

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Aurimas JURČIUS

# KONSTRUKCINIO PLIENO LIEKAMŲJŲ SUVIRINIMO ĮTEMPIŲ VIBRACINIO ATLEIDIMO TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
MECHANIKOS INŽINERIJA (09T)



Vilnius LEIDYKLA  
TECHNIKA 2010

Disertacija rengta 2006–2010 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>*

VG TU leidyklos TECHNIKA 1738-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-564-9

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2010

© Aurimas, Jurčius, 2010

*[Aurimas.Jurcius@vgtu.lt](mailto:Aurimas.Jurcius@vgtu.lt)*

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Aurimas JURČIUS

EFFECT OF VIBRATORY TREATMENT  
ON RESIDUAL STRESSES  
IN STRUCTURAL STEEL WELDMENTS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
MECHANICAL ENGINEERING (09T)



Vilnius LEIDYKLA  
TECHNIKA 2010

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2006–2010.

**Scientific Supervisor**

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

# Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamas vibracinio apdorojimo poveikis suvirintos konstrukcijos liekamiesiems įtempiams. Pagrindinis tyrimo objektas yra liekamųjų suvirinimo įtempių ir mechaninių suvirintos jungties savybių pokytis po vibracinio apdorojimo. Disertacijos tikslas yra neardomaisiais kontrolės metodais ištirti liekamųjų suvirinimo įtempių pokytį po vibracinio apdorojimo bei įvertinti kontrolės metodų pritaikymą konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje. Taip pat siekiama nustatyti konstrukcinio plieno suvirintų jungčių mechaninių savybių ir skirtingų liekamųjų suvirinimo įtempių sumažinimo technologijų tarpusavio priklausomybę.

Suvirinant storasienes gaminius, neišvengiamai susidaro liekamieji įtempiai, kurie gali sukelti pirmalaikį suvirintos konstrukcijos susilpnėjimą žemiau leistinos ribos, dėl to konstrukcija gali staigiai suirti. Plieninių konstrukcijų gamybos standartai nurodo liekamuosius suvirinimo įtempius sumažinti terminiu būdu, tačiau tai reikalauja didelių energijos ir laiko sąnaudų. Tam tikrais atvejais plieninių konstrukcijų gamyboje terminio apdorojimo atlikti neįmanoma. Alternatyvusis vibracinis metodas gali sumažinti liekamuosius įtempius su minimaliomis energijos ir darbo sąnaudomis, tačiau metodo naudingo poveikio tyrimas išlieka svarbiu disertacijos mokslinių tyrimų uždaviniu. Darbe sprendžiami šie pagrindiniai uždaviniai: vibracijos energijos poveikis konstrukcinio plieno suvirintos jungties liekamiesiems įtempiams, mechaninėms savybėms bei technologiniams suvirinamumo ypatumams. Taip pat ieškoma būdų, kaip konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje įvertinti liekamųjų įtempių pokytį po vibracinio apdorojimo.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir rezultatų apibendrinimas. Įvade aptariamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas mokslinis naujumas, pristatomi autoriaus pranešimai ir publikacijos, disertacijos struktūra. Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Čia apžvelgti darbai, kuriuose nagrinėjama liekamųjų įtempių kilmė, poveikis konstrukcijai bei įtempių sumažinimo metodai. Skyriaus pabaigoje pateikiamos išvados ir konkretizuojami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje, metodinėje dalyje, pateikta tyrimų metodika. Aprašyta bandymo metodų esmė, taikymas, eksperimentų atlikimas bei rezultatų apdorojimo metodai. Trečiajame ir ketvirtajame skyriuose, eksperimentinėje dalyje, aprašyta eksperimentų atlikimo eiga, gauti rezultatai ir jų analizė bei pateikti ginamųjų teiginių įrodymai.

Disertacijos tema perskaityti 7 pranešimai Lietuvos konferencijose ir paskelbti 9 moksliniai straipsniai.

# Abstract

The dissertation addresses the affect of vibratory treatment on residual welding stresses. The main research focus is the change in residual welding stresses and mechanical welded joint properties after the vibratory treatment. The aim is to assess the change in residual welding stresses resulting from the vibratory treatment using non-destructive control methods, as well as their application at the manufacturing and assembly site. The dissertation also aims to identify the relationship between the mechanical properties of weldments in the structural steel and various technologies enabling the reduction of residual welding stresses.

Residual stresses occur as part of the welding process of thick-walled items. This may result in a premature weakening of a welded structure below the acceptable limit and lead to a sudden collapse. According to standard requirements for the steel construction, residual welding stresses have to be reduced by the thermal treatment which is energy and time demanding. Moreover, there are instances when the thermal treatment of structural steel is not possible whatsoever. Alternatively, the vibratory treatment could reduce residual stresses with minimum energy and time inputs. However, the research about the feasibility of the application of such method is necessary. Therefore, the main objectives of this study are: to assess the effect of the vibration energy on residual stresses in structural steel weldments, mechanical characteristics and weldability qualities. The study also explores assessment methods of the changes in residual stresses after the vibratory treatment at the manufacturing and assembly site.

The dissertation consists of an introduction, four chapters and a summary of the findings. Introduction discusses the research background, defines aim and tasks, describes the novelty of the study, introduces conference presentations and publications published by the author and ends with an outline of the dissertation. The first chapter consists of the literature review that looks at the causes of residual stresses, their effect on a construction and stress relief methods. The chapter ends with conclusions and specified research objectives.

Second chapter describes the research methodology: the nature of the experiment, its application procedure and analytical approach to the interpretation of the results. The experiment, its findings, the analysis and verification of the defended propositions are presented in the third and fourth chapters.

Seven presentations have been made at various conferences in Lithuania and nine articles have been published by the author on the subject of this dissertation.

---

# Žymėjimai

## Simboliai

- $E$  – tamprumo modulis,  $GPa$ ;  
 $G$  – magnetinio lauko stiprumo gradientas,  $A/m^2$ ;  
 $H_p$  – magnetinio lauko intensyvumas,  $A/m$ ;  
 $HV5$  – kietumas pagal *Vickersą*, esant 5 kg apkrovai,  $HV$ ;  
 $I_{suv}$  – suvirinimo srovė,  $A$ ;  
 $K_{II}$  – akustinio tamprumo konstanta,  $MPa^{-1}$ ;  
 $R_{eH}$  – takumo riba,  $MPa$ ;  
 $R_m$  – stiprumo riba,  $MPa$ ;  
 $v_{suv}$  – suvirinimo greitis,  $mm/s$ ;  
 $V_{suv}$  – suvirinimo įtampa,  $V$ ;  
 $KCV$  – smūginis tūsumas,  $J/cm^2$ ;  
 $\varepsilon$  – deformacija,  $mm$ ;  
 $\theta$  – difrakcijos kampas;  
 $\nu$  – *Puasono* koeficientas;  
 $\sigma$  – įtempiai,  $MPa$ .

## Santrumpos

|                |                                                                                                                                  |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>BEM</i>     | – baigtinių elementų metodas;                                                                                                    |
| <i>EN</i>      | – Europos standartas;                                                                                                            |
| <i>HD/DSPI</i> | – skylės gręžimo/skaitmeninio taško šablono interferometrija<br>( <i>Hole Drilling/Digital Speckle Pattern Interferometry</i> ); |
| <i>ISO</i>     | – Tarptautinė standartizacijos organizacija<br>( <i>International Organization for Standardization</i> );                        |
| <i>LST</i>     | – Lietuvos standartas;                                                                                                           |
| <i>MMM</i>     | – magnetinė metalo atmintis ( <i>Magnetic Metal Memory</i> );                                                                    |
| <i>ND</i>      | – neutronų difrakcija;                                                                                                           |
| <i>PIB</i>     | – paviršinė išilginė banga;                                                                                                      |
| <i>PM</i>      | – pagrindinis metalas;                                                                                                           |
| <i>SPA</i>     | – suvirinimo procedūrų aprašas;                                                                                                  |
| <i>SZ</i>      | – siūlės zona;                                                                                                                   |
| <i>VSR</i>     | – vibracinis įtempių mažinimas ( <i>Vibratory Stress Relief</i> );                                                               |
| <i>TPZ</i>     | – terminio poveikio zona;                                                                                                        |
| <i>TSB</i>     | – tūrinė skersinė banga;                                                                                                         |
| <i>UT</i>      | – ultragarsinė kontrolė ( <i>Ultrasonic Testing</i> );                                                                           |
| <i>XRD</i>     | – rentgeno spindulių difrakcija ( <i>X-Ray Diffraction</i> ).                                                                    |

---

# Turinys

|                                                                                  |       |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------|
| IVADAS .....                                                                     | 1     |
| Problemos formulavimas.....                                                      | 1     |
| Darbo aktualumas.....                                                            | 2     |
| Tyrimų objektas .....                                                            | 2     |
| Darbo tikslas.....                                                               | 2     |
| Darbo uždaviniai .....                                                           | 3     |
| Tyrimų metodika.....                                                             | 3     |
| Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė.....                                      | 4     |
| Darbo rezultatų praktinė reikšmė .....                                           | 4     |
| Ginamieji teiginiai.....                                                         | 4     |
| Darbo rezultatų aprobavimas.....                                                 | 5     |
| Disertacijos struktūra.....                                                      | 5     |
| <br>1. LIEKAMIEJI SUVIRINIMO ĮTEMPIAI, JŲ ATLEIDIMO IR NUSTATYMO<br>METODAI..... | <br>7 |
| 1.1. Liekamieji įtempiai .....                                                   | 7     |
| 1.1.1. Liekamųjų įtempių susidarymas.....                                        | 9     |
| 1.1.2. Terminiai įtempiai ir metalo judėjimas suvirinimo metu .....              | 10    |
| 1.1.3. Liekamųjų įtempių analizė .....                                           | 12    |
| 1.1.4. Liekamųjų suvirinimo įtempių pasiskirstymas konstrukcijose.....           | 13    |
| 1.1.5. Suvirinimo deformacijos .....                                             | 15    |
| 1.2. Liekamųjų suvirinimo įtempių stabilizavimas .....                           | 18    |

|                                                                                            |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1.2.1. Vibracinis įtempių atleidimas.....                                                  | 19     |
| 1.2.2. Terminis įtempių atleidimas.....                                                    | 23     |
| 1.2.3. Technologinis deformacijų ir liekamųjų įtempių valdymas .....                       | 24     |
| 1.3. Liekamųjų įtempių įvertinimas.....                                                    | 24     |
| 1.3.1. Magnetinės metalo atminties metodas.....                                            | 25     |
| 1.3.2. Ultragarso metodas.....                                                             | 26     |
| 1.3.3. Rentgeno spindulių difrakcija.....                                                  | 28     |
| 1.3.4. Neutronų difrakcija.....                                                            | 30     |
| 1.3.5. Skylės gręžimo technologija.....                                                    | 31     |
| 1.3.6. Skaitinis metodas.....                                                              | 33     |
| 1.4. Liekamųjų įtempių poveikis medžiagos mechaniniam stiprumui .....                      | 34     |
| 1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....                  | 37     |
| <br>2. EKSPERIMENTINIO TYRIMO METODIKA.....                                                | <br>39 |
| 2.1. Medžiagos parinkimas.....                                                             | 42     |
| 2.2. Bandinių paruošimas ir suvirinimas .....                                              | 44     |
| 2.3. Vibracinis apdorojimas.....                                                           | 48     |
| 2.4. Liekamųjų įtempių pokyčio įvertinimas.....                                            | 50     |
| 2.4.1. Magnetinio parametro analizė .....                                                  | 50     |
| 2.4.2. Ultragarso bangos sklaidimo greičio analizė.....                                    | 51     |
| 2.4.3. Jonizuojančių spindulių difrakcijos analizė.....                                    | 52     |
| 2.4.4. Skaitmeninio taško šablono interferometrija .....                                   | 54     |
| 2.4.5. Skaitinė analizė .....                                                              | 56     |
| 2.5. Mechaniniai bandymai .....                                                            | 58     |
| 2.6. Antrojo skyriaus išvados .....                                                        | 62     |
| <br>3. LIEKAMŲJŲ ĮTEMPIŲ POKYČIO TYRIMAI.....                                              | <br>63 |
| 3.1. Magnetinės metalo atminties tyrimas.....                                              | 63     |
| 3.1.1. Magnetinio parametro priklausomybės nuo įtempių tyrimas .....                       | 64     |
| 3.1.2. Įtempių koncentracijos nustatymas bandiniuose .....                                 | 67     |
| 3.1.3. Įtempių koncentracija sijos sandūrinėje jungtyje .....                              | 69     |
| 3.2. Ultragarso bangos sklaidimo greičio tyrimas.....                                      | 71     |
| 3.2.1. Akustinio tamprumo konstantos nustatymas .....                                      | 72     |
| 3.2.2. Ultragarso bangos sklaidimo greičio bandinyje tyrimai.....                          | 76     |
| 3.3. Rentgeno spindulių difrakcijos analizė .....                                          | 79     |
| 3.4. Neutronų difrakcijos tyrimai .....                                                    | 82     |
| 3.5. Skylės gręžimo metodo tyrimai.....                                                    | 84     |
| 3.6. Skaitinė liekamųjų įtempių analizė .....                                              | 88     |
| 3.7. Trečiojo skyriaus išvados .....                                                       | 95     |
| <br>4. VIBRACIJOS POVEIKIO MECHANINĖMS IR TECHNOLOGINĖMS JUNGTIES<br>SAVYBĖMS TYRIMAI..... | <br>99 |
| 4.1. Tempimo bandymų rezultatai.....                                                       | 99     |
| 4.2. Smūginio tūsumo bandymų rezultatai .....                                              | 101    |
| 4.3. Kietumo bandymų rezultatai .....                                                      | 102    |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4. Mikrostruktūros tyrimai .....                                         | 105 |
| 4.5. Technologinių suvirinamumo savybių tyrimas .....                      | 111 |
| 4.6. Ketvirtojo skyriaus išvados .....                                     | 114 |
| BENDROSIOS IŠVADOS .....                                                   | 115 |
| LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....                                               | 117 |
| AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA .....                             | 121 |
| PRIEDAI.....                                                               | 123 |
| A priedas. Liekamųjų įtempių matavimo technologijų palyginimas .....       | 123 |
| B priedas. Ultragarso sklaidimo greičio bandiniuose matavimų duomenys..... | 125 |
| C priedas. Įtempių matavimo ultragarsu algoritmas.....                     | 127 |
| D priedas. Suvirinimo procedūros aprašas .....                             | 128 |
| E priedas. Rentgeno spindulių difrakcijos matavimo proceso kintamieji..... | 129 |
| F priedas. Vibracinio apdorojimo protokolas Nr. 1 .....                    | 130 |
| G priedas. Vibracinio apdorojimo protokolas Nr. 2 .....                    | 131 |



---

# Contents

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION .....                                              | 1  |
| The Investigated Problem.....                                   | 1  |
| Importance of the Thesis .....                                  | 2  |
| The Object of Research .....                                    | 2  |
| The Goal of the Thesis .....                                    | 2  |
| The Task of the Thesis .....                                    | 3  |
| Research Methodology.....                                       | 3  |
| Importance of Scientific Novelty .....                          | 4  |
| Practical Significance of Achieved Results.....                 | 4  |
| The Defended Statements.....                                    | 4  |
| Aproval of the Results.....                                     | 5  |
| Dissertation Structure .....                                    | 5  |
| 1. RESIDUAL STRESSES, THEIR RELIEF AND MEASUREMENT TECHNIQUES 7 |    |
| 1.1. Residual Stresses .....                                    | 7  |
| 1.1.1. Formation of Residual Stresses .....                     | 9  |
| 1.1.2. Thermal Stresses and Metal Movement During Welding ..... | 10 |
| 1.1.3. Residual Stress Analysis .....                           | 12 |
| 1.1.4. Distribution of Residual Stresses in Structures .....    | 13 |
| 1.1.5. Welding Deformations .....                               | 15 |
| 1.2. Stabilization of Residual Stresses.....                    | 18 |
| 1.2.1. Vibratory Stress Relief .....                            | 19 |

|                                                                                                           |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1.2.2. Thermal Stress Relief .....                                                                        | 23     |
| 1.2.3. Technological Control of Residual Stresses and Deformations .....                                  | 24     |
| 1.3. Evaluation of Residual Stresses.....                                                                 | 24     |
| 1.3.1. Magnetic Metal Memory Technique .....                                                              | 25     |
| 1.3.2. Ultrasonic Technique .....                                                                         | 26     |
| 1.3.3. X-Ray Diffraction .....                                                                            | 28     |
| 1.3.4. Neutron Diffraction .....                                                                          | 30     |
| 1.3.5. Hole Drilling Technique.....                                                                       | 31     |
| 1.3.6. Numerical Method.....                                                                              | 33     |
| 1.4. The Effect of Residual Stresses on the Mechanical Strength of Material .....                         | 34     |
| 1.5. Conclusions of Chapter One and Formulation of Dissertation Task .....                                | 37     |
| <br>2. EXPERIMENTAL RESEARCH METHODOLOGY .....                                                            | <br>39 |
| 2.1. Material Selection .....                                                                             | 42     |
| 2.2. Preparation and Welding of Specimens .....                                                           | 44     |
| 2.3. Vibratory Treatment.....                                                                             | 48     |
| 2.4. Evaluation of Residual Stress Changes .....                                                          | 50     |
| 2.4.1. Magnetic Parameter Analysis.....                                                                   | 50     |
| 2.4.2. Ultrasonic Wave Propagation Speed Analysis .....                                                   | 51     |
| 2.4.3. Ionizing Ray Diffraction Analysis.....                                                             | 52     |
| 2.4.4. Digital Speckle Pattern Interferometry.....                                                        | 54     |
| 2.4.5. Numerical Analysis .....                                                                           | 56     |
| 2.5. Mechanical Test .....                                                                                | 58     |
| 2.6. Conclusion of Chapter Two .....                                                                      | 62     |
| <br>3. ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS MEASUREMENTS .....                                                     | <br>63 |
| 3.1. Magnetic Metal Memory Analysis.....                                                                  | 63     |
| 3.1.1. The Interdependence of Magnetic Parameter and Stresses .....                                       | 64     |
| 3.1.2. Identification of Stress Concentration in Specimens.....                                           | 67     |
| 3.1.3. Stress Concentration in a Beam Butt Joint .....                                                    | 69     |
| 3.2. Ultrasonic Wave Propagation Analysis.....                                                            | 71     |
| 3.2.1. Acoustoelastic Constant Detection.....                                                             | 72     |
| 3.2.2. Ultrasonic Wave Propagation Speed in Specimens.....                                                | 76     |
| 3.3. X-ray Diffraction Analysis.....                                                                      | 79     |
| 3.4. Neutron Diffraction Analysis .....                                                                   | 82     |
| 3.5. Hole Drilling Method Analysis .....                                                                  | 84     |
| 3.6. Numerical Analysis of Residual Stresses .....                                                        | 88     |
| 3.7. Conclusion of Chapter Three .....                                                                    | 95     |
| <br>4. THE EFFECT OF VIBRATORY TREATMENT ON MECHANICAL AND<br>TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF WELDMENTS ..... | <br>99 |
| 4.1. Tensile Test Results .....                                                                           | 99     |
| 4.2. Impact Test Results .....                                                                            | 101    |
| 4.3. Hardness Test Results .....                                                                          | 102    |
| 4.4. Microstructure Analysis .....                                                                        | 105    |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5. Analysis of Technological Weldability Properties.....                        | 111 |
| 4.6. Conclusion of Chapter Four .....                                             | 114 |
| GENERAL CONCLUSIONS .....                                                         | 115 |
| REFERENCES .....                                                                  | 117 |
| LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF<br>DISSERTATION..... | 121 |
| ANNEXES .....                                                                     | 123 |
| Annex A. Comparison of Residual Stress Measurement Technologies .....             | 123 |
| Annex B. Ultrasonic Wave Propagation Speed Measurements.....                      | 125 |
| Annex C. Algorithm of the Ultrasonic Residual Stress Measurement .....            | 127 |
| Annex D. Welding Procedure Specification.....                                     | 128 |
| Annex E. Variables of the X-ray Diffraction Measurement Process.....              | 129 |
| Annex F. Vibratory Treatment Protocol No. 1 .....                                 | 130 |
| Annex G. Vibratory Treatment Protocol Nr. 2 .....                                 | 131 |



---

# Įvadas

## Problemos formulavimas

Sparčiai augant plieninių konstrukcijų poreikiui, didėja joms keliami reikalavimai. Projektuojant konstrukcijas, siekiama kuo tiksliau nustatyti reikiamą metalo storį, įvertinti konstrukcijos elementų atsparumą apkrovoms bei aplinkos poveikiui. Pramoninės konstrukcijos, tokios kaip rezervuarai, tiltai, slėginiai indai, vamzdynai ir kiti panašūs įrenginiai gaminami iš konstrukcinio plieno. Šio plieno suvirinimo metu, ypač virinant daugiasluoksnes storasienių elementų siūles, sukeliami liekamieji suvirinimo įtempiai, kurie dažnai siekia arba net viršija medžiagos takumo ribą. Šiuos liekamuosius įtempius plieninių konstrukcijų gamybos standartai rekomenduoja termiškai atleisti, kai suvirinamos storesnės kaip 35 mm jungtys. Klasikinis, laiko patikrintas atleidimo metodas, yra terminis apdorojimas. Šio proceso metu palaikoma aukšta konstrukcijos temperatūra, po to lėtai aušinant pasiekiamas liekamųjų įtempių sumažėjimas. Yra žinoma, kad liekamuosius įtempius konstrukcijoje galima sumažinti ne tik terminiu būdu. Pasaulyje vibracinis metodas liekamųjų suvirinimo įtempių atleidimui sėkmingai taikomas daugiau kaip 30 metų. Šis metodas, lyginant su klasikiniu atleidimo metodu, pasižymi labai mažomis energijos, darbo ir laiko sąnaudomis. Tačiau po vibracinio apdorojimo būtina nustatyti liekamųjų įtempių pokytį konstrukcijoje. Tiksliais liekamųjų įtempių kontrolės metodais, tokiais kaip rentgeno spindulių ar

neutronų difrakcija, galima išmatuoti įtempių pokytį konstrukcijoje tik laboratorijos sąlygomis. Todėl kyla sunkumų, norint įvertinti vibracijos energijos poveikį liekamiesiems suvirinimo įtempiams konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje.

