* – 20,5 smūginio tąsumo reikšmė išlieka iš esmės nepakitusi ~190 J/cm^2.
5. Kai parametras *P* yra didesnis už 21,4 arba po ilgos eksploatacijos aukštoje temperatūroje (100 000 valandų 530 °C) žymiai sumažėja 5 % Cr–0,5 % Mo plienų smūginio tąsumo reikšmės 0 °C temperatūroje, palyginti su smūginiu tąsumu kambario temperatūroje. Suvirintųjų jungčių smūginis tąsumas sumažėjo ~80 J/cm^2, eksploatuoto plieno smūginis tąsumas sumažėjo ~170 J/cm^2.
6. 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių priimtina mikrostruktūra (nematyti martensito plokštelių, tolygus karbidų pasiskirstymas, nėra sankaupų grūdelių pakraščiuose) gaunama, kai terminio apdorojimo temperatūra yra nuo 650 iki 750 °C ir *P* yra nuo 19,3 iki 20,5. Taip pat esant tokiems parametrams lūžis yra plastiškas, turintis antrinių plyšių, kurie išskaido ir sugeria smūgio energiją. Tai ir lemia aukštas stiprumo ir smūginio tąsumo reikšmes.
7. Padidinus *P* reikšmę daugiau kaip 20,5, karbidai koaguliuoja ferito grūdelių ribose, sudaro karbidų kolonijas, jungiasi į ilgus vientisus junginius, smulkių, dispersiškų karbidų nelieka, vyksta struktūros degradacija. Tai lemia ir mechanines savybes. Sumažėja stiprumo, takumo riba ir smūginis tąsumas. Nuo *P* – 20,5 siūlės smūginis tąsumas mažėja ~35 J/cm^2, o takumo riba ~50 MPa kiekvienam *P* padidėjimo vienetui.
8. Atliekant storasienių vamzdžių suvirintųjų jungčių terminį apdorojimą lanksčiais kaitinimo elementais, optimalus įkaitinimo greitis yra 50 °C/h. Šiuo atveju nereikia skirti papildomo laiko temperatūrai suvienodinti per visą jungties skerspjūvį.
9. Pasirinkę 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo parametrus pagal 3.40 paveikslo nomogramą arba apskaičiuodami pagal 3.1 ir 3.2 formules, gausime optimalias jungčių mechanines savybes, taip pat gausime plastišką struktūrą be trapių ir kietų sričių. Temperatūros reikšmė apskaičiuojant laiką turi būti pasirenkama nuo 650 iki 750 °C.

Bendrosios išvados ir apibendrinimai

1. Chromo-molibdeno plienų suvirintųjų jungčių vidiniams įtempiams mažinti turi būti taikomas tik terminis apdorojimas. Kiti įtempių mažinimo metodai šiems plienams yra nepriimtini.
2. Termiškai neapdorotos 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintosios jungtys yra netinkamos eksploatuoti, labai trapios ir kietos. Siūlės kietumas ~380 HB ir smūginis tąsumas kambario temperatūroje tik ~26 J/cm^2, o 0 °C temperatūroje tik ~9 J/cm^2.
3. Temperatūros ir laiko parametras *P*, naudojamas valkšnumo procesui prognozuoti, supaprastina suvirintųjų jungčių optimalių terminio apdorojimo parametrų nustatymo procedūrą. Sudarius suvirintųjų jungčių mechaninių savybių ir parametro *P* tarpusavio priklausomybę, nustatomos tokios *P* reikšmės, kurioms esant gaunamos geriausios jungčių mechaninės savybės.
4. 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parametro *P* reikšmė turi būti ne mažesnė už 19,3. Nors mechaninių savybių priimtinos ar optimalios reikšmės gaunamos ir esant mažesnėms *P* reikšmėms (priimtinas kietumas <240 HB, kai P>18,7; optimalios takumo ir stiprumo reikšmės, kai P>17; smūginio tąsumo aukščiausios reikšmės, kai P>19), priimtina mikrostruktūra (nematyti martensito plokštelių, tolygus karbidų pasiskirstymas, nėra

sankaupų grūdelių pakraščiuose) gaunama, kai terminio apdorojimo temperatūra yra nuo 650 iki 750 °C ir *P* reikšmė yra ne mažesnė už 19,3.