Disertacijoje nagrinėjamas vibracijos energijos poveikis liekamiesiems suvirinimo įtempiams ir konstrukcijos virintinėms jungtims. Siekiama rasti tinkamiausią liekamųjų suvirinimo įtempių įvertinimo metodą, kurį būtų galima taikyti lauko sąlygomis.

## Darbo aktualumas

Virinant storasienius gaminius, neišvengiamai susidaro liekamieji įtempiai. Suvirinimo siūlėje esantys dideli liekamieji tempimo įtempiai gali sukelti pirmalaidžių suvirintos konstrukcijos susilpnėjimą žemiau leistinos ribos, dėl to konstrukcija gali staigiai suirti. Taigi, į šiuos įtempius būtina atsižvelgti, juos įvertinti ir nustatyti jų galimus padarinius. Laikantis standartų ir gamybos normų reikalavimų, konstrukcijoms atliekamas įtempių atleidimas. Yra du būdai kaip galima pašalinti arba sumažinti liekamuosius įtempius: naudojant terminį arba vibracinį apdirbimo metodus. Terminis apdorojimas reikalauja didelių energijos ir laiko sąnaudų, nes atleidimo procesui reikalinga aukšta temperatūra. Antrasis, vibracinis metodas, mažina ir perskirsto liekamuosius įtempius į nepavojingus lygmenis ir tokiu būdu užtikrina ilgalaikę gaminio būsenos stabilizaciją, panaudojant minimalias energijos ir laiko sąnaudas. Pastarojo metodo naudingo poveikio tyrimas išlieka svarbiu inžinerinės diagnostikos uždaviniu, ypač siekiant perkelti šį apdorojimo būdą iš laboratorijų į realias konstrukcijas.

## Tyrimų objektas

Disertacijos tyrimų objektai:

1. Vibracinio apdorojimo poveikis konstrukcinio plieno suvirinimo liekamiesiems įtempiams.
2. Neardomieji liekamųjų įtempių matavimo metodai, jų taikymas konstrukcijos gamybos ir surinkimo aikštelėje.

## Darbo tikslas

Šio darbo pagrindinis tikslas yra ištirti kaip galima sumažinti liekamuosius suvirinimo įtempius konstrukcijoje vibraciniu būdu, tyrimus atliekant

neardomosios kontrolės metodais: magnetinės metalo atminties, ultragarso bangos sklidimo, rentgeno spindulių difrakcijos, neutronų difrakcijos, skylės gręžimo. Taip pat siekiama įvertinti tyrimui naudojamų metodų praktinį pritaikymą konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje.

Disertacijoje numatoma nagrinėti vibracinio apdorojimo taikymo liekamųjų suvirinimo įtempių atleidimui problemą, siekiant atskleisti vibracijos energijos poveikį ir šio metodo teikiamus privalumus. Problemos sprendimas grindžiamas neardomosios kontrolės metodais, skirtais liekamųjų suvirinimo įtempių ar jų koncentracijos sričių pokyčio nustatymui, po vibracinio apdorojimo.

Taip pat disertacijoje siekiama nustatyti konstrukcinio plieno suvirintų jungčių mechaninių savybių ir liekamųjų suvirinimo įtempių atleidimo technologijų tarpusavio priklausomybę.

## Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Įvairiais neardomais įtempių matavimo metodais, ištirti vibracinio apdorojimo poveikį liekamiesiems suvirinimo įtempiams konstrukcijoje.
2. Pasiūlyti konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje tinkamą naudoti liekamųjų suvirinimo įtempių kontrolės metodiką bei sudaryti jos įgyvendinimo algoritmą.
3. Skaitiniu metodu nustatyti liekamųjų suvirinimo įtempių pasiskirstymą bandinio pjūvyje.
4. Ištirti vibracijos energijos poveikį suvirinamumui bei pasiūlyti technologines suvirinamumo savybes gerinančius darbo režimus.
5. Ištirti suvirintos jungties mechaninių savybių bei mikrostruktūros pokytį, kai suvirinimo jungtis apdorojama vibraciniu būdu.
6. Išanalizuoti vibracinio įtempių atleidimo privalumus ir trūkumus.

## Tyrimų metodika

Disertacijoje taikomi eksperimentiniai, skaitiniai bei lyginamieji tyrimo metodai. Eksperimentų metu buvo tiriami liekamųjų įtempių bei mechaninių savybių pokyčiai, taikant skirtingas įtempių atleidimo technologijas. Tyrimams buvo panaudoti šiuolaikiški metodai: rentgeno spindulių difrakcijos, neutronų difrakcijos, magnetinės metalo atminties, ultragarso, skylės gręžimo, skaitmeninio taško šablono interferometrijos, optinės mikroskopijos, radiografinės kontrolės bei klasikiniai mechaninių savybių nustatymo metodai.

## Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

Rengiant disertaciją buvo gauti šie mechanikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Ištirta ultragarso paviršinės išilginės bangos sklidimo greičio ir įtempių priklausomybė konstrukcinio plieno suvirinimo siūlėje bei pagrindiniame metalė; ištirtas ultragarso paviršinės išilginės bangos metodo taikymas liekamųjų įtempių įvertinimui po vibracinio apdorojimo. Taikant pasiūlytą įtempių matavimo algoritmą, galima įvertinti vibracijos poveikį liekamiesiems įtempiams konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje, kuomet nėra galimybės taikyti kitų įvertinimo metodų.
2. Nustatyta konstrukcinio plieno suvirintų jungčių mechaninių savybių ir skirtingų atleidimo technologijų tarpusavio priklausomybė; ištirtas vibracijos energijos poveikis konstrukcinio plieno suvirinamumui bei pasiūlyti darbo režimai, gerinantys technologines suvirinamumo savybes vibracinio apdorojimo metu.

## Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Vibracinis apdorojimas *suvirinimo metu* sumažina liekamuosius įtempius jungtyje iki lygio, pasiekiamo taikant terminį poveikį. Dėl vibracinio poveikio suvirinimo jungtis tampa plastiškesnė, nepraranda stiprumo bei kietumo.

Ultragarso paviršinės išilginės bangos metodas bei pasiūlytas įtempių matavimo algoritmas leidžia įvertinti liekamųjų suvirinimo įtempių pokytį po vibracinio apdorojimo konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje.

Tyrimais nustatyti tinkamiausi vibracinio apdorojimo ir suvirinimo režimai. Juos taikant, pagerinamas konstrukcinio plieno technologinis suvirinamumas, efektyviai atleidžiami liekamieji suvirinimo įtempiai.

Remiantis tyrimų rezultatais, galima siūlyti Europos standartizacijos komisijai įtraukti vibracinio apdorojimo metodą į plieninių konstrukcijų gamybos norminius dokumentus, kaip analogą terminiam apdorojimui.

## Ginamieji teiginiai

1. Patikimas būdas išmatuoti konstrukcinio plieno suvirintos jungties liekamųjų įtempių pokytį po vibracinio apdorojimo (konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje) yra ultragarso paviršinės išilginės bangos sklidimo metalu registravimas ir analizė.

2. Skirtingi liekamųjų suvirinimo įtempių atleidimo metodai sąlygoja plieno suvirintų jungčių mechanines savybes ir liekamųjų įtempių lygmenį.
3. Vibracinio apdorojimo suvirinimo metu sukeliama defektų galima išvengti naudojant technologines suvirinimo proceso priemones.
4. Vibracinį apdorojimą galima taikyti neribotų matmenų konstrukcijoms, pagamintoms iš paprasto ar plakiruoto konstrukcinio plieno.

## Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 9 moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson ISI* sąrašą (*Jurčius 2008a, Jurčius 2010*); vienas – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje, referuotoje *Scopus* duomenų bazėje (*Jurčius 2009b*); trys – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje, referuotoje *Inspec* duomenų bazėje (*Jurčius 2008b, Jurčius 2008c, Jurčius 2009a*); trys – kitose respublikinių konferencijų medžiagose (*Jurčius 2006, Jurčius 2007, Rumbutis 2009*).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti septyniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ 2006–2009 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Mechanika“ 2008, 2009 m. Kaune;
- Tarptautinėje konferencijoje „Vibroengineering“ 2008 m. Kaune;
- Tarptautinėje konferencijoje „Mechatronic Systems and Materials“ 2009 m. Vilniuje.

## Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir rezultatų apibendrinimas.

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

Darbo apimtis yra 122 puslapiai (be priedų), tekste panaudotos 33 numeruotos formulės, 94 paveikslai ir 9 lentelės. Taip pat yra 7 priedai. Rašant disertaciją buvo panaudoti 57 literatūros šaltiniai.



---

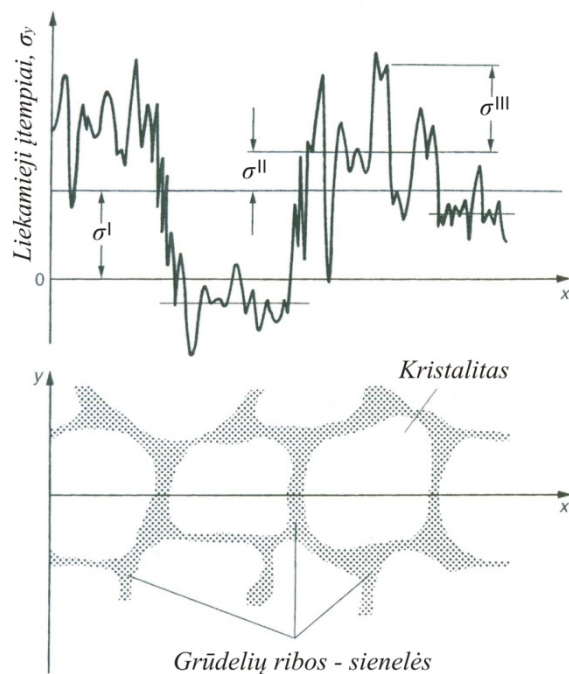
## Liekamieji suvirinimo įtempiai, jų atleidimo ir nustatymo metodai

Šiame skyriuje apžvelgiami liekamieji suvirinimo įtempiai, jų poveikis konstrukcijai, aptariami įtempių mažinimo būdai bei nagrinėjami jų nustatymo metodai. Didžiausias dėmesys skiriamas liekamųjų suvirinimo įtempių vibracinio atleidimo ir įtempių matavimo metodams, kurių praktinį pritaikymą realiuose pramoninės statybos objektuose siekiama ištirti disertacijoje.

### 1.1. Liekamieji įtempiai

Kompleksiniai terminiai įtempiai konstrukcijoje atsiranda suvirinimo metu, dėl vietinio kaitinimo. Liekamieji įtempiai ir deformacijos, liekančios po suvirinimo, yra baigtinės. Trumpalaikiai terminiai įtempiai, liekamieji įtempiai ir deformacijos kartais tampa įtrūkių ir blogos jungties priežastimi. Suvirinimo siūlėje esantys dideli liekamieji tempimo įtempiai gali sukelti pirmalaikį suvirintos konstrukcijos susilpnėjimą žemiau leistinos ribos. Deformacijos bei liekamieji gniuždymo įtempiai pagrindiniame metalė gali sumažinti konstrukcijos elemento leistiną lenkimo jėgą, priklausomai nuo gniuždymo apkrovos. Neigiamos deformacijos ištaisymas yra brangus ir kai kuriais atvejais negalimas (*Radaj 2003*).

Liekamieji įtempiai pasižymimi trimis skiriamaisiais susidarymo bei veikimo požymiais (1.1 pav.). Pirmos rūšies liekamieji įtempiai  $\sigma^I$  (makro liekamieji įtempiai) išplitę makroskopinėje zonoje. Jie vidutiniškai apima keletą kristalitų. Antros rūšies liekamieji įtempiai  $\sigma^{II}$  (mikro liekamieji įtempiai) veikia tarp kristalitų ir kristalitų sub-regionų (dydis apytiksliai 1,0–0,01 mm). Šie įtempiai vidutiniškai prilygsta sub-regionams (pvz. liekamieji įtempiai susikaupę aplink dislokacijas arba antrines fazes). Trečios rūšies liekamieji įtempiai  $\sigma^{III}$  išsidėsto tarpatominėse srityse (jų dydis apytiksliai siekia nuo  $10^{-2}$  iki  $10^{-6}$  mm, pvz. liekamieji įtempiai, esantys aplink vieną dislokaciją) (Radaj 2003). Disertacijoje yra nagrinėjami ir aptariami makro liekamieji įtempiai.



**1.1 pav.** Pirmos, antros ir trečios grupės liekamieji įtempiai ( $\sigma^I$ ,  $\sigma^{II}$  ir  $\sigma^{III}$ ) kristalitinėje struktūroje

**Fig. 1.1.** Residual stresses of first, second and third kind ( $\sigma^I$ ,  $\sigma^{II}$  and  $\sigma^{III}$ ) in the crystallite structure

Pastovios ilgalaikės deformacijos sukelti liekamieji įtempiai, esantys konstrukcijos elementuose, dar skirstomi į:

- tūrio pokyčio, terminio plėtimosi, cheminio pasikeitimo, mikrostruktūros virsmų arba būsenos pasikeitimo įtempiai;

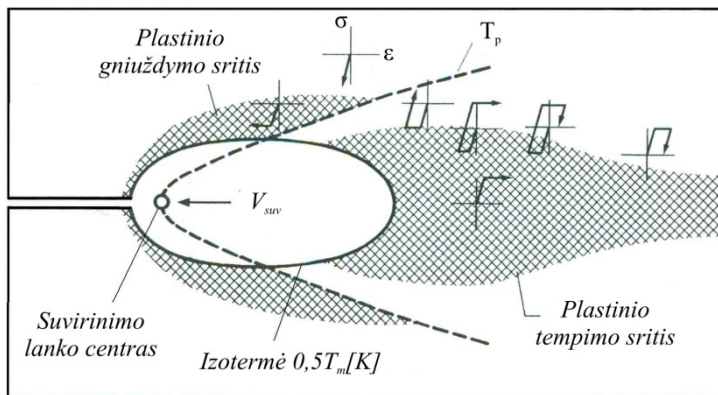
- formos pokyčio, kaip plastinės (nepriklausomai nuo laiko) ir visko-plastinės (priklausomai nuo laiko) deformacijos įtempius (*Radaj 2003*).

### 1.1.1. Liekamųjų įtempių susidarymas

Vidiniai, pirminiai, liekamieji, būdingi ir suspaustieji įtempiai yra tie įtempiai, kurie lieka kūne po apkrovos pašalinimo. Liekamieji įtempiai taip pat susidaro ten, kur yra temperatūros pokyčiai. Šiuos įtempius įprasta vadinti terminiais įtempiais. Įtempių intensyvumas dažniausiai išreiškiamas jėga į ploto vienetą  $N/m^2$ , paskaliais  $Pa$ , kilogramais į kvadratinį milimetrą  $kg/mm^2$  ar svarais į kvadratinį colį  $psi$  matavimo vienetais.

Liekamieji įtempiai gaminyje atsiranda dėl daugelio priežasčių gamybos proceso metu, t. y. liejimo, valcavimo, lenkimo, suvirinimo, terminio pjovimo, kalimo, mechaninio pjovimo ar šlifavimo metu. Pasak autoriaus (*Tall 1991*), liekamieji įtempiai, pagal juos sukeliančius veiksnius, klasifikuojami į dvi grupes:

- įtempiai, sukelti netolygaus tamprųjų įtempių pasiskirstymo, įskaitant plastinius ir terminius įtempius;
- įtempiai, sukelti neteisingo mechaninio apdorojimo.



**1.2 pav.** Plastinės deformacijos zonos ir vietinių įtempių ciklas, judant suvirinimo lankui:  $T_p$  – temperatūros piko kreivė; Izotermė  $0,5T_m[K]$  – kristalizacijos elipsė,  $V_{suv}$  – suvirinimo kryptis

**Fig. 1.2.** Plastic deformation zones and local stress-strain cycles due to the quasi-steady temperature field of the traveling welding heat source: with curve of local peak temperatures  $T_p$  and isotherm of the cut-off temperature at  $0.5T_m [K]$ ; plane coarse model for the simulation of residual stresses;  $V_{suv}$  – direction of welding

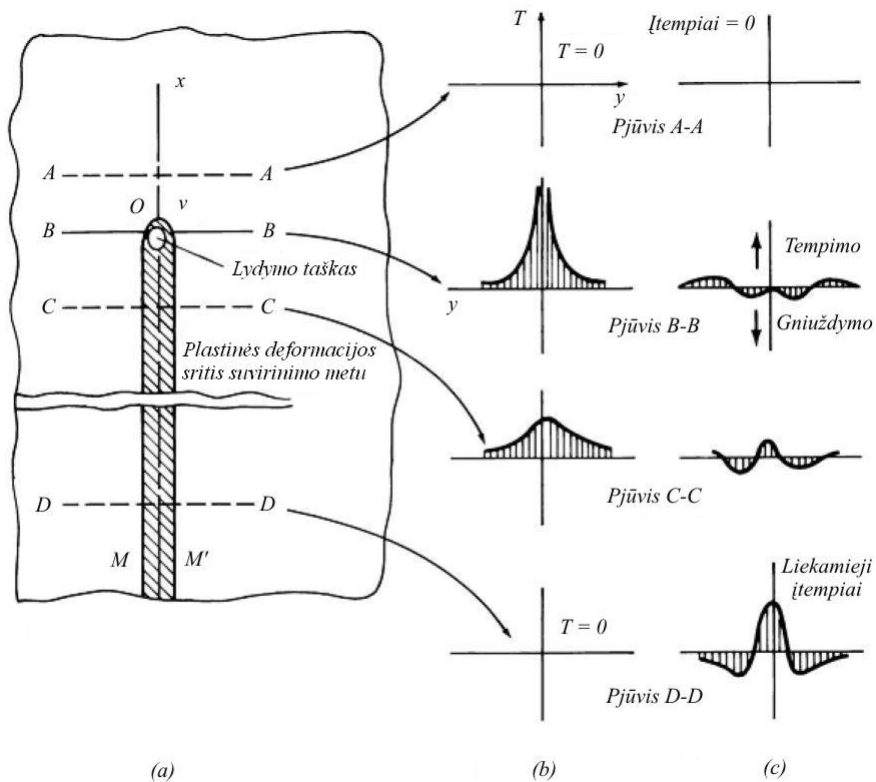
Liekamųjų įtempių termomechaninis formavimasis suvirinimo siūlėje pateiktas 1.2 paveiksle. Izotermės viduje esančiame skystame metalo įtempių nėra aukštos temperatūros dėka. Ši sritis pakeičia gaminio formą, t. y. buvęs tarpelis tarp plokštelių yra užliejamas išsilydžiusiu metalu. Į parabolę panaši punktyrinė linija  $T_p$  žymi vietinės temperatūros piką, t. y. suvirinimo lanko centrą ir temperatūros pasiskirstymą gaminio paviršiuje. Tarp plastinio gniuždymo ir tempimo sričių esančiame plote nėra jokių įtempių, nes prieš tai ten buvę gniuždymo įtempiai, priartėjus šilumos frontui, sumažėja iki nulio. Ties suformuotos suvirinimo siūlės centru susidarę tempimo įtempiai, išlieka siūlei visiškai atvėsus. Būtent šie įtempiai ir vadinami liekamųjų suvirinimo įtempių piku (*Radaj 2003*).

### 1.1.2. Terminiai įtempiai ir metalo judėjimas suvirinimo metu

Suvirinimo metu konstrukcija yra kaitinama viename taške, temperatūros pasiskirstymas yra nepastovus, nes suvirinimo lankas nuolatos juda. Terminio suvirinimo ciklo metu, suvirinimo siūlėje ir aplink esančioje zonoje susidaro kompleksiniai laikini terminiai įtempiai. Suvirinimo konstrukcija skysto metalo kietėjimo ir aušimo metu patiria tūrinius pokyčius ir deformacijas.

**Terminiai įtempiai suvirinimo metu.** 1.3 paveiksle pateikta temperatūros ir susidarančių įtempių pokytis suvirinimo metu, kai suvirinama plona plokštelė išilgai  $x$  ašies. Suvirinimo lankas juda greičiu  $v$ , pradžios taškas žymimas ordinate  $O$  (1.3 pav. a). Plastinės deformacijos, atsiradusios terminio suvirinimo ciklo metu, pažymėtos vertikaliai užbrūkšniuota zona  $M-M'$ . Išlydyto metalo sritis nurodyta šalia  $O$ . Už užbrūkšniuotos dalies esanti zona išlieka elastinga visą suvirinimo laiką (*ASM International 1993*).

Keli temperatūriniai gradientai ( $A-A$ ,  $B-B$ ,  $C-C$ ,  $D-D$ ) išilgai suvirinimo siūlės krypties pateikti 1.3 (b) paveiksle. Pagrindiniame metalo prieš pat suvirinimo lanką (pjūvis  $A-A$ ) esantis temperatūrinis gradientas yra lygus nuliui. Tačiau ties pjūviu  $B-B$ , kuris kerta suvirinimo lanką, gradientas staigiai pakyla. Ties pjūviu  $C-C$ , esančiu šiek tiek už suvirinimo lanko, temperatūrinio gradiento nuolydis mažėja. Gradiento nuožulnumas (pjūvis  $D-D$ ), po suvirinimo praėjus šiek tiek laiko, dar kartą artėja prie nulio. Paveiksle 1.3 (c) pateiktas vidutinis įtempių pasiskirstymas  $x$  ašies ( $\sigma_x$ ) kryptimi ties pjūviais. „y“ ašies ( $\sigma_y$ ) įtempiai ir kirpimo įtempiai ( $\tau_{xy}$ ) taip pat egzistuoja dviejų krypčių įtempių lauke. Erdviniame įtempių lauke yra šeši įtempių komponentai:  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$  ir  $\tau_{zx}$ .



**1.3 pav.** Temperatūros ir įtempių pokytis suvirinimo metu:

a) suvirinimas; b) temperatūros pokytis; c) įtempiai

**Fig. 1.3.** Schematic representation of changes in temperature and stresses during welding: a) weld; b) temperature change; c) stresses

Paveikslas 1.3 (c) rodo vidutinių įtempių (išilgai „y“ ašies) pasiskirstymą „x“ ašyje ( $\sigma_x$ ) priklausomai nuo suvirinimo lanko padėties. Išilgai A-A pjūvio įtempiai beveik lygūs nuliui. Įtempių pasiskirstymas ties B-B pjūviu yra sudėtingas. Šalia suvirinimo lanko esantys įtempiai yra artimi nuliui, nes išlydytas metalas neišlaiko kirpimo apkrovos. Toliau nuo suvirinimo lanko, įtempiai tampa gniuždantys, nes suvirinimo srityje ir aplink ją sparčiai plečiasi metalas. Greitai įvestos šilumos dėka, metalo takumo riba tampa ganėtinai žema. Kitaip tariant, esant atitinkamai temperatūrai, įtempiai tampa didesni už pagrindinio metalo takumo įtempius. Tolstant suvirinimo lankui (mažėjant temperatūrai), gniuždymo įtempiai pasiekia maksimalų dydį. Tačiau, įtempiai esantys toliau nuo suvirinimo lanko yra tempimo įtempiai ir ties suvirinimo lanku jie yra pusiausvyroje su gniuždymo įtempais.

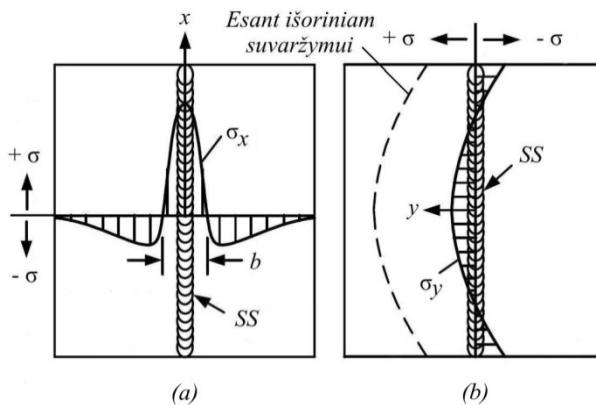
Išilgai  $C-C$  pjūvio (1.3 pav. b) suvirintas metalas ir pagrindinis metalas vės-ta, tuomet metalas susitraukia ir tempimo įtempiai priversti slinkti arčiau suvi-rintos jungties centro. Sumažėjus atstumui iki siūlės, įtempiai tampa gniuždan-tys. Didžiausi tempimo įtempiai atsiranda greta suvirintos siūlės, ties pjūviu  $D-D$ . Gniuždymo įtempiai paprastai susidaro toliau nuo suvirinimo siūlės (*ASM International 1993*).

### 1.1.3. Liekamųjų įtempių analizė

Tipiškas liekamųjų įtempių pasiskirstymas sandūrinėje virintinėje jungtyje pagal *Masubuchi* ir *Martin* (*Kou 2003*) pateiktas 1.4 paveiksle. Išilginių liekamųjų įtempių  $\sigma_x$  pasiskirstymas gali būti apytiksliai išreikštas lygtimi:

$$\sigma_x(y) = \sigma_m \left[ 1 - \left( \frac{y}{b} \right)^2 \right] \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{b} \right)^2 \right], \quad (1.1)$$

čia  $\sigma_m$  – maksimalūs liekamieji įtempiai, kurie paprastai yra didesni už pagrindi-nio metalo takumo ribą;  $b$  – tempimo įtempių srities plotis (1.4 pav.).

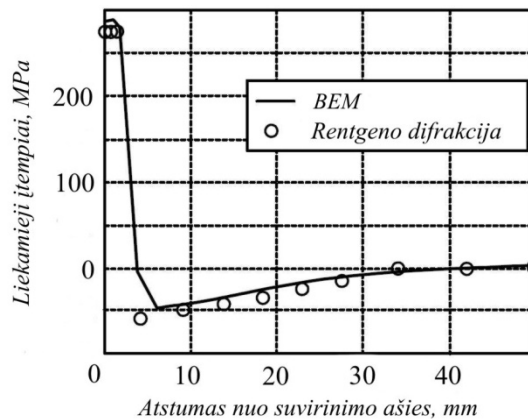


**1.4 pav.** Tipinis išilginių  $\sigma_x$  (a) ir skersinių  $\sigma_y$  (b) suvirinimo įtempių pasiskirstymas sandūrinėje siūlėje

**Fig. 1.4.** Typical longitudinal  $\sigma_x$  (a) and transverse  $\sigma_y$  (b) distribution of residual stresses in butt weld

Skersinių liekamųjų įtempių  $\sigma_y$  pasiskirstymas išilgai suvirinimo siūlės  $SS$  pateiktas 1.4 (b) paveiksle. Palyginti neaukšti tempimo įtempiai atsiranda ties suvirinimo siūlės viduriu, kur skersinis terminis susitraukimas yra slopinamas vėsesnio pagrindinio metalo, esančio toliau nuo suvirinimo židinio. Suvirinimo

siūlės SS viduryje esantys tempimo įtempiai sudaro pusiausvyrą su gniuždymo įtempiais. Jei vėlesnis jungties susitraukimas yra prislopintas priverstiniu suvaržymu (prispaudžiant gaminį spaustuvais), tuomet tempimo įtempiai tolygiai auga išilgai siūlės kaip reakcijos įtempiai. Skersiniams liekamiesiems įtempiams  $\sigma_y$  šis priverstinis suvaržymas vis dėlto turi nedidelį poveikį.



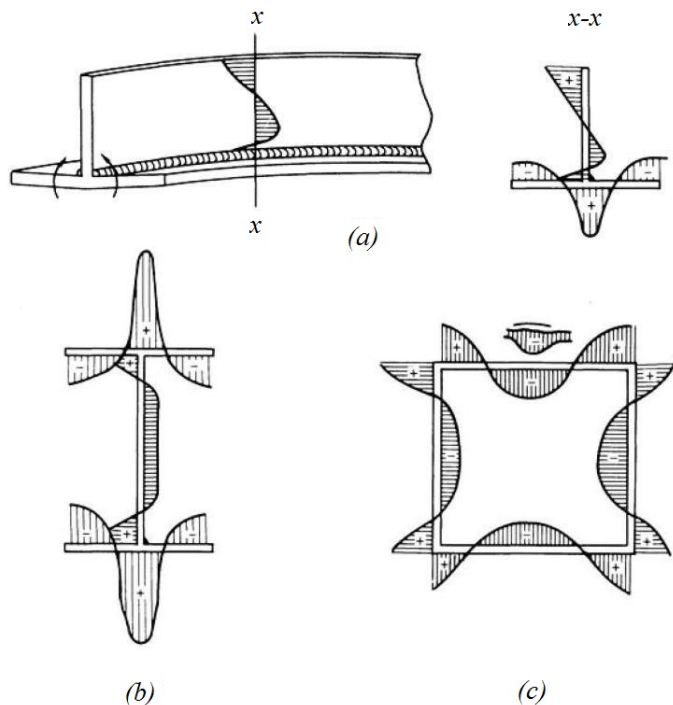
**1.5 pav.** Skaitiniu ir eksperimentiniu būdu nustatyti plieno sandūrinės suvirinimo siūlės liekamieji įtempiai

**Fig. 1.5.** Measured and calculated distributions of residual stress in butt joint of steel

Eksperimentiniu bei skaitiniu būdais nustatyti liekamieji įtempiai  $\sigma_x$ , suvirinto plieninio bandinio ( $600 \times 30 \times 10$  mm) sandūrinėje siūlėje pateikti 1.5 paveiksle. Tempimo įtempiai beveik siekia bandinio medžiagos takumo ribą, gniuždymo įtempiai esantys toliau nuo siūlės centro kelis kartus mažesni nei tempimo įtempiai siūlėje. Skaitinė analizė atlikta baigtinių elementų metodu. Liekamieji įtempiai išmatuoti rentgeno spindulių difrakcijos metodu (Kou 2003).

#### 1.1.4. Liekamųjų suvirinimo įtempių pasiskirstymas konstrukcijoje

Tipinis liekamųjų suvirinimo įtempių pasiskirstymas įvairaus profilio suvirintose jungtyse pateiktas 1.6 paveiksle. Kaip parodyta  $x-x$  pjūvyje (1.6 pav. a), dideli liekamieji įtempiai koncentruojasi ties suvirinimo siūle, lygiagrečiai virinimo linijai. Toliau nuo suvirinimo siūlės išilginiai įtempiai yra gniuždantys. Profilio viršutinėje dalyje esantys tempimo įtempiai sukelia išilginį T-profilio sijos lenkimą. Šie tempimo įtempiai konstrukcijoje susidaro po suvirinimo, išilgai traukiantis metalui. Po suvirinimo taip pat atsiranda ir kampinės deformacijos.



**1.6 pav.** Tipinis liekamųjų įtempių pasiskirstymas:

a) T-profilio jungtyje; b) H-profilio jungtyje; c) kvadratinio profilio jungtyje

**Fig. 1.6.** Typical residual stresses in welded shapes:

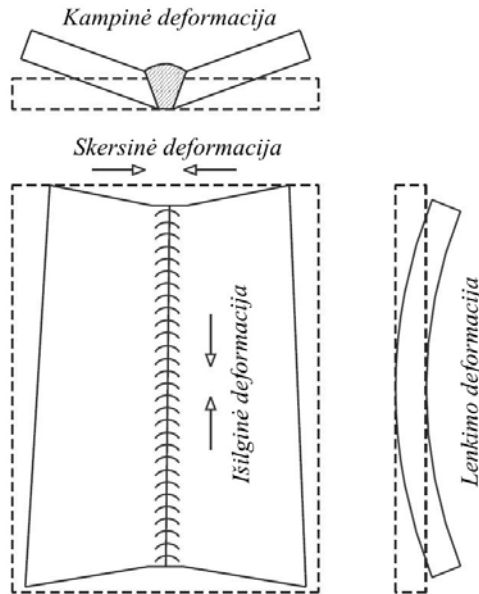
a) T-shapes; b) H-shapes; c) box shapes

Liekamųjų įtempių pasiskirstymas H-profilio ir kvadratinio profilio sandūrinės jungtyse pateiktas 1.6 (b, c) paveiksle. Liekamieji įtempiai pateikti lygiagrečiai suvirinimo linijai: gniuždymo įtempiai koncentruojasi toliau nuo suvirinimo siūlės, tempimo – arčiau siūlės.

Įtempių pasiskirstymas kitų medžiagų (pvz.: aliuminio, vario, titano lydinių) suvirintose jungtyse yra panašus kaip ir aukščiau pateikto mažo anglio plieno. Maksimalūs liekamieji įtempiai susidaro medžiagose, turinčiose aukštą takumo ribą. Viena išimtis yra aukšto stiprumo plienai, tokie kaip *X40CrMoV5-1* (*LST EN ISO 4957:2003*) ar *25CrMo4* (*LST EN 10083-1:2006*). Šių plienų suvirintose jungtyse liekamųjų įtempių pikas viršija medžiagos takumo ribą, tačiau vidutiniai suminiai liekamieji įtempiai siūlėje išlieka žemiau takumo ribos (*ASM International 1993*).

### 1.1.5. Suvirinimo deformacijos

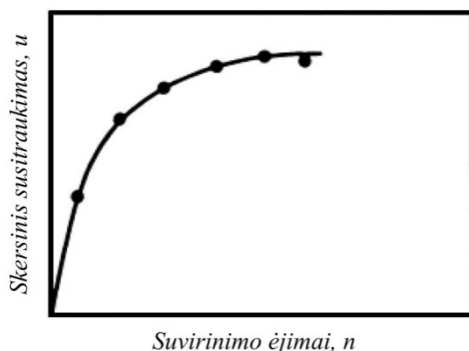
Suvirinimo metu, dėl intensyvių šilumos mainų, jungties metalas deformuojasi (1.7 pav.), todėl konstrukcijoje vyksta jungties skersinis susitraukimas, išilginis susitraukimas lygiagrečiai suvirinimo siūlės, kampinis pokytis aplink suvirinimo ašį bei lenkimo deformacijos išilgai suvirinimo siūlės (*ASM International 1993*).



1.7 pav. Suvirintų jungčių matmenų pokytis po suvirinimo  
Fig. 1.7. Dimensional changes occurring in weldments

**Skersinis susitraukimas.** Plokštelės susitraukimas yra tolygus per visą suvirinimo siūlės ilgį (1.7 pav.). Tačiau ilgose suvirinimo siūlėse skersinis suvirinimo siūlės susitraukimas nėra tolygus ir paprastai yra žymiai sudėtingesnis. Pagrindinis faktorius sukeliantis nevienodą skersinį susitraukimą suvirinimo siūlėje yra sukimo deformacija ir išorinis jungties suvaržymas. Kai dvi atskiros plokštelės yra sujungiamos palaipsniui nuo vieno galo iki kito, nesuvirintos dalies plokštelės briaunos juda sukeldamos sukamąją (lenkimo) deformaciją (1.7 pav.). Pastarąją deformaciją lemia suvirinimo padėtis ir jungties sukabinimų išdėstymas. Praktikoje jungties suvaržymas išilgai suvirinimo siūlės nėra vienodas ar tolygus. Skersinis susitraukimas yra mažesnis kai jungtis yra labai suvaržyta, t. y. nevienodas jungties suvaržymas yra netolygaus skersinio susitraukimo pasiskirstymo priežastis.

Suvirinant sandūrines storasienio metalo jungtis, paprastai atliekami keli ar net keliolika suvirinimo ėjimų. Kreivė (1.8 pav.) rodo skersinio susitraukimo priklausomybę nuo suvirinimo ėjimų skaičiaus, kai jungties storis 20 mm. Po kiekvieno suvirinimo ėjimo susitraukimas didėja, tačiau atlikus paskutinius ėjimus susitraukimas nežymiai sumažėja, nes atsparumas susitraukimui kyla, didėjant privirinto metalo kiekiui (Feng, 2005).



**1.8 pav.** Skersinio susitraukimo augimas daugiasluoksnio suvirinimo metu, 20 mm storio mažaaangliam plienui

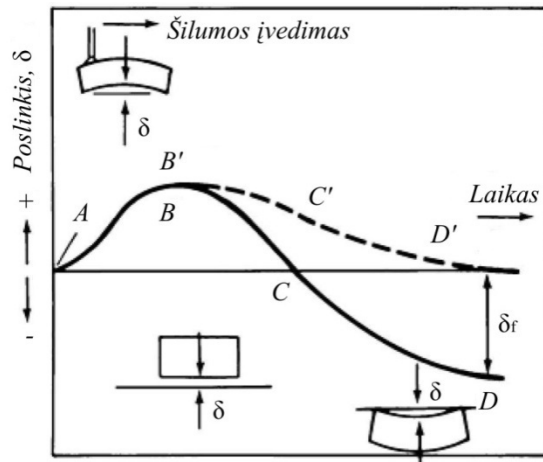
**Fig. 1.8.** Increase of transverse shrinkage during multipass welding of a groove joint. Specimens were 20 mm thick low-carbon steel

**Kampinė deformacija.** Kai suvirintoje jungtyje skersinis susitraukimas nėra tolygus storio kryptimi, tuomet tokioje jungtyje susidaro kampinės deformacijos. Storasienių konstrukcijų suvirinimo jungties kampinis pokytis gali būti sumažintas tinkamai parinkus suvirinimo jungties briaunų paruošimą (Totten 2002).

**Išlinkio deformacijos.** Bet kurioje suvirinimo siūlėje, išilginiai liekamieji gniuždymo įtempiai išsidėsto toliau nuo suvirinimo siūlės. Kai plokštelė yra plona, ji gali išlinkti nuo susidariusių gniuždymo įtempių. Išlinkimo deformacija skiriasi nuo lenkimo deformacijos tuo, kad jos deformacijos mastas yra kur kas didesnis nei lenkimo. Taip pat gali būti daugiau nei viena nuolatinio deformavimo forma esant išlinkio deformacijai. Tinkamai parinkus konstrukcijos metalo storį, atstumus tarp atramų bei suvirinimo šilumos įvedimą, galima išvengti arba sumažinti išlinkio deformacijas (Totten 2002).