5. Nustatyta, kad 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parametro *P* reikšmė turi neviršyti 20,5. Viršijus šią reikšmę, vyksta struktūros degradacijos procesas, karbidai koaguliuoja ferito grūdelių ribose, sudaro karbidų kolonijas, jungiasi į ilgus vientisus junginius, smulkių, dispersiškų karbidų nelieka. Taip pat mažėja mechaninių savybių reikšmės, mažėja jungties stipris, mažėja smūginis tąsumas.
6. Daugiau kaip 100 000 valandų 530 °C temperatūroje eksploatuoto 5 % Cr–0,5 % Mo plieno slėginiai įrenginiai ir nauji įrenginiai, kurių terminio apdorojimo temperatūros ir laiko parametras *P* yra didesnis už 20,5, negali būti veikiami slėgio žemesnėje nei kambario temperatūroje. Žemesnėje temperatūroje smūginio tąsumo reikšmės sumažėja iki nepriimtinų reikšmių (min 58 J/cm^2).
7. Nustatyta, kad atliekant 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių terminį apdorojimą optimalios mechaninės savybės ir priimtinos mikrostruktūros gaunamos, kai parametro *P* reikšmė yra nuo 19,3 iki 20,5 ir kai terminio apdorojimo temperatūros reikšmė yra nuo 650 iki 750 °C.
8. Atliekant 5 % Cr–0,5 % Mo plienų storasienių vamzdžių suvirintųjų jungčių terminį apdorojimą lanksčiais kaitinimo elementais, optimalus įkaitinimo greitis yra 50 °C/h.
9. Nustatytos dvi 5 % Cr–0,5 % Mo plienų suvirintųjų jungčių optimalių terminio apdorojimo parametrų parinkimo metodikos. Terminio apdorojimo parametrai parenkami pagal sudarytą nomogramą arba apskaičiuojami pagal išvestas empirines formules.

Literatūros sąrašas

ASM Handbook. 1994. Welding, Brazing and Soldering, 10 edition. ASM International, V. 6. 2873 p.

ASM Handbook. 1987. Fractography, 9 edition. ASM International, V. 12. 517 p.

ASTM B31.3. 2006. Process piping. New York. 310 p.

ASME BPVC VIII. 2007. ASME Boiler and Pressure Vessel Code VIII. Division 1. New York. 922 p.

Bailey, N. 1994. *Weldability of feritic steels*. Woodhead publishing. 286 p.

Baker, R. G.; Nutting, J. 1959. The Tempering of 2.25Cr–1Mo Steel after Quenching and Normalising, *Journal of the Iron and Steel Institute* 192: 257–268.

Baltušnikas, A.; Levinskas, R.; Lukošiūtė, I. 2007. Kinetics of Carbide Formation During Ageing of Pearlitic 12X1Mф Steel, *Mater. Sci.* (Medžiagotyra) 13(4): 286–292.

Cai, G. J.; Andrén, H. O.; Svensson, L. E. 1998. Microstructural change of a 5 % Cr steel weld metal during tempering, *Materials Science and Engineering* 242: 202– 209.

Dimelfi, R. J. 1978. Comments on: "Understanding the Larson-Miller parameter", by F. T. Furillo, S. Purushothaman and J. K. Tien, *Scripta Metallurgica* 12(4): 327–329.

Epselis, N. 1996. *Literature review of weld stress relieving of transportable pressure vessels*. University of Wollongong. 8 p.

Evans, G. M.; Bailey, N. 1997. *Metallurgy of basic weld metal*. Woodhead publishing. 448 p.

Feng, Z. 2005. *Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion*. Woodhead publishing. 364 p.

Folkhard, E. 2004. *Welding metallurgy of stainless steels*. Springer. 279 p.

Furillo, F. T.; Purushothaman, S.; Tien, J. K. 1977. Understanding the Larson-Miller parameter, *Scripta Metallurgica* 11: 493–496.