**Deformacijos mechanizmas.** Trumpalaikė deformacija ar metalo judėjimas yra geriausiai pastebimi, kai suvirinimo linija yra toliau nuo gaminio neutralios

ašies, taip sukuriamas didelis lenkimo momentas. 1.9 paveiksle schematiškai pavaizduota stačiakampės plokštelės deformacija, kai suvirinimo lanku įvedama šiluma (lygiagrečiai plokštelės briaunai). Šalia suvirinimo lanko esantis metalas įkaista ir išsiplečia labiau negu tolimesnės plokštelės sritys, taip stabdomas įkaitusio metalo plėtimasis. Taigi, plokštelė deformuojasi taip, kaip parodyta kreivėje  $AB$ .



**1.9 pav.** Stačiakampės plokštelės centrinės dalies įlinkio pokyčio priklausomybė nuo šilumos šaltinio judėjimo viršutine briauna bei aušimo proceso

**Fig. 1.9.** Changes of deflection at the center of the lower edge of a rectangular plate due to heating by a heat source moving along the upper edge and subsequent cooling

Jei visos medžiagos dalys išlieka tamprios visą termininio poveikio laiką, t. y. suvirinimo metu nevyksta plastinė deformacija, tuomet kaitinimo ir aušimo proceso metu sukelti terminiai įtempiai išnyksta vos tik sujungimas atvėsta iki aplinkos temperatūros.

Plokštelės deformaciją suvirinimo proceso metu vaizduoja  $AB'C'D'$  linija. Tačiau, gamyboje naudojamose medžiagose, plastiniai įtempiai koncentruojasi kaitinimo vietoje ir sudaro plastinės deformacijos vietas. Metalui atvėsus iki aplinkos temperatūros, terminiai įtempiai išlieka jungtyje ir sudaro vadinamus liekamuosius įtempius. Plokštelės trumpalaikę deformaciją kaitinimo ir aušimo metu parodo kreivė  $ABCD$ . Plokštei atvėsus iki aplinkos temperatūros, lieka galutinis deformacijos dydis  $\delta_f$ , kuris paprastai vadinamas konstrukcijos iškraipymu arba įlinkiu. Metalų judėjimas suvirinimo metu ir deformacija po suvirinimo vyksta priešingomis kryptimis, paprastai ta pačia tvarka (Totten 2002).

## 1.2. Liekamųjų suvirinimo įtempių stabilizavimas

Liekamieji įtempiai suvirintoje jungtyje gali būti sumažinti naudojant mechaninę ir/arba terminę energiją. Tamprūs liekamieji įtempiai  $\varepsilon_e$ , kurie siejami su *Huko* dėsnio liekamaisiais įtempiais, gali pasikeisti į mikro plastinius įtempius  $\varepsilon_p$  atitinkamos deformacijos metu. Pavyzdžiui, šis pasikeitimas gali būti pasiektas dislokacijų poslinkio, dislokacijų šliaužimo, grūdelių sienelių slinkimo ir/arba difuzinio valkšnumo dėka (*Totten 2002*). Jei šis procesas įvyksta nepilnai, tuomet priverstinė liekamųjų įtempių relaksacija yra veiksminga priemonė sustabdyti įtrūkių formavimąsi ir plitimą. Liekamųjų įtempių relaksacija realioje situacijoje vyksta kompleksiskai, t. y. įtakojant daugeliui veiksnių. Tai priklauso ne tik nuo pačių liekamųjų įtempių sandaros, bet ir nuo medžiagos struktūros, apkrovos sąlygų, gaminio geometrijos ir komponentų svarbos.

Geriausiai žinomos ir pačios svarbiausios vidinių liekamųjų įtempių mažinimo technologijos yra atleidimas, vienašė deformacija (valcavimas, įtempimas) ir ciklinė deformacija. Įtempių relaksacija taip pat gali būti atlikta terminio ciklo, grūdinimo, neutronų bombardavimo, vibracijos ir dalinės deformacijos metu. Prieš paveikiant liekamuosius įtempius termine ar mechanine energija, įtempiai gali būti kiekybiškai įvertinti taikant įtempių matavimo metodikas. Taip gali būti sutaupoma laiko ir lėšų (*Totten 2002*).

Gamyboje susiduriama su daugybe veiksnių, kurie įtakoja liekamųjų įtempių susidarymą ir jų relaksaciją: medžiagos struktūra, šilumos įvedimas, šilumos perdavimo greitis arba dažnis, medžiagos storis, suvirinimo proceso būdas, išankstinis medžiagos įtempimas, proceso greitis ir pan. Gausybės veiksnių įtaka liekamiesiems įtempiams, sukuria sudėtingą situaciją, kuomet reikia įvertinti ar prognozuoti įtempių mažinimo proceso vyksmą. Dauguma gamintojų pasikliauja savo patirtimi ar eksperimentų rezultatais, siekdami sumažinti liekamuosius įtempius (*Delin 2005*).

Suvirintų konstrukcijų atleidimas arba terminis apdorojimas yra standartinis metodas, taikomas siekiant sumažinti liekamuosius suvirinimo įtempius. Apdorojimo metu suvirinimo siūlė yra lėtai kaitinama iki reikiamos temperatūros, kuri tam tikrą laiką išlaikoma ir lėtai aušinama iki aplinkos temperatūros. Tokiu būdu sudaromos sąlygos įtempių relaksacijai, o lėtai aušinant sumažinama galimybė susidaryti naujiems įtempiams. Pagrindinė terminio apdorojimo problemų dalis yra energijos kaštai, apdorojimo laikas, terminio apdorojimo priemonių tinkamumas ir kt. Dideliems suvirintiems gaminiams atleisti reikia erdvių krosnių bei papildomų transportavimo išlaidų (*Delin 2005*).

Yra keli mechaniniai liekamųjų įtempių mažinimo arba švelninimo metodai. Vienas iš jų yra „šūvinio pakalimo“ metodas, kurio metu gaminio paviršius bombarduojamas mažais apvaliais šratukais. Šratukai susidūrę su gaminio paviršiumi nežymiai jį deformuoja, todėl gaminio paviršiuje susidaro gniuždymo bei

po-paviršiniai tempimo įtempiai. Šie paviršiniai gniuždymo įtempiai mažina tikimybę atsirasti įtrūkiams ir padidina metalo atsparumą nuovargiui. Šaltasis deformavimas, taip pat naudojamas įtempių atleidimui, kuris atliekamas tiesiog buko plaktuko kalimu. Sandarumo arba slėginis bandymas taip pat gali būti naudojamas liekamiesiems įtempiams šalinti. Šis metodas dažniausiai taikomas po vamzdynų arba slėginių indų suvirinimo (*Robbins 2004*).

Ultragarsinio pakalimo apdirbimas gerina suvirintos jungties kokybę ir patikimumą. Šis metodas suformuoja tolygų prilydyto metalo perėjimą į pagrindinį metalą, panašiai kaip klasikinės pakalimo technologijos. Procesu metu suvirintos jungties paviršius plastiškai deformuojamas. Toks apdorojimas sukelia dvigubą poveikį, t. y. įveda pageidaujamus gniuždymo įtempius bei sukietina medžiagos paviršių (*Lihavainen 2004*). Ultragarsinis pakalimas gali būti naudojamas siekiant pagerinti jungties nuovargio stiprumą. Po apdirbimo metalo paviršius pasidengia „baltuoju sluoksniu“, kuris pasižymi aukštu korozinio nuovargio atsparumu.

Pagal autorių *Lihavainen (2004)* liekamųjų įtempių mažinimo metodus galima klasifikuoti taip:

- a) mechaniniai metodai:
  - pakalimo metodai (šūvinis, plaktuko, adatinis arba ultragarsu);
  - perkrovos metodai (pirminės apkrovos, vietinės apkrovos);
- b) įtempių atleidimo metodai:
  - terminis įtempių atleidimas;
  - vibracinis įtempių atleidimas;
  - taškinis pakaitinimas;
  - įtempių atleidimas detonacija.

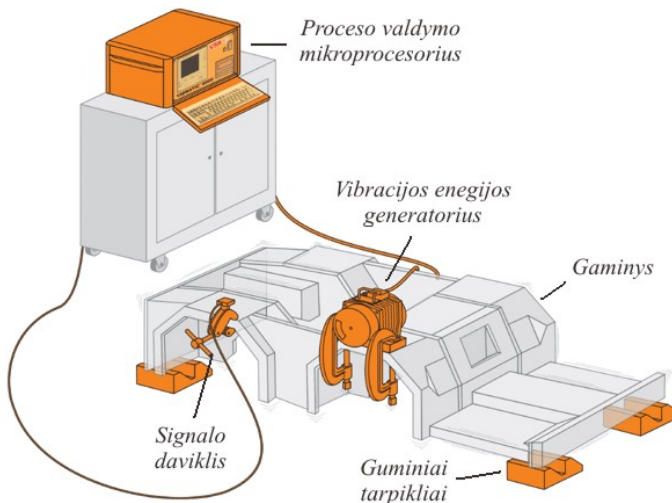
Disertacijoje nagrinėjamas vibracinis liekamųjų suvirinimo įtempių mažinimas, kaip alternatyvus metodas terminiam apdorojimui, naudojant jį suvirinimo metu ir po jo. Rezultatų palyginimui buvo atlikti terminio apdorojimo bandymai. Tolimesniuose skyriuose išsamiau rašoma apie vibracijos ir terminės energijos poveikį liekamiesiems įtempiams.

### 1.2.1. Vibracinis įtempių atleidimas

Vibracinis įtempių mažinimas, pasaulyje labiau žinomas kaip *VSR* (*vibratory stress relief*), naudojamas daugiau kaip 30 metų. Nepaisant to, tik neseniai buvo moksliskai išanalizuotas ir pripažintas mokslininkų bei inžinierių, kaip efektyvus liekamųjų įtempių mažinimo metodas. Pagrindinis *VSR* tikslas yra mažinti liekamuosius įtempius, perskirstyti juos į nepavojuojingus lygmenis ir tokiu būdu užtikrinti ilgalaikę stabilizaciją (*Claxton 1999*). *VSR* nėra tinkamas visose situaci-

jose. Šis procesas naudingas tuomet, kai nėra būtinumo keisti jungties medžiagos kristalinės struktūros ar mechaninių savybių.

Pagal autorių (*Claxton 1999*) yra trys skirtingos *VSR* technologijos: rezonansinė (*R-VSR*), modalinė sub-rezonansinė (*SR-VSR*) ir sub-harmoninė (*SH-VSR*). Rezonansinis vibracinis apdorojimas, kaip matyti iš pavadinimo, yra pasiekiamas vibruojant gaminį jam būdingu dažniu bei stipriai keičiant apkrovas. Dideles kompleksines detales taip gali vibruoti tik didelės galios generatorius su pastovia didelio greičio charakteristika (*Robbins 2004*). Jei įranga nėra pajėgi pasiekti ir išlaikyti gaminio rezonansinio dažnio, tuomet gali būti taikomas sub-rezonansinis *VSR* procesas. Sub-harmoninis *VSR* procesas veikia, kai ciklinė gaminio apkrova vibruojama žemesniu negu gaminio rezonanso dažniu. Šioje padėtyje vibracijos energija atlieka tokį patį darbą kaip atkaitinimas (*Gnirss 1988*). *Gnirss* teigia, kad įtempių relaksacijos rodiklis yra ciklinės apkrovos amplitudė, bet ne dažnis, kaip manyta anksčiau.

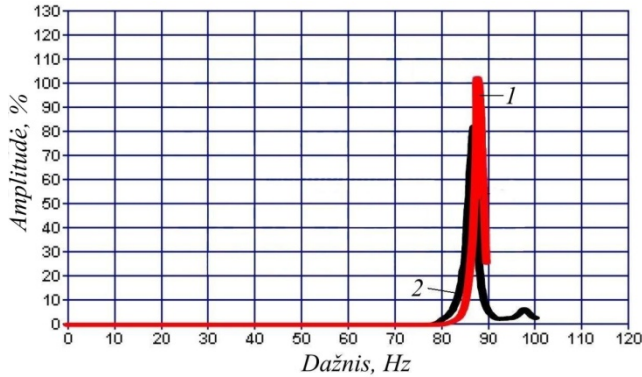


**1.10 pav.** *VSR* įrangos darbinė schema  
**Fig. 1.10.** Work scheme of *VSR* process

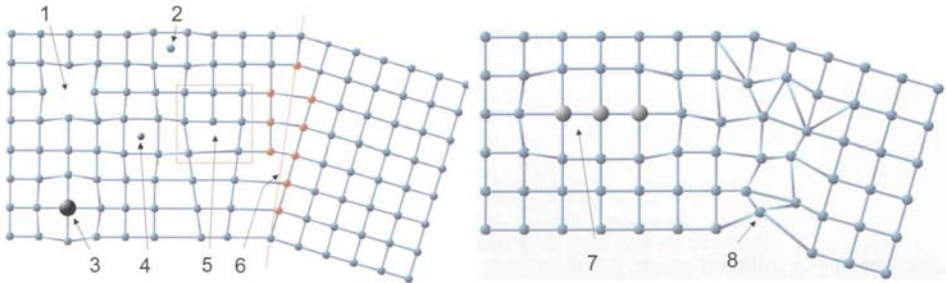
**VSR veikimo principas.** Signalų daviklis fiksuoja gaminio vibracijos lygį ir perduoda informaciją procesoriui, kuris nustato optimalų apdorojimo dažnį. Vibratorius su kintamu ekscentricitetu sukelia gaminio vibraciją. Kai gaminys pasiekia rezonansą, vibratorius mažina dažnį iki darbinio. Apdirbimo laikas ir dažnis priklauso nuo medžiagos tipo, tamprumo modulio bei konstrukcijos masės. Konstrukcijos rezonanso dažnį galime įvertinti matematiškai pagal 1.2 formulę.

$$F = \frac{SS \times S \times E}{\frac{VW + EW}{VL} \times L}, \quad (1.2)$$

čia  $SS$  – tvirtinimo sistema;  $S$  – medžiagos stiprumas;  $E$  – tamprumo modulis;  $VW$  – vibruojama masė,  $EW$  – ekscentrinė masė;  $VL$  – vibratoriaus padėtis;  $L$  – konstrukcijos ilgis.



**1.11 pav.** Rezonanso pikai prieš (1) ir po (2) *VSR* apdorojimo  
**Fig. 1.11.** Peak of resonance before (1) and after (2) *VSR* treatment



**1.12 pav.** Įvairūs gardelės defektai išsidėstę taškuose, linijose ir trimatėje erdvėje:  
1 – vakansijos, 2 – atomai tarp gardelių, 3 – kitų elementų atomas, 4 – įsiterpęs kitos medžiagos atomas, 5 – žingsninė dislokacija, 6 – mažas grūdelių ribų kampas, 7 – pavieniai atomai išoriniame atomų sluoksnyje, 8 – bukas kampas tarp grūdelių ribų

**Fig. 1.12.** Various lattice defects arranged in points, line areas, and three dimensional form: 1 – vacancy, 2 – inter lattice atom, 3 – substituted external atom, 4 – interstitial external atom, 5 – step dislocation, 6 – small angle grain boundary, 7 – single-atom external atom layer, 8 – obtuse angle grain boundary

Paprastai plieninė konstrukcija pasiekia rezonansą esant ne didesniai kaip 100 Hz dažniui. Keičiant ekscentriciteto padėtį, kaičiasi vibracijos energijos kiekis, t. y. didėja arba mažėja vibracijos impulsų galia. Po apdorojimo atliekamas pakartotinis rezonanso piko nustatymas. Pasak autoriaus (*Habel 2001*), iš dviejų rezonanso piko taškų (1.11 pav.), amplitudės atžvilgiu, galima daryti išvadą apie sėkmingą įtempių relaksaciją.

Sub-harmoninis metodas, žemo dažnio vibracijos energijos dėka, sumažina liekamųjų makro įtempių piką ir atstato atominės struktūros pusiausvyrą. Pasak autoriaus (*Feng 2005*), nėra skirtumo, kokia energija (vibracijos ar terminė) priverčia įtemptus ar suvaržytus atomus persigrupuoti į jiems patogesnę poziciją. Vibracijos energija pakeičia ne tik makro įtempius, bet ir itin paveikia mikro įtempius. Vidiniai įtempių pikai sulyginami bei stabilizuojami.

Kai vidiniai makro įtempiai panaikinami šlifavimo arba papildomo apdirbimo metu, medžiagoje esantys nestabilūs mikro įtempiai gali susikonsoliduoti viena kryptimi, t. y. gali iššaukti gaminio deformaciją bei įtrūkius. Taikant vibracijos energiją, pastarųjų reiškinių galima išvengti, nes matricos gardelės yra stabilizuojamos. Veikiant šiam stabilizacijos būdai, makro įtempių vidurkis gaminyje pakinta nedaug. Vidinių mikro įtempių sukurtų dislokacijų, tuštumų, tarp atominių plyšių, tarp grūdelių esančių defektų poveikis subalansuojamas (1.12 pav.), t. y. suminis jų veikimas sumažėja žemiau nominalios takumo ribos. Gaminys tampa pakankamai stabilus ir ypač atsparus deformacijoms (*Feng 2005*).

Taigi, *VSR* gali stabilizuoti įtempius bet kuriame gamybos etape be jokių medžiagos metalurginių savybių pakitimo, be nuodegų ar spalvos pakeitimų ir be gaminio geometrinės formos iškraipymo ar deformavimo. Tai pasiekama minimaliomis energijos ir laiko sąnaudomis (*Feng 2005*).

Kaip ir dauguma metodų, *VSR* turi keletą apribojimų (*Gnirss 1988*):

- vibruojamo gaminio masė turi būti ne mažesnė kaip 100 kg;
- *VSR* negalima taikyti šaltai formuotiems, štampuotiems, sukietintiems gaminiams, priešingu atveju *VSR* proceso metu yra įvedami papildomi liekamieji įtempiai;
- negalimas kompleksinis kelių gaminių apdorojimas vienu metu, nebent yra taikomas specialus visų gaminių laikiklis, neleidžiantis jiems judėti apdorojimo proceso metu;
- gaminys turi būti izoliuojamas nuo atramos, t. y. vibracinio apdorojimo proceso metu po visu gaminiu turi būti padedami guminiai tarpikliai (1.10 pav.).

### 1.2.2. Terminis įtempčių atleidimas

Jei plieninį gaminį kaitinsime keletą valandų temperatūroje  $T_d \sim 0,5T_L$  ( $T_L$  – metalo lydymosi temperatūra) ir lėtai aušinsime iki kambario temperatūros, tuomet įvyks visiška formavimo, šlifavimo ar suvirinimo metu susidariusių liekamųjų įtempčių relaksacija. Išlaikymo laikas priklauso nuo gaminio matmenų ir medžiagos savybių. Atkaitinimo temperatūra  $0,5T_L$  atitinka feritinių plienų rekristalizacijos temperatūrą, po kurios liekamieji įtempčiai gaminyje visiškai relaksuoja. Perlitinių plienų atveju, makro liekamieji įtempčiai yra visiškai pašalinami perlito-austenito virsmo metu, t. y. aukščiau kritinės  $A_1$  temperatūros ribos. Proceso metu pašalinama ir didžioji dalis mikro liekamųjų įtempčių. Likusi dalis lieka dėl gardelės defektų (ypač dislokacijų). Nevienalyčių medžiagų atveju, visada lieka dalis mikro liekamųjų įtempčių, nes skiriasi fazių plėtimosi koeficientai (Totten 2002).

Kuomet liekamieji įtempčiai viršija medžiagos takumo ribą (sumažėjusią kaitinimo metu), susidaro plastinės deformacijos, didelė dalis dislokacijų išnyksta arba išeina iš kristalo (grūdelio) ribų ir taip įvyksta gaminio struktūros relaksacija. Terminis apdorojimas dažnai rekomenduojamas po suvirinimo, siekiant padidinti atsparumą nuovargiui, kurį sukelia liekamieji įtempčiai.