Hertzberg, R. W. 1983. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. John Wiley & Sons. 697 p.

Xu, H.; Huang, X. K.; Yang, Z.; Pan, J. T. 2003. Property changes of 12Cr1MoV vith 10CrMo910 main steam piping after long-term high-temperature service, *Engineering Failure Analysis* 10: 245–250.

Hull, D. 1999. *Fractography– observing, measuring, and interpreting fracture surface topography.* Cambridge university press. 359 p.

Jurčius, A.; Kumšlytis, V.; Valiulis, A. V. 2008. Vibratory stress relieving – it's advantages as an alternative to thermal treatment, *Vibroengineering* 10(2): 123–127.

Jurčius, A.; Kumšlytis, V.; Valiulis, A. V. 2008. Vibrational conditioning of metals is the alternative to classical thermal stress relief, *Proceedings of 13th International Conference "Mechanika 2008"*: 202–206.

Kazakovtseva, V. A.; Usikov, M. P. 1982. Direct electron microscopic observation of carbide formation processes in the martensite of chromium steel, *Physics of Metals and Metallography* 54(3): 105–113.

Kumšlytis, V.; Valiulis, A. V; Černašėjus, O. 2007. The influence of temperature- time parameter of welded joints thermal treatment on strength-related characteristics of chromium-molybdenum and low-alloy manganese steels, *Materials Science* (Medžiagotyra) 13(2): 123–126.

Kumšlytis, V.; Valiulis, A. V.; Černašėjus, O. 2008. The strength-related characteristics of chromium-molybdenum P5 steel dependence on postweld heat treatment parameters, *Mechanika* 3(71): 27–30.

Kumšlytis, V.; Valiulis, A. V; Černašėjus, O.; Jaskiewicz, A. 2008. Investigation of 5 Cr– 0.5 Mo Steel Welded Joints Metal Degradation in the Process of Intensive Heat Treatment, *Proceedings of the IIW International Conference, Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry*: 123–126.

Larson, F. R.; Miller, J. A. 1952. Time-temperature relationship for rupture and creep stresses, *ASME* 74: 765−775.

Levinskas, R.; Baltušnikas, A.; Lukošiūtė, I. 2008. Assessment of state of power plant steel 12Х1МФ from the structure point of view, *Proceedings of the 13th International Conference "Mechanica 2008"*: 314–319.

LST CEN ISO/TR 15608. 2003. Suvirinimas. Metalų grupavimo sistemos gairės. Lietuvos standartizacijos departamentas. 45 p.

LST EN 13445-4. 2004. Nekaitinamieji slėginiai indai. 4 dalis. Gamyba. Lietuvos standartizacijos departamentas. 50 p.

LST EN 13480-4. 2003. Metalinis pramoninis vamzdynas. 4 dalis. Gamyba ir klojimas. Lietuvos standartizacijos departamentas. 45 p.

Manson, S. S.; Halford, G. R. 2006. *Fatigue and durability of structural materials*. ASM International, 456 p.

Orie, K.; Roper, Ch. R. 2003. The effect PWHT on normalized base-metal properties of ASTM A516 steel, *WRC Bulletin* 481: 1–22.

Robson, J. D.; Bhadeshia, H. K. D. H. 1996. Kinetics of precipitation in power plant steels, *Calphad* 20(4): 447–460.

Rudzinskas,V.; Valiulis, A. V.; Černašėjus, O.; Višniakov, N. 2003. Dynamics of properties and structure changes of pearlite steel during long-live operation, *Materials Science* (Medžiagotyra) 9(2): 164–168.

Sterjovski, Z.; Carr, D.G.; Dunne, D. P.; Ambrose, S. 2005. Effect of PWHT cycles on fatigue crack growth and toughness of quenched and tempered pressure vessel steels, *Materials Science and Engineering* 391: 256–263.

Tarpani, J. R.; Braz, M. H. P.; Filho, W. W. B.; Spineli, D. 2002. Microstructural and Fractographic Characterization of a Thermally Embrittled Nuclear Grade Steel: Part I - Annealing, *Materials Research* 5: 34–39.