Tačiau yra keletas neigiamų aspektų taikant terminį įtempčių mažinimą. Metodas yra labai reiklus energijos, apdorojimo vietos ir laiko sąnaudoms. Kitas trūkumas yra tai, kad mažėja terminio poveikio zonos kietumas bei stiprumas. Dėl šių priežasčių terminis įtempčių mažinimas neturėtų būti naudojamas, nebent nėra kito pasirinkimo arba kietumo ir stiprumo kitimas neturi didelės įtakos konstrukcijos ilgaamžiškumui. Terminis metodas dažniausiai yra naudojamas tuomet, kai yra didelė trapios lūžio rizika.

Suvirintos konstrukcijos liekamieji įtempčiai gali būti visiškai relaksuoti terminiu apdorojimu. Konstrukcijos liekamųjų įtempčių polinkis relaksuotis priklauso nuo gaminio geometrijos sudėtingumo. Kitas svarbus veiksnys yra konstrukcijos suvaržymo laipsnis bei medžiagos pasipriešinimas. Svarbu yra tai, kad neįmanoma termiškai pašalinti įtempčių kompleksiniuose gaminiuose, nes tai užimtų per daug laiko.

Ne visus plienus yra įmanoma termiškai atleisti. Gaminio, kuriam bus taikomas terminis įtempčių mažinimas, medžiaga turi būti parenkama apdairiai. Būtina įvertinti konstrukcijos sudėtingumą, kuris lemia apdorojimo greitį, temperatūrą, laiką bei kaitinimo ir aušinimo greitį (Lindqvist 2007).

### 1.2.3. Technologinis deformacijų ir liekamųjų įtempių valdymas

Prieš suvirinimą arba suvirinimo metu, siekiant sumažinti liekamuosius įtempius ir deformacijas, galima taikyti įvairias technologijas bei suvirinimo proceso technologinius pakeitimus. Paprastai nesudėtingi technologiniai pakeitimai taikomi prieš suvirinimą arba jo metu, būna efektyvesni nei metodai taikomi po suvirinimo. Atlikus elementarias jungties paruošimo arba suvirinimo technologijos pataisas, galima pasiekti mažesnes kampines deformacijas, skersinį, išilginį metalo susitraukimą bei bendrą konstrukcijos iškraipymą.

Šie gamybos proceso pakeitimai gali būti naudojami remiantis gamybine patirtimi. Dažniausiai jie yra ganėtinai pigūs, nereikalauja didelių laiko sąnaudų ar papildomo suvirinimo modeliavimo. Antra vertus, *BEM* taikymas suvirinimo problemoms spręsti yra efektyvus ir vis dažniau naudojamas. Žemiau pateikti liekamųjų įtempių ir deformacijų valdymo pavyzdžiai:

- suvirinimo jungties išdėstymas konstrukcijoje, atsižvelgiant į gaminio neutralios ašies padėtį;
- suvirinimo operacijų sekos nustatymas;
- jungties geometrinių parametrų optimizavimas;
- suvirinimo proceso parinkimas (*MIG, MAG, TIG, MMA* ar kiti);
- konstrukcijos išankstinis suvaržymas;
- konstrukcijos išankstinis įlenkimas ar deformavimas;
- metalo išankstinis pakaitinimas;
- tarpėjiminės suvirinimo temperatūros palaikymas;
- suvirinimo lanko padėties parinkimas;
- tiesinimas liepsna iš kart po suvirinimo.

### 1.3. Liekamųjų įtempių įvertinimas

Visi liekamųjų įtempių nustatymo metodai matuoja tampriąją deformaciją ir iš jos dydžio yra apskaičiuojami liekamieji įtempiai. Gali būti taikomi šie deformacijos matavimo metodai: ardomieji, pusiau ardomieji ir neardomieji. Pagal bendrus matavimo metodikos principus liekamieji įtempių nustatymo metodai skirstomi į mechaninius, elektrinės varžos matavimo, optinius, difrakcinius, ultragarso, magnetinius bei skaitinius (*Bražėnas 2006, Withers 2001*).

Liekamųjų suvirinimo įtempių ar jų koncentracijos pokytį po vibracinio apdoravimo, galima nustatyti taikant žemiau pateiktus neardamuosius matavimo metodus. Pagal jų praktinį taikymą plieninių konstrukcijų gamybos aplinkoje, galima sugrupuoti taip:

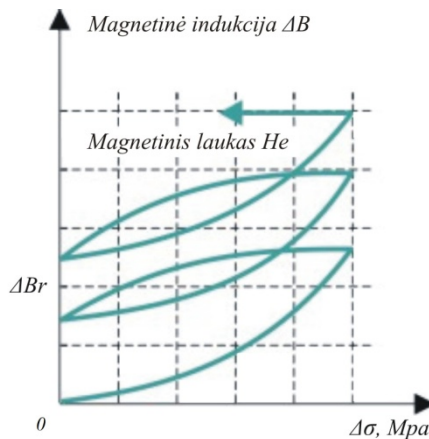
- magnetinės metalo atminties metodas;

- ultragarsinis metodas;
- *Barkhausen* magnetinio triukšmo metodas;
- skylės gręžimo metodas (pusiau ardomasis);
- rentgeno spindulių difrakcijos metodas;
- neutronų difrakcijos metodas.

### 1.3.1. Magnetinės metalo atminties metodas

Efektyvus suvirintos jungties įvertinimo metodas, kuris vis plačiau taikomas praktikoje, nustatant tikruosius deformuotos įrenginių ir konstrukcijų būsenos įtempius – tai metalo liekamojo įsiamagnetinimo (literatūroje dar vadinamos magnetinės metalo atminties) po suvirinimo ar deformavimo įvertinimas.

Dauguma feromagnetinio plieno konstrukcijų ir gaminių, veikiant darbiniams apkrovoms yra linkę įsiamagnetinti žemės magnetiniame lauke. Magnetinio tamprumo efektas, sukeliantis liekamosios indukcijos augimą, pateiktas 1.13 paveiksle. Jeigu kokioje nors konstrukcijos vietoje veikia ciklinė apkrova  $\Delta\sigma$ , ir yra išorinis magnetinis laukas (pvz., žemės magnetinis laukas), tai toje vietoje atsiranda liekamosios indukcijos pokytis ir liekamasis įsiamagnetinimas (*Dubov 2003*).



**1.13 pav.** Magnetinio efekto veikimo schema:  $\Delta Br$  – liekamosios indukcijos pokytis;  $\Delta\sigma$  – ciklinės apkrovos pokytis;  $H_e$  – išorinis magnetinis laukas

**Fig. 1.13.** The diagram of magneto-elastic effect action:  $\Delta Br$  – change of residual magnetization;  $\Delta\sigma$  – change of cyclic loading;  $H_e$  – external magnetic field

Pasak autoriaus (*Dubov 2003*), metalo magnetinė atmintis – tai negrįžtamas įsiamagnetinimo pasikeitimas, sąlygotas įtempių, didesnių už vidutinį vidinių

įtempių lygį, atsirandantis objekte veikiant darbinėms apkrovoms silpname žemės magnetiniame lauke. Suvirintiems sujungimams magnetinė metalo atmintis pasireiškia kaip liekamasis įsimagnetinimas, susiformavęs po suvirinimo ir atšaldymo magnetiniame žemės lauke, ir atspindi jų struktūrinį ir technologinį paveldėjimą. Magnetinė metalo atmintis pradeda „veikti“ daug ankstesniame etape, t. y. tuomet kai metalą veikianti išorinė apkrova viršija įtempius, lyginant su vidiniais metalo įtempiais. Didžiajai daugumai mažaauglių konstrukcinių plienų vidutinis vidinių įtempių lygis, atsirandantis dėl struktūros nevienalytiškumo, yra 60–80 MPa, tai sudaro apie 30 % šių metalų takumo ribos.

Magnetinės metalo atminties unikalumą sudaro tai, kad šis metodas pagrįstas nuosavo magnetinio lauko išsisklaidymu, atsirandančiu slydimo dislokacijų stabilų plokštumų zonose, veikiant darbinėms apkrovoms. Esant silpnam Žemės magnetiniam laukui ant feromagnetinės medžiagos paviršiaus, įtempių koncentracijų zonose, susidaro magnetinio lauko išsisklaidymo gradientas, kuris fiksuojamas magnetometru (*Jiling 2004*).

Suvirintiems sujungimams magnetinės atminties metodas pagrįstas savųjų magnetinių laukų, atsirandančių liekamųjų įtempių koncentracijų zonose, po suvirinimo ir atšaldymo magnetiniame žemės lauke, išsisklaidymo registravimo. Bet kuriame feromagnetinių gaminių gamybos (suvirinimo, lydymo, kalimo, valcavimo, terminio apdirbimo) procese, realios magnetinės tekstūros atsiradimo mechanizmas vyksta tik aušimo metu, t. y. kristalizuojantis metalui žemės magnetiniame lauke (*Dubov 2003*).

### 1.3.2. Ultragarsinis metodas

Ultragarsinis įtempių matavimo metodas yra pagrįstas akustinio tamprumo efektu, kai tampriosios bangos sklaidimas kietame kūne priklauso nuo mechaninių įtempių esančių tame kūne. Akustinis ryšys yra teorinis pamatas ultragarsinio metodo taikymo liekamųjų įtempių bei fizikinių-mechaninių medžiagos savybių tyrimams (*Tanala 1994*).

Liekamųjų įtempių matavimas yra tikslingas, kai yra žinomos medžiagos mechaninės savybės bei išilginės bangos sklaidimo greitis. Įtempių tyrimams tikslinga naudoti paviršinę išilginę bangą (*PIB*), kurios fazinis greitis yra lygus išilginių bangų greičiui. Įtempių matavimo praktikai ypač svarbi *PIB* savybė – tai jos išsispinduliavimas. *PIB*, sklisdama netgi laisvuju paviršiumi, išsispinduliuoja šonines skersines tūrines bangas, tostančias nuo paviršiaus gilyn į kūną. Todėl *PIB* praranda dalį energijos ir slopsta (*Sajauskas 2002*).

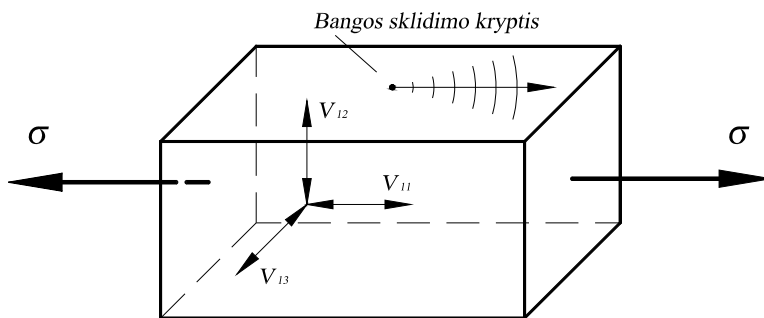
Izotropiniame kūne skleidžiamos tamprios bangos charakterizuojamos kaip jų sklaidimo greitis medžiagoje (1.14 pav.). Bangos greičio pokytis priklauso

nuo įtempių krypties (išilginių, skersinių), pateiktas šalia linijinių lygčių (Walaszek 2006). Ši išraiška parodo išilginės bangos sklidimo greičio priklausomybę:

$$\frac{dV}{V} = A_{11} d\varepsilon = \frac{A_{11}}{E} d\sigma, \quad (1.3)$$

čia  $A_{11}$  – išilginio sklidimo akustinio tamprumo koeficientas;  $\varepsilon$  – deformacija ( $\varepsilon = \sigma/E$ );  $E$  – tamprumo modulis;  $\sigma$  – įtempiai.

Taigi, santykinis bangos sklidimo greičio pokytis yra proporcingas įtempiams (1.3 formulė). Proporcijos konstanta yra koeficientas, kuris priklauso nuo tiriamos medžiagos mikrostruktūros (Walaszek 2006).



**1.14 pav.** Akustinės bangos sklidimas kietame kūne:

$\sigma$  – tempimo įtempiai;  $V_{11}$ ,  $V_{12}$ ,  $V_{13}$  – bangos sklidimo greitis

**Fig. 1.14.** Propagation of acoustic waves in a solid against various modes:

$\sigma$  – tensile stress;  $V_{11}$ ,  $V_{12}$ ,  $V_{13}$  – velocity of wave

Mechaninės medžiagos savybės išreiškiamos proporcingumo koeficientu, kuris gali būti apskaičiuojamas arba nustatomas eksperimentiškai, t. y. naudojant vienašę arba dviašę bandinio apkrovą. Vienašės bandinio apkrovos akustinis koeficientas išreiškiamas taip:

$$A_{11} = \frac{E \times (t_0 - t_1)}{\Delta\sigma \times t_1}, \quad (1.4)$$

čia  $\Delta\sigma$  – įtempių pokytis,  $E$  – tamprumo modulis,  $t_0$  – bangos sklidimo laikas nesant apkrovai,  $t_1$  – bangos sklidimo laikas priklausomai nuo įtempių.

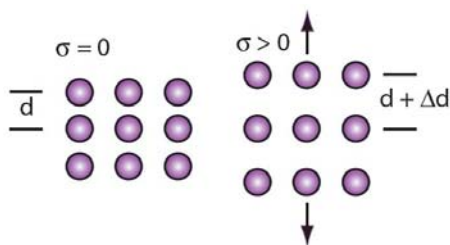
Ultragarso bangos sklidimo greičio metodu, įtampus medžiagoje galima fiksuoti su 0,1 % paklaida. Tai priklauso nuo ultragarsinės įrangos skiriamosios gebos ir patikimumo (Walaszek 2006).

Ultragarso bangos sklidimo greičio matavimas leidžia atlikti begalę matavimo taškų. Taip pat leidžia atlikti matavimus ant kreivlinijinių paviršių.

### 1.3.3. Rentgeno spindulių difrakcija

Kai polikristalinėje medžiagoje veikia įtempiai, kiekvienas kristalo gardelėje esantis kristalitas patiria tamprumo deformaciją. Kitaip tariant, kai išorinės apkrovos arba vidiniai liekamieji įtempiai medžiagoje yra didesni negu medžiagos takumo riba, tuomet įvyksta tarpatominė deformacija. Rentgeno spindulių difrakcijos metodas matuoja tarp atomų esantį tarpelį, kuris ir yra tamprumo deformacijos bandinyje indikatorius (1.15 pav.).

Įtempių dydis, žinant medžiagos tamprumo modulį, yra nustatomas iš šios kristalito tamprumo deformacijos, darant prielaidą, kad įtempiai yra proporcingi deformacijai (Totten 2002).



1.15 pav. Tarpatominio tarpelio pokytis

Fig. 1.15. Change of atomic space

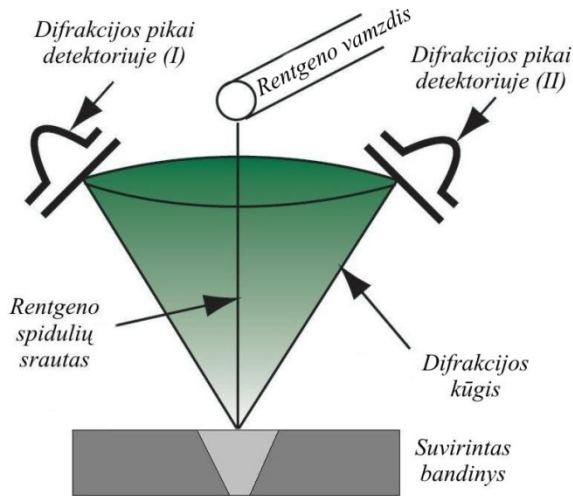
Liekamųjų įtempių nustatymui matavimo taške, reikia išmatuoti tarpatominėse plokštumose susidariusį difrakcijos kampą  $\theta$  nuo mažiausiai dviejų skirtingų  $\psi$  kampų, bandinio paviršiaus normalės atžvilgiu. Tarpatominės plokštumos yra kristalografinis ekvivalentas ir neapkrautose metalo vietose turi vienodus tarpatominius tarpelius. Įtemptoje medžiagoje parenkamos dvi arba daugiau difrakcinės plokštumos, kurios sudaro skirtingus difrakcinius kampus su bandinio paviršiumi. Priklausomai nuo kampo tarp įtempių vektoriaus ir plokštumų, tarpatominių plokštumų tarpelis didėja arba mažėja (Monin 2009).

Rentgeno spindulių difrakcija gali išmatuoti tik paviršiaus liekamuosius įtampus, 50–100  $\mu\text{m}$  gylyje. Iš difrakcijos atspindžio gautos informacijos nustatomas liekamųjų įtempių dydis bei kryptis.

Liekamieji suvirinimo įtempiai apskaičiuojami pagal šią formulę:

$$\sigma = \frac{E}{(1 + \nu) \sin^2 \psi} \cdot \frac{d - d_0}{d_0}, \quad (1.5)$$

čia  $E$  – tamprumo modulis,  $\nu$  – Puasono koeficientas,  $\psi$  – kampas tarp krentančio srauto ir bandinio normalės,  $d_0$  – tarpkristalinių plokštumų atstumas be įtempių,  $d$  – tarpkristalinių plokštumų atstumas veikiant įtempiams.



**1.16 pav.** Liekamųjų įtempių matavimas rentgeno spindulių difrakcija  
**Fig. 1.16.** Residual stresses measurement using X-Ray diffraction

Šiuo metu yra sukurti mobilūs, didelio tikslumo rentgeno spindulių difraktometrai. Rentgeno spindulių generatorius ir detektorius juda apie tiriamąjį objektą patys, t. y. gali prisitaikyti prie tiriamo bandinio paviršiaus (1.16 pav.). Matuojant liekamuosius suvirinimo įtempius būtina įvertinti suvirinimo jungties paviršiaus paruošimą. Net švelnus paviršiaus valymas vieliniu šepečiu smarkiai veikia paviršinius įtempius. Tokiu atveju, prieš matavimą rekomenduojama atlikti matavimo taško elektrolitinį poliravimą (Gao 2000). Matavimo įranga yra labai brangi ir darbui su ja reikalingas aukštos kvalifikacijos personalas. Rentgeno spindulių difrakcijos liekamųjų įtempių matavimo technologija yra standartizuota šiais standartais: *LST EN 15305:2008* (Lietuva), *SAE J784* (Japonija), *ASTM E915* (JAV).

### 1.3.4. Neutronų difrakcija

Neutronų difrakcija gali išmatuoti liekamųjų įtempių suskurtas plastines deformacijas visame plieno gaminio tūryje su taško skiriamąja geba mažesne kaip  $1 \text{ mm}^2$ . Metodas leidžia liekamuosius įtempius matuoti neišpjaunant bandinių ar nedarant paviršinių sluoksnių šalinimo (*Grunitz 2003*). Veikimo principas toks pat kaip ir rentgeno spindulių difrakcijos. Išmatuojamas atstumas tarp kristalografinių plokštumų rodo liekamųjų įtempių dydį. Tarpelis tarp pasirinktų kristalografinių plokštumų yra susijęs su neutronų srauto kritimo kampų  $\psi$  ir neutronų spindulių difrakcijos kampų  $\theta$  (1.17 pav.). Monochromatinės spinduliuotės bangos ilgis  $\lambda$  apskaičiuojamas pagal Brago dėsnį (*Paradowska 2006*):

$$\lambda = 2d \sin \theta, \quad (1.6)$$

Kai liekamųjų įtempių sukurta plastinė deformacija  $\varepsilon$  statmena difrakcinėms kristalografinėms plokštumoms, tuomet:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta - \sin \theta_0}, \quad (1.7)$$

čia  $d_0$  – atstumas tarp neįtemptų arba neapkrautų kristalografinių plokštumų.