Thomson, R. C.; Bhadeshia, H. K. D. H. 1994. Changes in Chemical Composition of Carbides in 2-25Cr-1 Mo Power Plant Steel. Part 1: Bainitic Microstructure, *Materials Science and Technology* 10: 193–203.

Thomson, R. C.; Bhadeshia, H. K. D. H. 1994. Changes in Chemical Composition of Carbides in 2-25Cr-1Mo Power Plant Steel. Part 2: Mixed Microstructure, *Materials Science and Technology* 10: 205–208.

Tilack, D.; Guthrie, J. 1999. Select the right alloys for refineries and petrochemical plants, *Chemical Engineering Progress* 2: 1–8.

Totten, G. E.; Maurine, A.; Howes, H. 1997. *Steel heat treatment handbook*. Marcel Dekker. 1192 p.

Totten, G. E. 2006. *Steel heat treatment, metallurgy and technologies*. Taylor and Francais Group, LLC. 820 p.

Upitis, E. 2003. The effect of post weld heat treatment on notch toughness of welded joints in C-Mn steesl, *WRC Bulletin 481*: 23–83.

Valiulis, A. V. 2007. *Legiruotieji plienai ir jų suvirinimas.* Technika. 248 p.

Van Bohemon, S.; Hermans, M.; Den Ouden, G. 2001. Monitoring of martensite formation during welding by means of acoustic emission, *Journal of Physics* 34(22): 3312–3317.

Акулов, А. И.; Асиновская, Г. А.; Баженов, В. В.; Баранов, Д. Н.; Бельчук, Г. А.; Виноградов, В. С.; Журавицкий, Ю. И.; Зайцев, К. И.; Земзин, В. Н.; Имшенник, К. П.; Крюковский, В. Н.; Нешумова, С. П.; Никифоров, Г. Д.; Ольшанский, Н. А.; Петров, Г. Л.; Стеклов,О. И.; Фролов, В. В.; Чернышов, Г. Г.; Шашин, Д. М.; Шиганов, Н. В. 1978. *Сварка в машиностроении.* Справочник Т.2. Москва: Машиностроение. 462 с.

Земзин, В. Н. 1972. *Жаропрочность сварных соединений*. Машиностроение. 270 с.

Кумшлитис, В.; Чернашеюс, О. 2005. Исследование зависимости механических свойств металла сварных соединений CR-MO сталей от параметров термической обработки после сварки, *Машиностроение и Техносфера XXI Века, Сборник Трудов XII Международной Научно-Технической Конференции* 2: 174–177.

ОСТ 36-50-86. 1986. Трубопроводы стальные технологические. Термическая обработка сварных соединений. Типовой технологический процесс. 28 р.

РТМ 26-44-82. 1982. Термическая обработка нефтехимической аппаратуры и ее элементов. 22 р.

.

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Kumšlytis, V.; Valiulis, A. V.; Černašėjus, O. 2008. The strength-related characteristics of chromium-molybdenum P5 steel dependence on postweld heat treatment parameters, *Mechanika* 3(71): 27–30. (Thomson ISI Web of Science). ISSN 1392-1207.

Jurčius, A.; Valiulis, A. V.; Kumšlytis, V. 2008. Vibratory stress relieving – it's advantages as an alternative to thermal treatment, *JVE Journal of Vibroengineerin* 10(1): 123–127. (Thomson ISI Web of Science). ISSN 1392-8716.

Kumšlytis, V.; Valiulis, A. V.; Černašėjus, O. 2007. The influence of temperature-time parameter of welded joints thermal treatment on strength-related characteristics of chromium-molybdenum and low-alloy manganese steels, *Materials Science (Medžiagotyra)* 13(2): 123–126. (Thomson ISI Web of Science). ISSN 1392-1320.

Straipsniai kituose leidiniuose

Kumšlytis, V.; Valiulis, A. V.; Černašėjus, O. 2008. The influence of temperature-time parameter of P5 steel joints postweld heat treatment on hardness and strength-related characteristics, *Mechanika, Proceedings of the 13th International Conference*: 291–296. (Inspec). ISSN 1822-2951.

Jurčius, A.; Valiulis, A. V.; Kumšlytis, V. 2008. Vibrational conditioning of metals is the alternative to classical thermal stress relief, *Mechanika, Proceedings of the 13th International Conference*: 202–206. (Inspec). ISSN 1822-2951.

Кумшлитис, В.; Чернашеюс, О. 2005. Исследование зависимости механических свойств металла сварных соединений CR-MO сталей от параметров термической обработки после сварки, *Машиностроение и Техносфера XXI Века, Сборник Трудов XII Международной Научно-Технической Конференции* 2: 174–177. ISBN 966-7907-19-8.

Kumšlytis, V.; Valiulis, A. V.; Černašėjus, O. Jaskiewicz, A. 2008. Investigation of 5 Cr – 0.5 Mo Steel Welded Joints Metal Degradation in the Process of Intensive Heat Treatment, *Proceedings of the IIW International Conference, Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry*: 809–813. ISBN 978-3-85125-019-0.

Priedai

A priedas. AB Mažeikių naftoje suremontuotų riformingo vamzdynų suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo technologija

Vamzdynų remontą atliko kompanija NAFTOBUDOWA S. A. (Lenkija). Suvirintųjų jungčių terminio apdorojimo parametrai pasirinkti pagal disertacijoje sudarytą nomogramą.

Document No:	PIP01-PWHT	Rev.	0

NAFTOBUDOWA S.A.
ul. Powstańców 68
31- 670 Kraków - Poland
tel.: + 48 / 12 / 646 75 00
fax. + 48 / 12 / 646 75 55

Procedure for Post Weld Heat Treatment and Hardness Test

Unit : ERECTION OF PIPE no. 206/2; 206/3; 206\4;207/1; 302/1
Montaż rurociągu nr 206/2; 206/3; 206\4;207/1; 302/1

Client Project No. :
NB Proj. No.
Reference docs : -
Dok. związane

Remarks : -
Uwagi

Rev.	Issue date	Description	Issued by	Checked by	Approved by
4					
3					
2					
1					
0	05/03/2009	First issue – For approval	MP		

NAFTOBUDOWA S.A.
ul. Powstańców 65
31- 670 Kraków - Poland
tel.: + 48 / 12 / 646 75 00
fax. + 48 / 12 / 646 75 55

	PROCEDURE FOR HEAT TREATMENT AFTER WELDING AND FOR HARDNESS TEST	No: 051	
	PROCEDURA OBRÓBKI CIEPLNEJ I BADANIA TWARDOŚCI ZŁĄCZY SPAWANYCH	Revision: 0	Page/ Strona: 2 of 3

1. GENERAL RULES

1.1 Heat treatment shall be performed by means of a resistance annealing unit, known under commercial name "Heat Treatment Unit VAS 82 (Weldotherm)", and by means of the Weldotherm COMP 6a recorder – for detailed information, see three attached pages.

1.2 Heat treatment shall be applied locally, within a zone containing the weld and at least 3t width of the welded material, symmetrically on both sides of the weld, where t = thickness of the welded joint.

1.3 Temperature shall be measured with a chromel-alumel thermocouple, welded to the base material along the lines determining the border of the welding zone.
One (1) thermocouple shall be applied for pipe diameters 6" or smaller, and two (2) thermocouples for pipe diameters bigger than 6". The thermocouples shall be installed respectively at the bottom (180°) of the weld, or symmetrically, on the top (0°) and at the bottom (180°) of the weld.

1.4. Thermal insulation of the annealing zone should ensure appropriate and stable final temperature in the whole zone.

1.5. Temperature and time must be recorded.

2. METHODS OF HEATING AND COOLING DURING WELDING

2.1. Before starting the welding operation, the weld should be dried and kept in a temperature of at least 10°C.

2.2 During the welding operation of low alloy steel, the temperature between weld beads cannot exceed 350 °C as specified in the attached PWHT instruction.