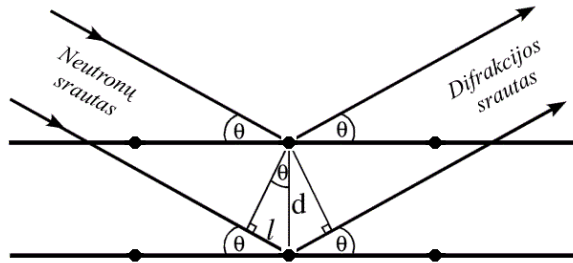
Jei yra žinoma svarbiausių įtempių kryptis, tai įtempiai bet kuria kita kryptimi gali būti apskaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma_A = \frac{E}{(1 + \nu)} \left[ \varepsilon_A + \frac{\nu}{(1 - 2\nu)} (\varepsilon_A + \varepsilon_{BA} + \varepsilon_C) \right], \quad (1.8)$$

čia  $\sigma_A$ ,  $\sigma_B$  ir  $\sigma_C$  – pagrindiniai įtempiai;  $\varepsilon_A$ ,  $\varepsilon_B$  ir  $\varepsilon_C$  – išmatuoti atitinkamos pagrindinės krypties įtempiai;  $E$  – tamprumo modulis;  $\nu$  – Puasono koeficientas.

Jei pagrindinė įtempių kryptis yra nežinoma, įtempiai turi būti išmatuoti mažiausiai šešiomis kryptimis. Tik tokiu būdu galima nustatyti liekamuosius įtempius medžiagos tūryje (*Clapham 2001*).

Liekamųjų įtempių matavimas neutronų difrakcija yra standartizuotas šiais standartais: *LST CEN ISO/TS 21432:2005 (Lietuva)*, *ISO TTA 3 (Tarptautinė standartizacijos organizacija)*.



**1.17 pav.** Neutronų difrakcijos schema matuojant liekamuosius įtampus:  
 $d$  – atstumas tarp atominių plokštumų;  $\theta$  – difrakcijos kampas;  $l$  – difrakcijos kampo  $\theta$  statinys

**Fig. 1.17.** Scheme of neutron diffraction during measurement of residual stresses:  
 $d$  – distance between two atomic planes;  $\theta$  – diffraction angle;  $l$  – adjacent of diffraction angle

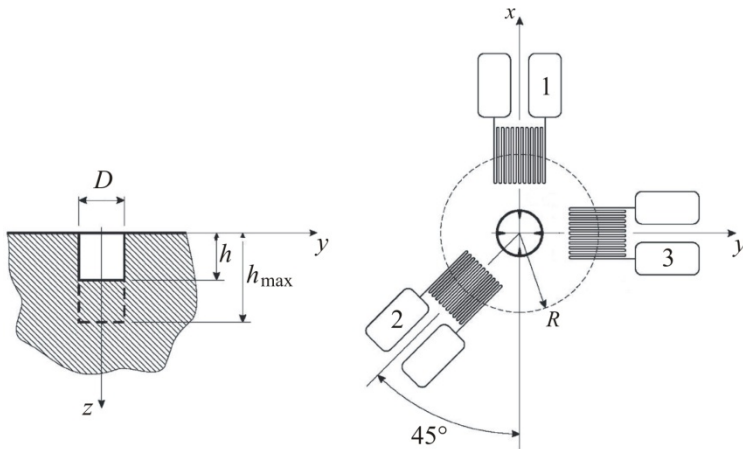
Šis būdas turi ir trūkumų. Daugumai lydinių (ypač plieno ir ketaus) liekamieji įtempiai sunkiai apskaičiuojami, kai neįtempto būvio tarpatominis tarpas  $d_0$  konkrečiam deformacijos matavimo taške yra nežinomas. Tai reiškia, kad  $d_0$  ir  $\theta_0$  negali būti nustatyti pagal 1.7 formulę, todėl matavimuose gali būti daug įvairių klaidų. Vienas iš apribojimų yra tai, kad bandinys turi būti įneštas į neutronų reaktoriaus zoną. Reikia daugiau kaip valandos, kad būtų galima ištirti vieno taško (tūrio) vienos krypties įtampus. Visapusiškai vieno taško analizei reikalingi trijų krypčių įtempiai. Todėl šiuo metodu nustatyti deformacijos poveikį medžiagoje kainuoja labai brangiai (Totten 2002).

### 1.3.5. Skylės gręžimo technologija

Skylės gręžimo metodas yra ardomasis liekamųjų įtempių matavimo metodas. Bandinio paviršiuje gręžiama nedidelė skylė ir matuojami pakitę įtempiai. Skylės skersmuo ir gylis siekia tik kelis milimetrus, dėl to dažniausiai šis metodas vadinamas pusiau-ardomuoju kombinuotu metodu (Beghini 2008).

Išgręžus nedidelę skylę, ties ja buvę liekamieji įtempiai pakinta. Ši relaksacija pakeičia vietinius įtampus ir sukelia atitinkamą deformacinį pokytį, kuris gali būti fiksuojamas šiais būdais:

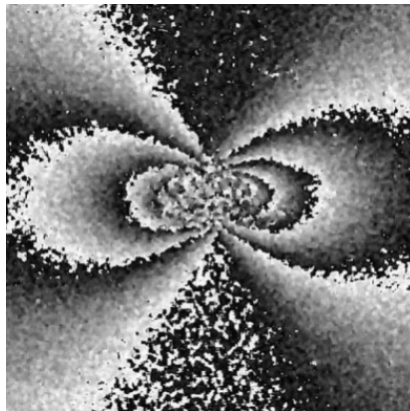
- 1) deformacijos davikliais-rozetėmis. Deformacijos pokytį trimis kryptimis fiksuoja pritvirtinti davikliai (1.18 pav.). Gautas pokytis perskaičiuojamas ir pateikiamas kaip absoliutus dydis, t. y. kaip tempimo arba gniuždymo įtempiai. Ši liekamųjų įtempių nustatymo technologija yra standartizuota ASTM E837 standartu (Beghini 2008, Bražėnas 2006);



**1.18 pav.** Tipinis trijų elementų deformacijos daviklis liekamiesiems įtempiams įvertinti naudojant skylės gręžimo metodą

**Fig. 1.18.** Schematic drawing showing the geometry of typical three-element clockwise strain gauge rosette for residual stress evaluation with the hole-drilling method

- 2) *DSPI* – skaitmeniniu taško šablono interferometrijos būdu (*Steinzig 2001*). Šios technologijos metu palyginamos bandinio skaitmeninės fotografijos iš skirtingų deformacijos etapų (1.19 pav.), t. y. atliekamas vaizdo taškų blokų stebėjimas, vertinant paviršiaus pasikeitimus. Vaizdo taškų blokų centro pozicija yra nustatoma sub-taško tikslumu per visą fotografiją. Šiuo metodu, taikant sudėtingas koreliacijos funkcijas, gali būti apskaičiuojamos deformacijos sudedamosios bei jų kryptis (*Lord 2008*).



**1.19 pav.** Fazės pasiskirstymas kai įtempiai siekia  $0,57 \times R_{eH}$

**Fig. 1.19.** Phase distribution obtained for  $\sigma = 0.57 \times R_{eH}$

Skylės gręžimo metodas dažnai tyrėjų naudojamas dėl mažų tyrimų kaštų, didelio tikslumo bei nesudėtingos matavimo technologijos (lyginant su difrakcijos metodais).

### 1.3.6. Skaitinis metodas

**Suvirinimo modeliavimas.** Esama įvairių suvirinimo modelių: galima modeliuoti suvirinimo vonelės termodinamiką, fazinius virsmus siūlėje, *TPZ* ir siūlės metalo struktūros termomechaninę reakciją suvirinimo metu. Modeliavimas suvirinimo inžinieriui leidžia projektuoti ir optimizuoti suvirinimo procesą. Priklausomai nuo modeliavimo tikslų, modeliavimą galime suskirstyti į du lygmenis: erdvinį *3D* ir dvimatį *2D* modeliavimą. Erdvinis modelis paprastai naudojamas siekiant nustatyti erdvinės deformacijas. Erdviniame modelyje suvirinimo jungties detalumas supaprastina modelio dydį. Tipinis erdvinis modeliavimas gali nustatyti geriausią suvirinimo operacijų seką, kuri sumažina liekamuosius įtempius. Taip pat gali vertinti įrangos ir pritvirtinimo poveikį arba procesų parametrų optimizavimą (*Hahn 2002*). Dvimatis modelis koncentruotas į mažą sistemos dalį, t. y. tik į suvirinimo jungties sritį. Suvirintos jungtys dažnai modeliuojamos naudojant *3D* modelį. *2D* modelis dažniau naudojamas vertinant terminio poveikio istoriją ir suvirintos jungties liekamuosius įtempius. Detalus *2D* modelis gali vertinti nestabilų terminio ciklo poveikį ir metalurginį (fazinį) virsmą.

Analizuojant suvirinimo procesą būtina įvertinti tris pagrindines tarpusavyje susijusias sritis, kurios yra priklausomos viena nuo kitos, t. y. medžiagos mikrostruktūrą, deformaciją ir šilumos įvedimą (*Deaconu 2007*).

Kai skaičiavimo tikslas yra nustatyti suvirinimo proceso sukeltus mechaninius pokyčius, tuomet lengviausias analizės būdas yra derinti terminį ir mechaninį procesus. Mikrostruktūros poveikis gali būti įvertintas pagal sudėtingas medžiagos modeliavimo metodikas, taigi čia netiesiogiai įtraukiama medžiagos mikrostruktūros analizė, rodanti mikrostruktūros priklausomybę nuo temperatūros ar deformacijos (*Lindgren 2001*).

Šiuo metu baigtinių elementų modeliavimas *BEM* yra labiausiai naudojamas įrankis sprendžiant šio tipo problemas. Sprendžiant šiuos uždavinius svarbu tai, kad yra stiprus ryšys tarp deformacinės mechanikos ir šilumos įvedimo. Dažniausiai naudojamas analizės būdas – nuoseklus terminio ryšio ir deformacinės mechanikos analizavimas.

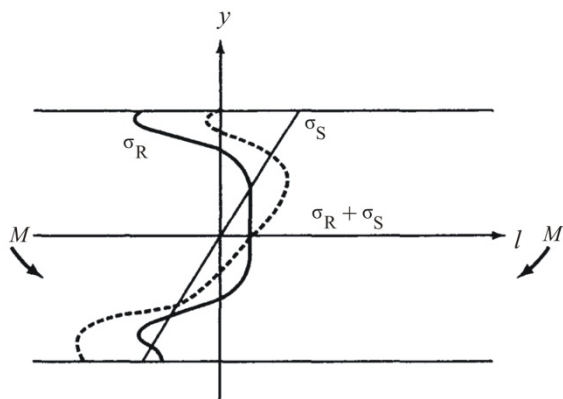
Pirmiausia yra sudaroma laikina šilumos įvedimo analizė, parodanti temperatūros pokytį visuose mazguose. Po to, atliekama statinė mechaninė analizė, kuri yra sąlygojama pirminio temperatūros lauko pasiskirstymo. Kiekvienas mechaninės analizės žingsnis atitinka terminės analizės laiko žingsnį. Terminis plė-

timasis, sukeldamas tūrinius pokyčius fazių virsmo metu, sukelia deformacijas. Prislopintas terminis išsiplėtimas (pavyzdžiui, kai suvirinimo srities temperatūra yra daug didesnė nei šalia esančios srities, pastaroji neleidžia metalui plėstis) sukelia plastinę deformaciją. Galiausiai, paskutinis žingsnis, kai temperatūra pasiekia pradinę reikšmę, visų tarpinių analizių interpretavimas sukuria tarpinių ir liekamųjų įtempių lauką (*Lindgren 2001*).

Modeliuojant suvirinimą, dažnai reikalingos tarpinės analizės, t. y. konstrukcijos reakcijos suvirinimo metu, suvirinimo eiliškumo, suvirinimo krypties, aušinimo bei tvirtinimo įvertinimo. Suvirinimo modeliavimas pasižymi nelinijškumu ir dažnai sunkiai sprendžiamas dėl medžiagos elgsenos keičiantis temperatūrai. Suvirinimo modeliavimas reikalauja kokybiško baigtinių elementų dalinimo išilgai suvirinimo siūlės ir terminio poveikio zonos, o tai ilgina skaičiavimo laiką. Nepaisant aukštų kompiuterinių technologijų, kompleksinės pramoninės problemos (tokios kaip daugiasluoksnės suvirinimo jungtys) gali sudaryti sunkiai įgyvendinamą modeliavimo modelį. Daugeliu atveju, turi būti siekiama sudaryti balansą tarp modelio dydžio ir norimo pasiekti rezultato tikslumo (*Feng 2005*).

## 1.4. Liekamųjų įtempių poveikis medžiagos mechaniniam stiprumui

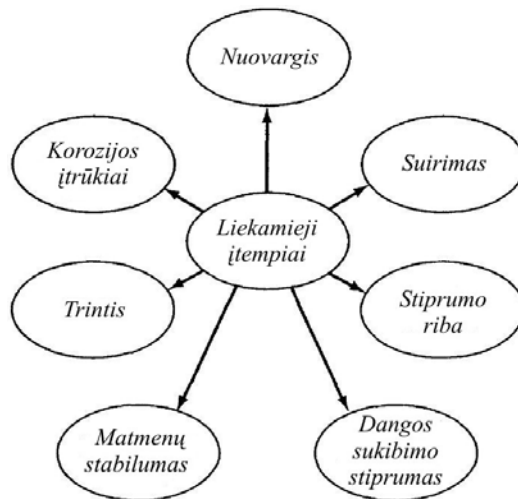
Konstrukcijos tamprūs liekamuosius įtempius  $\sigma_R$  sutapatinus su darbiniais įtempiais  $\sigma_S$ , gaunami tikrieji veikiantys įtempiai  $\sigma_R + \sigma_S$ , pažymėti punktyrine linija 1.20 paveiksle.



**1.20. pav.** Liekamųjų ir darbinių įtempių sutapatinimas  
**Fig. 1.20.** Superposing of residual stress and service stress

Dėl suminių liekamųjų ir darbinių įtempių (pvz. tempimo įtempių) konstrukcija gali patirti vietinę perkrovą ir spontaniškai suirti. Taikant baigiamąjį paviršiaus apdirbimą (pvz.: šūvinį pakalimą, šlifavimą ar poliravimą) sukeliami paviršiniai liekamieji gniuždymo įtempiai, kurie konstrukcijoje keičia vietinius įtempius ir taip pagerina medžiagos mechanines savybes (Totten 2002, Bazaras 2002).

Medžiagos charakteristikos, kurioms liekamieji įtempiai turi įtakos, pateiktos 1.21 paveiksle. Remiantis šiomis charakteristikomis, plieninių konstrukcijų gamybos standartai rekomenduoja atlikti liekamųjų įtempių atleidimą storesnėms kaip 35 mm suvirintoms jungtims (LST EN 1090-2:2008, LST EN 13480-4:2003, LST EN 13445-4:2009).



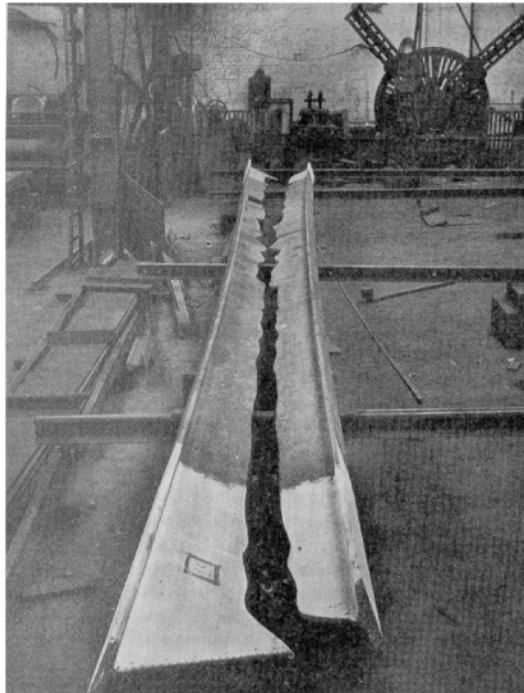
1.21 pav. Liekamųjų įtempių įtaka medžiagos savybėms  
Fig. 1.21. Effect of residual stress on the performance of materials

**Poveikis nuovargiui.** Liekamieji įtempiai turi didelę įtaką medžiagos nuovargiui. Tai galima įvertinti statinius įtempius sutapatinus su cikliniais įtempiais. Paprastai, kai pagrindiniai įtempiai padidėja, nuovargio atsparumas mažėja. Tai apibūdžia Haigo ir Goodman diagramos (Totten 2002).

**Poveikis nuovargio ir trapiam suirimui.** Montажinio suvirinimo metu, suvirinimo siūlėje, ypač viršutiniame sluoksnyje, dažnai pasitaiko suvirinimo defektų (nepravirinimo, nesulydymų, šlakų intarpų, porų ir pan.), kurie paprastai lemia įtrūkio formavimosi pradžią. Į šią įtrūkių susidarymo fazę būtina atsižvelgti, vertinant suvirinimo proceso metu sukurtą liekamųjų įtempių lauką. Kai tempimo įtempiai bei liekamieji suvirinimo įtempiai veikia ties įtrūkio užuo-

mazga, tuomet gali užtekti menkiausio įtempių pasikeitimo, kad dideliu greičiu pradėtų plisti susidaręs įtrūkis. Irimas įvyksta labai staigiai (1.22 pav.). Liekamieji įtempiai, kurie palengvina trapius irimo pradžia, yra labai pavojingi apkrautoms plieninėms konstrukcijoms, ypač dirbančioms žemoje temperatūroje. Dėl šių priežasčių storasienėms jungtims rekomenduojamas liekamųjų įtempių atleidimas.

**Poveikis korozijos įtrūkiams.** Korozijos įtrūkiai yra mechaninių ir cheminių įtrūkių formavimosi priežastis, kuri gali sukelti metalo irimą, veikiant kombinuotam tempimo įtempių ir korozijos poveikiui. Įtrūkių susidarymas paprastai yra tarpkristalinis ir galimas beveik visose medžiagose (aliuminio lydiniuose, pliene, varyje ir pan.). Įvedami liekamieji gniuždymo įtempiai gali padidinti gaminio nuovargio bei korozinį atsparumą.



**1.22 pav.** Savaiminis konstrukcijos suirimas dėl liekamųjų įtempių  
**Fig. 1.22.** Spontaneous construction failure as a result of residual stresses

**Poveikis dangų adhezijai.** Naudojant plazmos-purškimo dangų dengimo metodą, susidaro aukšti liekamieji įtempiai, kurie lieka dangoje ir posluoksnyje. Šie makro įtempiai susidaro dėl skirtingos paviršių temperatūros, skirtingų po-

sluoksnio ir dangos fizikinių bei mechaninių savybių. Šie įtempiai paveikia mechaninę ir termomechaninę padengtų dalių elgseną.

**Poveikis stiprumui, trinčiai, dilimui.** Liekamųjų įtempių poveikis stiprumui yra akivaizdus, ypač kai įtemptas sluoksnis yra labai storas. Kompozicinėse medžiagose liekamieji įtempiai atsiranda dėl terminio ir mechaninio procesų nesuderinamumo, tai dažnai įtakoja kompozitų makroskopines savybes esant tempimo arba gniuždymo įtempiams. Trinties ir dilimo savybės įtakojantys liekamieji įtempiai dažnai slepiasi po kitais parametrais. Kietumo padidėjimas apdirbimo metu, stiprumo pokytis bei dilimui atsparių dangų sukibimas, dėl liekamųjų įtempių, gali žymiai paveikti atsparumą trinčiai.

**Poveikis matmenų stabilumui.** Matmenų stabilumo problema žinoma seniai. Konstrukcijos gamybos metu liekamuosius įtempius sukelia vietinis terminis apdorojimo arba suvirinimo procesas. Šie įtempiai gali keisti konstrukcijos formą. Todėl siekiant išvengti šių defektų, taikomas liekamųjų įtempių atleidimas (*Totten 2002*).