2.3 After welding, the temperature of the whole weld shall be equalized, and the weld shall be cooled in a calm air, under insulation.

3.0 ANNEALING PROCESS

3.1 Optimal PWHT parameters given from diagram Fig.1

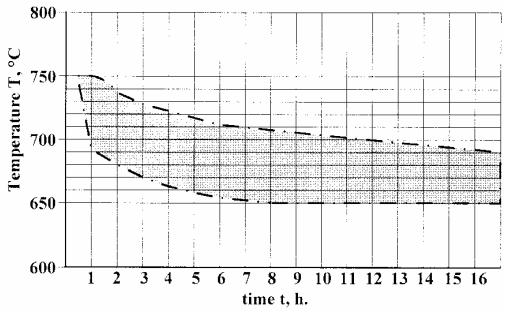


Fig. 1. Optimal PWHT parameters of 5%Cr-0,5%Mo steels (by V. Kumslytis "Effect of Post-weld heat treatment on the mechanical properties of chromium-molybdenum steel welded joints')

PWHT Instructions OC/10/07 – See attached.

NAFTOBUDOWA S.A.
ul. Powstańców 66
31-670 Kraków - Poland
tel.: + 48 / 12 / 646 75 00
fax. + 48 / 12 / 646 75 55

	PROCEDURE FOR HEAT TREATMENT AFTER WELDING AND FOR HARDNESS TEST	No: 051	
	PROCEDURA OBRÓBKI CIEPLNEJ I BADANIA TWARDOŚCI ZŁĄCZY SPAWANYCH	Revision: 0	Page / Strona: 3 of 3

3.2 Heat treatment shall be conducted at the following temperatures depending on steel grade:*

- 730 °C for S.A. 335 P 5
-730 °C for S.A. 335 P 5 to S.A. 335 P22
The maximum temperature must be lower than the tempering temperature given in the material specification by at least 10°C.

* for temp. tolerances see the attached PWHT Instruction

4.0 HARDNESS TEST

4.1 After heat treatment, hardness tests shall be conducted in the following zones:

- in the weld zone,
- in the heat-affected zone
- in the base metal

4.2. Hardness tests shall be conducted by means of the MIC 10 & Dyna MIC (Krautkramer) device – for detailed information, see four attached pages.

4.3. The maximum permissible hardness cannot exceed :

S.A 335 P5 - HB 241

5.0 REPORT

The printouts of annealing curves and hardness test results shall be collected in the following forms:

1. Heat Treatment Certificate
2. Hardness Test Report

Naftobudowa S.A. ul. Powstańców 66 31-670 Kraków	INSTRUKCJA OBRÓBKI CIEPLNEJ	IN. nr:	OC / 10 / 07
	HEAT TREATMENT INSTRUCTION	Zmiana nr: Revision No.	0

Dział: Section:	Przedmiot: Subject: **SA 335 P5**
Nr. szkicu: Sketch No.	Przygotowanie elementów do obróbki cieplnej: Preparation of Elemennts for Heat Treatment

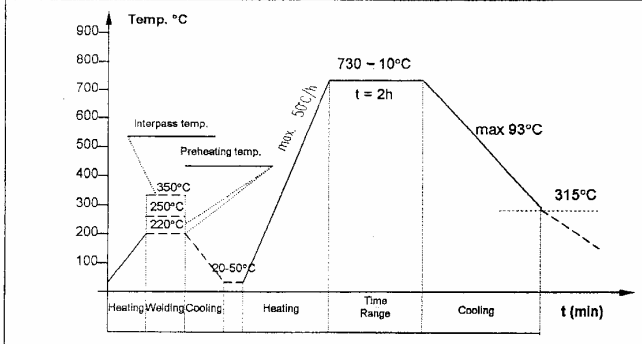
Rodzaj obróbki cieplnej
Kind Heat Treatment Process:

☐ Wyżarzanie normalizujące Normalization	☐ Hartowanie i odpuszczanie Hardening and Tempering
☐ Odpuszczanie Tempering	☒ Wyżarzanie odprężające Stress Relieving

Metoda obróbki cieplnej Method of Heat Treatment	Kontrola i rejestracja temperatury Control and Temperature Records
☐ w piecu/ in Furnace	☐ termopary piecowe/ Furnace Thermocouples
☒ miejscowa oporowa/ Resistance Local	☒ termopary kontaktowe/ Contact Thermocouples
☐ miejscowa indukcyjna/ Induction Local	☒ rejestrator/ Registrator

Lp.	Nominalna grubość elementu (mm) Nominal Element Thickness (mm)	Nagrzewanie Heating		Wygrzewanie Soaking		Chłodzenie Cooling		
		max. temp. załadunku (°C) max. Temp. of Charge	max.szybkość (°C / h) Max. Speed	temp. (°C) Temp.	czas (min) Time	max szybk. (°C/h) Max.Speed	do temp (°C) Up to the Temp.	Ośrodek Medium
1	3÷30	-	-	220 - 250	welding	-	-	A
2	3÷30	20 - 50	50	730	120	93	315	I

*)A- w spokojnym powietrzu F - w piecu I - w izolacji W - w wodzie O - w oleju
A - in the air F - in Furnace I - in Insulation W - in Water O - in Oil



Opracował: Preperatet by:	Marcin Pisiak	Data: Date:	05.03.2009	Podpis: Signature:	Marcin Pisiak
Zatwierdził: Approved by:	Vigantas Kumslytis	Data: Date:	09.03.2009	Podpis: Signature:	

B priedas. Mechaninių bandymų rezultatai

B1 lentelė. Kietumo matavimų rezultatai, skalė HB
Table B1. Hardness test results, HB

Bandinio Nr.	Suvirinimo siūlė		Terminio poveikio sritis		Pagrindinis metalas	
	Kietumas	Vidurkis	Kietumas	Vidurkis	Kietumas	Vidurkis
0	366 377 387	377	350 345 376	357	176 188 183	182
1	350 387 388	375	300 240 330	290	173 175 176	175
2	345 344 339	343	330 342 350	341	180 165 178	174
3	266 256 259	260	249 250 253	251	174 175 163	171
4	260 255 254	256	240 220 235	232	165 176 172	171
5	207 195 199	200	210 205 195	203	177 174 169	173
6	189 190 187	189	170 186 180	179	180 175 171	175
7	338 358 354	350	355 348 359	354	174 192 192	186
8	295 320 306	307	304 296 285	295	175 185 168	176

B.1 lentelės pabaiga

Bandinio Nr.	Suvirinimo siūlė		Terminio poveikio sritis		Pagrindinis metalas	
	Kietumas	Vidurkis	Kietumas	Vidurkis	Kietumas	Vidurkis
9	245 256 234	245	231 215 224	223	165 171 170	167
10	180 184 180	181	175 168 169	171	174 180 172	175
11	184 182 176	181	170 178 190	179	169 169 167	168
12	155 153 160	156	157 160 162	160	166 163 158	162
13	161 169 181	170	186 190 160	179	156 160 165	160
14	153 149 147	150	149 156 150	152	168 157 160	162
A	-	-	-	-	181 178 181	180
B	-	-	-	-	124 130 128	127

B.2 lentelė. Tempimo bandymų rezultatai
Table B2. Tensile test results

Bandinio Nr.	Stiprumo riba R_m, MPa			Takumo riba Re, MPa		
	Bandymo rezultatai		Vid. reikšmė	Bandymo rezultatai		Vid. reikšmė
0	595,6	602	598,8	-	-	-
1	593,8	596,6	595,2	-	-	-
2	594,1	599	596,55	-	-	-
3	590,2	597,6	593,9	435,3	368,1	401
4	595,2	593,6	594,4	348,7	430,3	390
5	585,2	580,2	582,7	382,1	336,9	359,45
6	575,8	577,2	576,5	339,1	330,3	334,5
7	597,0	593,4	595,2	314,4	363,8	339,1
8	599,8	597,1	598,45	425,7	362,3	394
9	588,7	584,2	586,45	338,2	357,6	347,9
10	577,3	568,7	573	344,7	351,6	348,15
11	562,7	575,7	569,2	391,6	341,7	366,6
12	529,8	537,3	533,55	285,5	310	297,7
13	513,4	490,6	502	333,4	277,1	305,25
14	508,6	483,4	496	234	227,9	231
A	591	595,8	593,4	411	416	413,5
B	472	474	473	233	232	232,5
Pagal ASME A335			Min 415			Min 205