## 1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Liekamieji suvirinimo įtempiai įtakoja konstrukcijos matmenų stabilumą, atsparumą nuovargiui, irimą, stiprumo ribą, korozinius įtrūkius bei dilimą.
2. Mažaanglio plieno liekamieji suvirinimo įtempiai gali būti sumažinti naudojant mechaninį apdirbimą (pakalimą, perkrovimą) arba įtempių atleidimą (terminį, vibracinį).
3. Klasikinis terminis įtempių atleidimas yra brangus ir ne visada galimas, todėl kaip alternatyva terminiam atleidimui yra siūlomas vibracinis įtempių atleidimo metodas.
4. Liekamųjų suvirinimo įtempių atleidimas konstrukcijoje laikomas sėkmingu, kai liekamųjų įtempių pikai yra mažesni už medžiagos takumo ribą.
5. Liekamųjų įtempių įvertinimui dažniausiai yra naudojamos šios neardomosios matavimo metodikos: rentgeno spindulių difrakcija, neutronų difrakcija bei skylės gręžimo metodikos.
6. Kokybišką liekamųjų įtempių pokyčio įvertinimą, po vibracinio apdorojimo, galima atlikti tik specializuotose laboratorijose, taikant sudėtingas bei brangias technologijas. Įvertinti vibracinio apdorojimo poveikį realios konstrukcijos liekamiesiems įtempiams – labai sudėtinga.

7. Europos plieninių konstrukcijų gamybos norminiuose dokumentuose, vibracinis įtempių mažinimas nėra pripažintas kaip galimas liekamųjų suvirinimo įtempių atleidimo metodas.
8. Parengus tinkamas vibracinio įtempių mažinimo vertinimo metodikas, būtų galima liekamųjų įtempių lygmenį konstrukcijose operatyviai nustatyti konstrukcijų gamybos ar montavimo aikštelėje.
9. Šios metodikos galėtų būti siūlomos Europos standartizacijos komitetui, rengiant Europos plieninių konstrukcijų gamybos norminius dokumentus.

## Eksperimentinio tyrimo metodika

Liekamųjų suvirinimo įtempių sumažinimo procesas susideda iš daugelio technologinių veiksnių įvertinimo, kurių kiekvienas turi tam tikrą poveikį galutiniam rezultatui. Išnagrinėti visų technologinių veiksnių poveikį įtempiams bei jų tarpusavio sąveikai yra sudėtingas, brangus ir daug darbo sąnaudų reikalaujantis darbas.

**2.1 lentelė.** Eksperimentinių bandinių kodavimo lentelė  
**Table 2.1.** Marked specimens used for research

| Žymuo | Matmenys, mm | Veiksny              | Laukiami įtempiai |
|-------|--------------|----------------------|-------------------|
| B1    | 140x140x30   | Be apdorojimų        | Aukšti            |
| B2    | 140x140x30   | Terminis apdorojimas | Minimalūs         |
| B3    | 140x140x30   | VSR suvirinimo metu  | Minimalūs         |
| B4    | 140x140x30   | VSR po suvirinimo    | Maži              |

Tyrimo metu buvo suvirinti bandiniai, kurie suvirinimo metu arba po jo buvo apdorojami vibracijos energija. Liekamųjų įtempių ar jų koncentracijos pokytis buvo fiksuojamas įvairiais metodais. Buvo bandoma įvertinti vibracijos energijos poveikį jungties metalo mechaninėms savybėms. Todėl galutiniai tyrimo

bandiniai buvo pasirinkti remiantis ankščiau atliktais bandymais ir kitų mokslininkų atliktais tyrimais.

**B1 serijos bandiniai.** Šios serijos bandiniai nebuvo apdoroti jokių būdu. Maksimalūs liekamieji įtempiai bandiniuose yra kaip atskaitos taškas, lyginant su apdorotais bandiniais. Po suvirinimo išmatuotas liekamųjų įtempių koncentracijos pasiskirstymas magnetinės metalo atminties metodu. Po to, taikant tą patį metodą, nustatytas įtempių koncentracijos pasiskirstymas nupjovus bandinį laikančiąsias suvirinimo siūles (matavimus atliekant toje pačioje vietoje). Antras matavimo metodas – ultragarsinis. Šiuo metodu nustatyti pažymėtų taškų liekamieji įtempiai. Po šių matavimų buvo atlikti tyrimai rentgeno spindulių difrakcijos, neutronų difrakcijos bei kombinuotu *HD/DSPI* metodais.

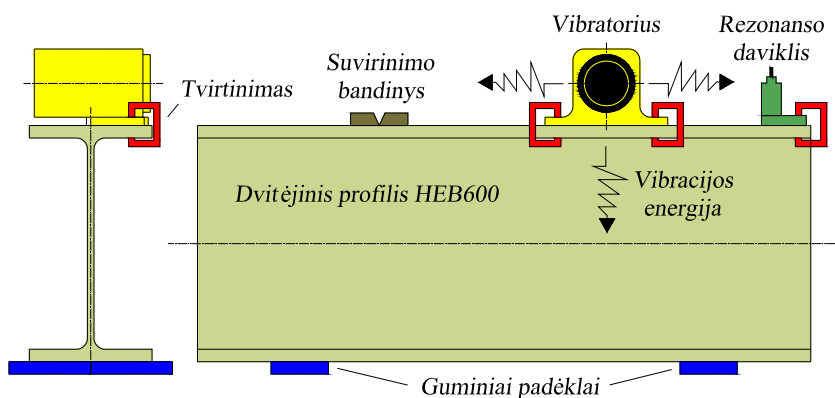
**B2 serijos bandiniai.** Bandiniai, po suvirinimo kaitinami 600 °C temperatūroje vieną valandą. Klasikinis įtempių mažinimas atliktas siekiant nustatyti maksimaliai sumažėjusius liekamuosius įtempius. Magnetinis metalo atminties metodas šiam bandiniui taikytas tris kartus: po suvirinimo, po tvirtinimo nupjovimo ir po terminio apdorojimo. Taip pat laboratorijoje atlikti liekamųjų įtempių tyrimai naudojant ultragarso bangos sklidimo metodą, kombinuotą *HD/DSPI* metodą, rentgeno spindulių ir neutronų difrakciją.

**B3 serijos bandiniai.** Suvirinimo metu šie bandiniai buvo veikiami vibracinių virpesių, t. y. lankui degant gaminys buvo vibruojamas 83 *Hz* dažniu, tarpėjimų ir po paskutinio ėjimo 84,4 *Hz* dažniu. Liekamieji įtempiai bandinyje turėjo būti minimalūs, t. y. pavojingiausias įtempių pikas ties siūle turėjo smarkiai pasikeisti. Liekamųjų įtempių koncentracijos pokytis *MMM* metodu matuotas du kartus: prieš bandinio nupjovimą ir po to. Laboratorijoje atlikti liekamųjų įtempių tyrimai naudojant ultragarso bangos sklidimo metodą, kombinuotą *HD/DSPI* metodą, rentgeno spindulių ir neutronų difrakciją.

**B4 serijos bandiniai.** Po suvirinimo šie bandiniai apdoroti 79,6 *Hz* dažnio virpesiais. Apdorojimas truko 25 minutes. Šio proceso metu liekamųjų įtempių pikai turėjo ženkliai keistis. Liekamųjų įtempių koncentracijos pokytis *MMM* metodu matuotas tris kartus: po suvirinimo, po *VSR* apdirbimo ir po bandinio nupjovimo. Laboratorijoje atlikti liekamųjų įtempių tyrimai naudojant ultragarso bangos sklidimo metodą, kombinuotą *HD/DSPI* metodą, rentgeno spindulių ir neutronų difrakciją.

**Vibroostasalas.** Konstruojant vibracinio apdorojimo stalą, būtina atsižvelgti į keletą kriterijų:

- vibruojamos konstrukcijos masė turi būti didesnė kaip 100 kg;
- vibraciniai virpesiai turi sklirti pagal gaminio ašį;
- VSR generatorius ir rezonanso daviklis negali būti virš guminių padėklų;
- atstumas tarp rezonanso daviklio ir vibratoriaus ~500 mm;
- vibroostasalas turi būti padėtas ant guminių padėklų;
- turi būti pakankamai vietos suvirinimo bandiniui ir suvirinimo procesui;
- stalas turi būti iš tokios pat medžiagos kaip ir suvirinimo bandiniai.



**2.1 pav.** Vibracinio apdorojimo stendas  
**Fig. 2.1.** Workdesk for vibratory treatment



**2.2 pav.** Bandinys prieš suvirinimą  
**Fig. 2.2.** The specimen before welding

Remiantis aukščiau išvardintomis sąlygomis, eksperimentui parinkta pusan-  
tro metro ilgio dvitėjinio profilio *HEB600* sija. Šio profilio atkarpa pagaminta iš  
*S355J2* plieno, svoris 318 kilogramų. Sijos plotis 300 mm. Tokio pločio užtenka  
bandinių tvirtinimui prie stalo. Vibrostalo ir suvirinimo bandinio vaizdas atitin-  
kamai pateiktas 2.1 bei 2.2 paveiksluose.

## 2.1. Medžiagos parinkimas

Prenkant tyrimų medžiagą, pirmiausia buvo atsižvelgta į liekamųjų įtempių  
dydį, nes kuo didesnė plieno takumo riba, tuo didesni suvirinimo liekamieji  
įtempiai. Antra sąlyga – bandinių plienas turi būti populiarus konstrukcinis plie-  
nas, naudojamas pramoninėje statyboje, pavyzdžiui, tiltų, rezervuarų, kolonų,  
santvarų ir kitų kompleksinių storasienių gaminių elementams gaminti.

Tyrimams parinktas konstrukcinis mažanglis plienas *S355J2*, atitinkantis  
Lietuvoje priimto tarptautinio standarto *LST EN 10025-2:2005* techninių tiekimo  
sąlygų keliamus reikalavimus (2.2, 2.3 lentelės).

**2.2 lentelė.** Plieno *S355J2* cheminė sudėtis pagal standartą ir gamintoją  
**Table 2.2.** Chemical properties of steel *S355J2* according standard and manufacturer data

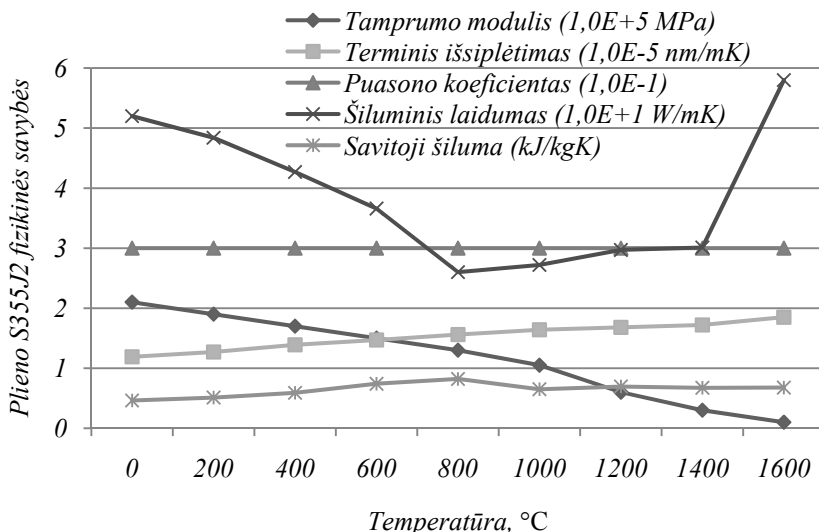
| Sudėtis pagal    | Komponentai |       |       |        |        |       |
|------------------|-------------|-------|-------|--------|--------|-------|
|                  | C           | Si    | Mn    | P      | S      | Cu    |
| LST EN 10025-2   | ≤0,20       | ≤0,55 | ≤1,60 | ≤0,025 | ≤0,025 | ≤0,55 |
| plieno gamintoją | 0,17        | 0,31  | 1,46  | 0,018  | 0,011  | 0,32  |

**2.3 lentelė.** Plieno *S355J2* mechaninės savybės pagal standartą ir gamintoją  
**Table 2.3.** Mechanical properties of steel *S355J2* according standard and manufacturer data

| Savybės pagal    | Mechaninės savybės           |                            |                                            |                                          |                  |
|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|------------------|
|                  | Stiprumo riba<br>$R_m$ , MPa | Takumo riba<br>$R_e$ , MPa | Santykinis<br>pailgėjimas $A_{5,2}$ ,<br>% | Smūginis ta-<br>sumas $KV$ ,<br>$J/cm^2$ | Kietumas,<br>HV5 |
| LST EN 10025-2   | 470–630                      | ≥ 345                      | ≥ 21                                       | ≥ 34 (-20°C)                             | ≤ 300            |
| plieno gamintoją | 529                          | 437                        | 30                                         | 186 (-20°C)                              | 177              |

Plienas *S355J2* dažnai parenkamas tiltų, plieninių statybinių konstrukcijų, rezervuarų, vamzdynų, slėginių indų, mašinų korpusų ir kitų konstrukcijų elementams gaminti. Plienas pasižymi aukšta takumo riba, geromis plastiškumo savybėmis, todėl projektuotojai dažnai šį plieną parenka dinaminių apkrovų neišvengiančioms konstrukcijoms. Vamzdynai, slėginiai indai ar jų komponentai pagaminti iš šio plieno gali būti eksploatuojami nuo  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  iki  $475\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūroje.

Suvirinimo liekamųjų įtempių analitinis įvertinimas atliktas naudojant 2.3 paveiksle pateiktas fizikinių savybių priklausomybes nuo temperatūros.



**2.3 pav.** Plieno *S355J2* fizikinių savybių priklausomybė nuo temperatūros  
**Fig. 2.3.** Physical material properties of the *S355J2* steel against temperature

Plieno *S355J2* anglies ekvivalentas lygus 0,523 %. Kritinės fazių transformacijos temperatūros reikšmės:  $A_{C1} = 720\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{C3} = 836\text{ }^{\circ}\text{C}$ , martensito virsmo –  $388\text{ }^{\circ}\text{C}$  (informacija pateikta pagal *Tarptautinio suvirinimo instituto IIW* skaičiavimo metodiką).

**Suvirinamumas.** Feritinis-perlitinis plienas *S355J2* pasižymi geru suvirinamumu. Suvirinant storesnius kaip 30 mm gaminius rekomenduojama jungties metalą pašildyti. Priklausomai nuo anglies ekvivalento, suvirintos jungties storio ir įvedamos šilumos kiekio, minimali šildymo temperatūra yra apskaičiuojama pagal standarto *LST EN 1011-2:2002* rekomendacijas. Paprastai *S355J2* plienas pašildomas iki 100–200  $^{\circ}\text{C}$  temperatūros. Suvirinant storesnius kaip 35 mm ga-

minius, pagal Lietuvoje ir Europoje galiojančių standartų reikalavimus, būtina atlikti liekamųjų įtempių atleidimą. Šį plieną galima suvirinti tokiais metodais: rankiniu lankiniu (*MMA*), pusiau-automatiniu apsauginių dujų aplinkoje (*MIG* arba *MAG*), automatiniu po fliuso sluoksniu, volframo elektrodu inertinių dujų aplinkoje (*TIG*), plazmos lanku bei kitais rečiau naudojamais metodais. Tyrimo metu bandiniai buvo suvirinti pusiau-automatiniu būdu,  $CO_2$  apsauginių dujų aplinkoje.

**Terminis apdorojimas.** Šio plieno suvirintiems sujungimams gali būti taikomas terminis apdorojimas liekamiesiems įtempiams atleisti. Kritiniai temperatūriniai plieno *S355J2* taškai  $A_1$  ir  $A_3$  yra lygūs atitinkamai 720 °C ir 836 °C temperatūrai. Apdorojimo temperatūra liekamųjų įtempių atleidimui, remiantis standartų *LST EN 1090-2:2008* ir *LST EN ISO 17663:2009* rekomendacijomis, siekia 550–600 °C. Išlaikymo laikas apskaičiuojamas priklausomai nuo jungties storio, t. y. suvirintos siūlės storio. Kai siūlės gylis yra didesnis kaip 35 mm, tuomet išlaikymo laikas minutėmis yra lygus jungties storiui, bet nemažiau kaip 60 min.

**Atitikmuo.** Tyrimams panaudotas plienas yra populiarus ne tik Lietuvoje ar Europoje. Plienas *S355J2* turi analogų visame pasaulyje: JAV – *ASTM A678/A Gr.B*, Japonijoje – *JIS G 3106 SM520B*, Vokietijoje – *DIN 17006 S52-3U*, Rusijoje – *GOST 5520-79 17G1S*.

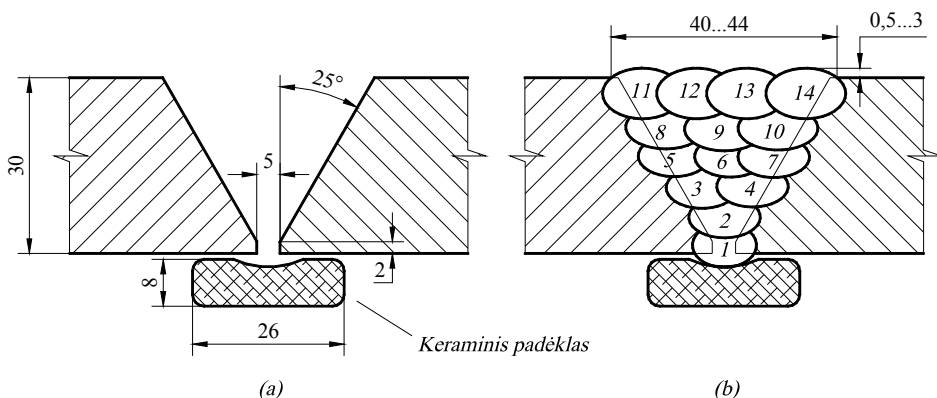
## 2.2. Bandinių paruošimas ir suvirinimas

**Briaunų paruošimas.** Bandinių forma, matmenys ir briaunų paruošimas parinkti atsižvelgiant į keletą kriterijų:

- suvirinimo metu būtina sukelti aukštus įtempius, t. y. bandinys turi būti kiek galima storesnis ir didesnis;
- pagal Europos standartų reikalavimus, įtempių atleidimas po suvirinimo turi būti taikomas jungtims storesnėms nei 35 mm;
- rentgeno difrakcijos liekamųjų įtempių nustatymo metodas riboja gaminio dydį. Bandinys negali būti didesnis kaip 150 mm ilgio ir 140 mm pločio, svoris nedidesnis kaip 5 kg;
- suvirinimo metu negalima bandinio vartyti, nes bandinys bus fiksuojamas sukabinimo siūlėmis, kurios perduos vibracijos energija. Dėl to negali būti taikomas X formos briaunų paruošimas;
- siekiant kokybiško šaknies suvirinimo, turi būti naudojami keraminiai šaknies apsaugos ir formavimo padėklai;

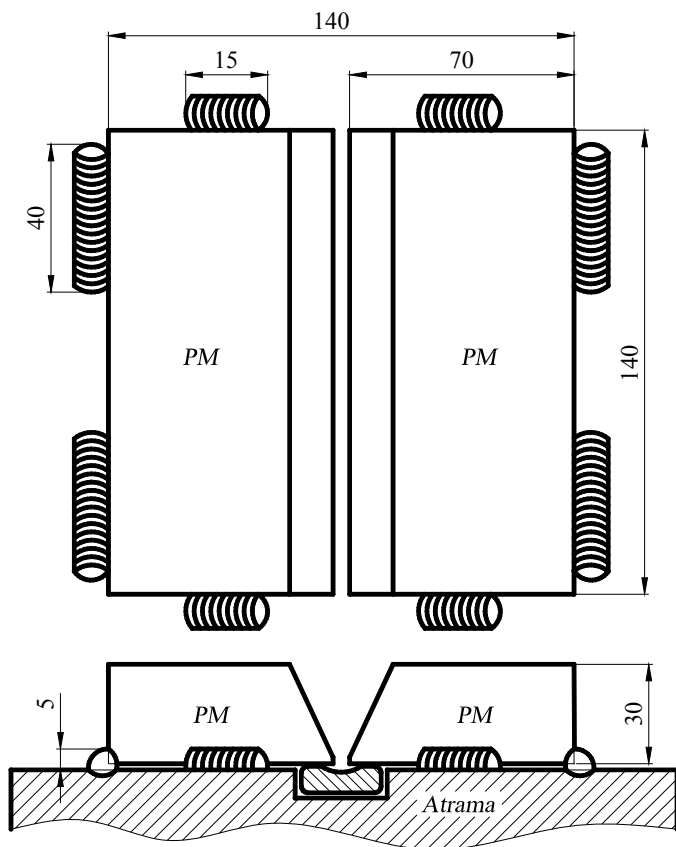
- statybinės plieninės konstrukcijos dažniausiai suvirinamos pusiau-automatiniu arba automatiniu būdu, taigi tyrimams turi būti taikomas vienas iš šių metodų.