B.3 lentelė. Suvirintų bandinių smūginio bandymo rezultatai, bandymo temperatūra +20 °C
Table B3. Impact strength test results at +20 °C of welded specimens

Bandinio Nr.	Smūginis tąsumas KCVWT, J/cm^2				Smūginis tąsumas KCVHT, J/cm^2			
	Bandymo rezultatai			Vid. reikšmė	Bandymo rezultatai			Vid. reikšmė
0	31,5	24	22,3	25,9	290	245	320	285
1	42,3	35.2	37	38	335	331	315	327
2	57,5	60	62	59,8	358,8	366,3	356	360,4
3	101,3	126,3	115,6	114,4	366,3	366,3	365	365,9
4	166,3	190	180	178,8	366,3	366,3	366,3	366,3
5	197,5	190,0	195	194,3	365	366,3	366,3	365,9
6	181	195	199	192	366,3	366,3	366,3	366,3
7	45	52,3	49	48,8	350	317,5	320	329,2
8	86	68	75	76,3	311,3	265	260	278,8
9	122,5	128,8	124,8	125,4	366,3	342,5	350	352,9
10	162,5	167,5	166	165,3	366,3	366,3	366,3	366,3
11	198	175	190	188	353,8	366,3	366,3	362
12	192	170,2	175	179,1	366,3	366,3	366,3	366,3
13	197	136	155	162,7	304	302	295	300,3
14	131	113	118	121	330	253	265	283

B.4 lentelė. Naujo ir eksploatuoto vamzdžio smūginio tąsumo bandymų rezultatai, bandymo temperatūra +20 °C
Table B4. Impact strength test results at +20 °C of new and operated pipe

Bandinio Nr.	Smūginis tąsumas KCV, J/cm^2			
	Bandymo rezultatai			Vid. reikšmė
A	366,3	366,3	362	365
B	206	208	209	207,7

B.5 lentelė. Suvirintų bandinių smūginio tąsumo bandymų rezultatai, bandymo temperatūra 0 °C
Table B4. Impact strength test results at 0 °C of welded specimens

Bandinio Nr.	Smūginis tąsumas KCVWT, J/cm^2			
	Bandymo rezultatai			Vid. reikšmė
0	6	8.5	12	8.8
1	12,5	21	14	15,8
2	23	18,5	22	21,2
3	65	74,5	60,4	66,6
4	120	108	124	117,3
5	160	165,5	158	161,2
6	168	175	165	169,3
7	15,5	20	16	17,2
8	48	35,5	38	40,5
9	85	78	96,5	86,5
10	135	124,5	140	133,2
11	162	164,5	170	165,5
12	156,5	148	165,5	156,7
13	84,5	65	60,5	70
14	52,5	38	47	45,8

B.6 lentelė. Naujo ir eksploatuoto vamzdžio smūginio tąsumo bandymų rezultatai, bandymo temperatūra 0 °C
Table B6. Impact strength test results at 0 °C of new and operated pipe

Bandinio Nr.	Smūginis tąsumas KCV, J/cm^2			
	Bandymo rezultatai			Vid. reikšmė
A	280	320	335	312
B	36	28	40	35

TERMINIO APDOROJIMO POVEIKIS CHROMO-MOLIBDENO PLIENŲ SUVIRINTŲJŲ JUNGČIŲ MECHANINĖMS SAVYBĖMS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
mechanikos inžinerija (09T)

EFFECT OF POST-WELD HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CHROME-MOLYBDENUM STEEL WELDED JOINTS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Mechanical Engineering (09T)

2009 11 12. 10,75 sp. l. Tiražas 30 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
http://leidykla.vgtu.lt
Spausdino UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius,
http://www.kopija.lt