Remiantis prieš tai išvardintais kriterijais, buvo pasirinkti suvirinimo bandiniai ir jų paruošimas. Bandinių matmenys –  $140 \times 70 \times 30$  mm. Bandiniai plazmos lanku buvo išpjauti iš karštai valcuoto *S355J2* plieno lakšto. Briaunų paruošimas atliktas remiantis standarto *LST EN ISO 9692-1:2004* rekomendacijomis, priklausomai nuo jungties tipo, medžiagos storio, šaknies apsaugos ir suvirinimo metodo. Briaunų paruošimo formos ir suvirinimo jungties atlikimo eskizai pateikti 2.4 paveiksle.



**2.4 pav.** Briaunų paruošimas (a) ir suvirinimo eiliškumas (b)  
**Fig. 2.4.** Preparation of joint edge (a) and welding succession (b)

**Suvirinimas.** Suvirinimo technologija sudaryta remiantis Europos standarto *LST EN 1011-2* rekomendacijomis. Siekiant sukelti bandinio viduje kuo daugiau liekamųjų įtempių, t. y. imituojant realias suvirinimo sąlygas, sudaryta speciali suvirinimo bandinių pritvirtinimo prie stalo schema. Esant tokiam tvirtinimui, įkaitęs jungties metalas neturi kur plėstis suvirinimo metu. Tvirtinimo schema pateikta 2.5 paveiksle. Bandinių suvirinimas atliktas pusiau-automatiniu lankiniu būdu,  $CO_2$  apsauginių dujų aplinkoje. Pridėtinė suvirinimo medžiaga – *ESAB OK Autrod 12.50 (G3Si1 – LST EN ISO 14341:2008)*, skirta plieno *S355J2* ir kitų šios grupės plienų suvirinimui. Pridėtinės medžiagos cheminės ir mechaninės savybės analogiškos plieno *S355J2* savybėms. Bandinio suvirinimo siūlė sudaryta iš 6 sluoksnių ir 14 ėjimų (2.4 pav. b). Detali suvirinimo technologija aprašyta suvirinimo procedūrų apraše *SPA* ir pateikta disertacijos 4 priede.



**2.5 pav.** Bandinio tvirtinimo schema  
**Fig. 2.5.** Mounting scheme of specimens

Visi bandiniai buvo suvirinti laikantis *SPA* reikalavimų. Buvo stengiamasi išlaikyti vienodus laiko intervalus tarp suvirinimo ėjimų. Suvirinimo metu buvo fiksuojami keletas parametrų: suvirinimo srovė, lanko įtampa, bandinio temperatūra (prieš pradedant virinti kiekvieną ėjimą ir jį užbaigus), suvirinimo laikas ir laikas tarp ėjimų (2.4 lentelė). Šie matavimai buvo atlikti siekiant tiksliau įvertinti šilumos įvedimą. Duomenys vėliau naudoti palyginimui su skaitiniu būdu gautais rezultatais.

Bandinių apdorojimas bei *MMM* matavimai atlikti bandiniams atvėsus iki aplinkos temperatūros. Po apdorojimo ir magnetinio parametro matavimų, bandiniai buvo nupjauti nuo vibrostalo paviršiaus.

**2.4 lentelė.** *B1* serijos bandinių suvirinimo parametrai  
**Table 2.4.** Welding parameters of *B1* series specimens welding

| Ėjimas | Suvirinimo      |                  | Temperatūra, °C |           | Suvirinimo       |                 |
|--------|-----------------|------------------|-----------------|-----------|------------------|-----------------|
|        | srovė, <i>A</i> | įtampa, <i>V</i> | pradžioje       | pabaigoje | trukmė, <i>s</i> | pauzė, <i>s</i> |
| 1      | 197             | 22               | 22              | 172       | 51               | 221             |
| 2      | 234             | 24               | 75              | 230       | 59               | 325             |
| 3      | 241             | 24               | 102             | 240       | 62               | 275             |
| 4      | 245             | 24               | 129             | 297       | 63               | 365             |
| 5      | 247             | 24               | 152             | 321       | 58               | 389             |
| 6      | 245             | 24               | 184             | 374       | 55               | 455             |
| 7      | 248             | 24               | 191             | 389       | 62               | 354             |
| 8      | 241             | 24               | 204             | 397       | 60               | 512             |
| 9      | 245             | 24               | 215             | 411       | 58               | 456             |
| 10     | 243             | 24               | 230             | 409       | 59               | 574             |
| 11     | 247             | 24               | 247             | 420       | 55               | 489             |
| 12     | 246             | 24               | 255             | 407       | 61               | 612             |
| 13     | 243             | 24               | 263             | 434       | 58               | 517             |
| 14     | 245             | 24               | 271             | 427       | 56               | -               |

PASTABA: temperatūros matavimai atlikti bekontaktiu infraraudonųjų spindulių termometru, ties siūlės viduriu.

**Kokybės kontrolė.** Po kiekvieno suvirinimo ėjimo buvo atliekama vizualinė kontrolė, kurios metu tikrinama ar yra paviršinių defektų (porų, šlakų intarpų, įtrūkių), siūlės geometrijos bei formos nuokrypių. Teigiamai vizualiai įvertinti bandiniai buvo kontroliuojami radiografiniu būdu. Pastaroji kontrolė buvo atliekama tam, kad būtų galima užtikrinti kitų bandymų rezultatų patikimumą, norint išvengti suvirinimo siūlės vidinių defektų įtakos. Suvirintų bandinių radiografinė kontrolė atlikta pagal *LST EN 1435:1998* „Virintinių siūlių ardomoji kontrolė. Suvirintų sujungimų radiografinė kontrolė“ nurodytą metodiką. Įvertinimas atliekamas pagal *LST EN 12517-1:2006* „Virintinių siūlių neardomoji kontrolė. Suvirintų jungčių radiografinė kontrolė. Priėmimo lygmenys“. Radiografinė kontrolė atlikta pramoniniu rentgenografiniu aparatu *ERESCO 42 MF3* (Vokietija). Visuose tirtuose bandiniuose defektų, galinčių paveikti mechanines savybes, nenustatyta. Suvirintos jungtys atitinka standarto *LST EN ISO 5817:2007*, aukščiausio „B“ lygmens kokybės reikalavimus.

**Terminis apdorojimas.** Po suvirinimo, magnetinio parametro matavimų ir sukabinimo nupjovimo, B2 serijos bandiniai buvo termiškai atleisti laikantis SPA ir standarto *LST EN ISO 17663:2009* reikalavimų. Terminio atleidimo režimai: kaitinimas greičiu  $V_1=250\text{ }^{\circ}\text{C/h}$  iki  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūros, antras kaitinimo greitis  $V_2=90\text{ }^{\circ}\text{C/h}$  iki  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , išlaikymo trukmė  $1\text{ h}$  –  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūros, po to lėtas aušinimas iki aplinkos temperatūros  $V=100\text{ }^{\circ}\text{C/h}$  greičiu. Taikant šį terminį apdorojimą ( $T_L=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) siūlėje įvyksta rekristalizacija, tačiau nevyksta austenitinis virsmas, todėl esminių pokyčių mikrostruktūroje negali būti.

## 2.3. Vibracinis apdorojimas

Tyrimo metu, vibracijos energijos generavimui, buvo panaudota JAV kompanijos „BONAL Technologies“ patentuota *META-LAX 2700* įranga. Ši kompanija jau daugiau kaip 30 metų tiria liekamųjų įtempių mažinimą metalinėse medžiagose, naudojant vibracinę energiją. Tyrimams naudotą įrangą sudarė: *META-LAX 2700* mikroprocesorius, vibratorius ( $0,74\text{ kW}$  galios), rezonanso daviklis, guminiai padėklai ir procesą kontroliuojantis kompiuteris (2.6 pav.).

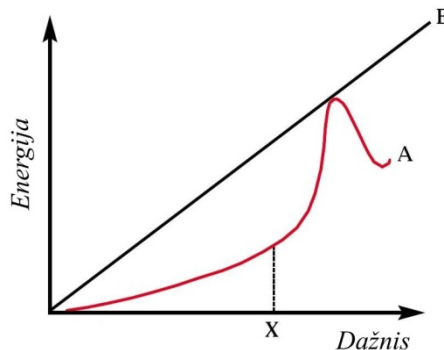


2.6 pav. *META-LAX 2700* įrangos svarbiausi komponentai  
Fig. 2.6. VSR equipment *META-LAX 2700*

Vibracinio apdorojimo įranga *META-LAX 2700* dirba subharmoniniu apdorojimo dažniu, t. y. atlikus pirmą suvirinimo stendo rezonanso analizę nustatomas rezonanso pikas ir jo papėdėje parenkamas darbinis liekamųjų įtempių mažinimo taškas X (2.7 pav.). Rezonanso pikas ir apdorojimo dažnio arba amplitudės dydis priklauso nuo konstrukcijos gebos priešintis įvedamai vibracijos energijai.

Tyrimų metu buvo atliekami du skirtingi vibracinio apdorojimo režimai bandiniuose:

- VSR suvirinimo metu;
- VSR po suvirinimo.



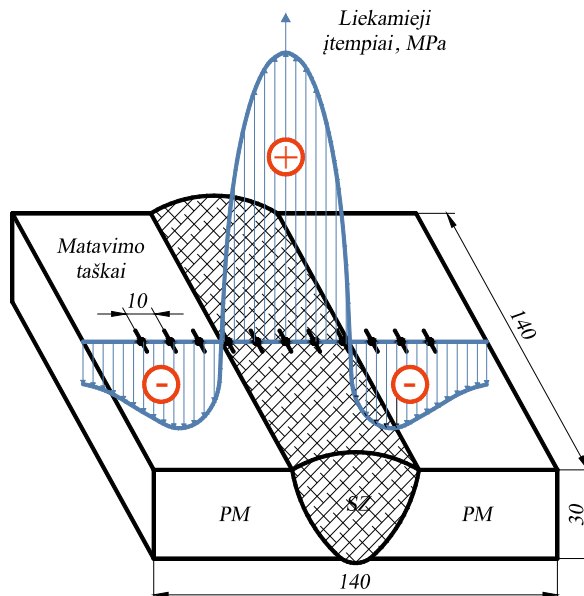
**2.7 pav.** Vibracijos energijos ir dažnio priklausomybės kreivė  
**Fig. 2.7.** Dependence curve of vibration energy and frequency

**Vibracija suvirinimo metu.** B3 serijos bandiniai buvo suvirinti naudojant vibraciją suvirinimo metu. Prieš pradėdant suvirinimą atliktas pirmas skenavimas, parodantis viso suvirinimo stendo rezonanso piko viršūnę. Tai žymi raudona (1) kreivės linija *VSR* apdorojimo protokole Nr. 1 (*F priedas*). Rezonanso taškas pasiektas esant konstrukcijos dažniui 86,6 Hz. Pagal *BONAL Technologies* metodika (*Habel 2001*) buvo parinktas pirmas 83 Hz ir antras 84,4 Hz darbiniai taškai, kurie sudarė 20 % ir 25 % amplitudės aukščio atitinkamai. Pirmas darbinis taškas buvo naudojamas tik suvirinimo metu, t. y. kai degė lankas. Tarp ėjimų ir po suvirinimo, iki kol bandinys atvėso iki 100 °C temperatūros, buvo naudojamas antras darbinis taškas. Po paskutinio *VSR* apdorojimo etapo sekė antras rezonanso piko skenavimas, tai rodo juoda (2) kreivės linija (*F priedas*). Tarp kreivių didelio skirtumo nėra, kaip turėtų būti realioje konstrukcijoje (*Robbins 2004*), nes suvirinamo bandinio masė yra 60 kartų mažesnė negu stendo masė. Santykinai nedidelė suvirinimo siūlė neturi įtakos bendram vibruojamos konstrukcijos rezonansui. Šiuo atveju, suvirinimo bandinys yra traktuojamas kaip neatsiejama vibrostalo dalis.

**Vibracija po suvirinimo.** B4 serijos bandiniai buvo suvirinti jų nevibruojant. Liekamųjų įtempčių atleidimas vibracijos energija atliktas tik bandiniams atvėsus iki aplinkos temperatūros. Rezonanso piko taškas pasiektas ties 84,3 Hz. Liekamųjų įtempčių atleidimas vyko esant 79,6 Hz vibracijos dažniui. Apdirbimas truko 25 minutes. Pasak autoriaus (*Aoki 2003*), per šį laiką tarpą įvyksta efektyvus liekamųjų įtempčių sumažinimas. Pirmo ir pakartotino skenavimo kreivės pateiktos *VSR* apdorojimo protokole Nr. 2 (*G priedas*).

## 2.4. Liekamųjų įtempių pokyčio įvertinimas

Liekamųjų suvirinimo įtempių ar jų koncentracijos matavimo taškai buvo išdėstyti bandinio paviršiuje, skersai suvirinimo siūlės (2.8 pav.). Toks išdėstymas pasirinktas atlikus liekamųjų įtempių pasiskirstymo tokio tipo bandinyje analizę bei atsižvelgus į kitų mokslininkų panašia tema atliktus tyrimus. Šių taškų įtempių koncentracijos lygis bei jų pokytis taikant *VSR* apdorojimą, buvo matuojamas magnetinės metalo atminties, ultragarso, rentgeno spindulių difrakcijos, neutronų difrakcijos bei skylės gręžimo metodais.



2.8 pav. Liekamųjų suvirinimo įtempių matavimo taškų išdėstymas bandinio paviršiuje

Fig. 2.8. Displacement of residual stress measurement points on specimen surface

### 2.4.1. Magnetinio parametro analizė

Magnetinio parametro nuskaitymas atliktas:

- 1) magnetometru *ENERGODIAGNOSTIKA TSC-3M-12*, kurio matavimo ribos  $\pm 2000$  A/m, galimi skenavimo kanalai – 16, kiekvieno kanalo paklaida 5%, maksimalus skenavimo greitis 0,2 m/s, skenavimo žingsnis nuo 1 iki 128 mm;

- 2) magnetometru *ENERGODIAGNOSTIKA TSCM-2FM*, kurio matavimo ribos  $\pm 2000 \text{ A/m}$ , skenavimo kanalai – 2, kiekvieno kanalo paklaida 5 %;
- 3) magnetinio lauko davikliais *ENERGODIAGNOSTIKA Type 1-8M, Type 2* ir *Type 3M*.

*TSC (Tester of Stress Concentration)* yra matavimo sistema, įrašanti ir apdorojanti konstrukcijos įtempių koncentracijos vietų diagnostikos duomenis, naudojant metalo magnetinės atminties metodą. Pagal veikimo principą įrenginiai specializuojami kaip daugiakanaliai kintamo lauko magnetometrai. Magnetinio lauko intensyvumas matuojamas  $\text{A/m}$  (amperas/metras). Tyrimo metu, šiais prietaisais buvo fiksuojamas magnetinio lauko pokytis tempiamame bandinyje ir suvirintuose bandiniuose.

## 2.4.2. Ultragarso bangos sklidimo greičio analizė

Ultragarso bangos sklidimo greičio matavimai atlikti:

- 1) defektoskopu *OLYMPUS EPOCH-4*, kurio maksimalus jautrumas 110 dB; bangos sklidimo greitis medžiagoje nuo 635 iki 15240 m/s; bangos sklidimo ribos 1–10000 mm; analoginės bangos dažnis nuo 0,05 iki 25 MHz; energijos impulsas žemas – 100 V, vidutinis – 200 V, aukštas – 300 V, maksimalus – 400 V; pastovus atspindžio kampas nuo 0° iki 70°; kintamas atspindžio kampas nuo 10° iki 85° esant 0,1° rezoliucijai; automatinis keitiklio nulinio balansas;
- 2) paviršinės išilginės bangos *PIB* keitiklis *5/MB-2p*, kurio darbinis dažnis 5 MHz, bangos sklidimo kelias  $l = 22 \text{ mm}$ ;
- 3) tiesaus spindulio keitiklis *KRAUTKRAMER MB4F-E*, kurio darbinis dažnis 4 MHz, skersmuo 10 mm.

Akustinio tamprumo koeficientui nustatyti buvo pasirinkti šie darbo režimai: dažnis 5 MHz, bangos kelias bandinio paviršiuje 22 mm. Bangos sklidimo greičio kalibravimas atliktas siūlės ir pagrindinio metalo zonose, veikiant statiniams tempimo įtempimams:  $\sigma_1=50 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_2=100 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_3=150 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_4=200 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_5=250 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_6=300 \text{ MPa}$ .

Akustinio tamprumo koeficientas nustatytas naudojant *Zwick/Roell Z250* universalią tempimo mašiną, kurios maksimali apkrova 250 kN, tempimo greitis bandymo metu 2 mm/min.

Liekamųjų suvirinimo įtempių matavimo darbo režimai: dažnis 4 MHz, pastovus atspindžio kampas – 0°.

### 2.4.3. Jonizuojančių spindulių difrakcijos analizė

**Rentgeno spindulių difraktometras.** Liekamųjų suvirinimo įtempių analizė rentgeno spindulių difrakcijos metodu atlikta Lengvųjų lydinų tyrimo centro OML laboratorijoje (*Skawina, Lenkija*). Tyrimai atlikti moderniu rentgeno spindulių difraktometru *PROTO iXRD-FS4*. Informaciją apdorojo programinė įranga *XRDWin-2.0*, kuri iš difrakcijos pikų, pagal *Brago* lygtį (1.6 formulė) apskaičiavo deformacijos dydį tarp kristalinių plokštumų. Įvertinus medžiagos tamprumo konstantas  $E$  ir  $\nu$ , pagal formulę (2.1) apskaičiuoti liekamieji įtempiai. Difraktometras pasižymi išskirtiniu kampo  $2\theta$  matavimo tikslumu  $0,01^\circ$ .

Liekamieji suvirinimo įtempiai išmatuoti naudojant vanadžio  $CrK_\alpha$  filtru filtruotą rentgeno spindulių bangą  $\lambda = 2,2909 \text{ nm}$ , kuri difragavo nuo geležies plokštumų  $\{211\}$   $156^\circ$  kampu ( $2\theta$ ). Liekamieji įtempiai nustatyti naudojant  $\sin 2\psi$  metodą. Matuojant vieno taško įtempius abu detektoriai keitė kampą  $\psi$  vienuolika kartų. Matavimai atlikti naudojant  $1 \text{ mm}$  skersmens kolimatorių. Priklausimai nuo rentgeno spindulių srauto energijos bei bandinio paviršiaus, liekamųjų įtempių nustatymo gylis bandinyje siekė  $50\text{--}100 \text{ }\mu\text{m}$ .

Dėl simetriškai bandinyje išsidėstančių išilginių liekamųjų įtempių, liekamieji įtempiai kiekviename bandinyje išmatuoti tik šešiuose taškuose, nuo suvirinimo siūlės vidurio iki bandinio krašto (2.8 pav.).

Galutiniai liekamieji suvirinimo įtempiai bandiniuose išreikšti pagal šią skaičiavimo metodiką:

$$\sigma = \frac{E}{(1 + \nu) \sin^2 \psi} \cdot \frac{d - d_0}{d_0}, \quad (2.1)$$

čia  $E$  – tamprumo modulis,  $\nu$  – *Puasono* koeficientas,  $\psi$  – posvyrio kampas,  $d_0$  – tarpkristalinių plokštumų atstumas be įtempių,  $d$  – tarpkristalinių plokštumų atstumas veikiant įtempiams.

**Neutronų difraktometras.** Liekamųjų įtempių matavimai bandiniuose, taikant neutronų difrakcijos metodą, atlikti Lenkijos atominės energijos institute *POLATOM*. Tyrimai atlikti *MARIA DH-5* reaktoriaus skleidžiamu horizontaliu terminiu neutronų spindulių pluoštu *H-5* ir *HB5* difraktometru. *HB5* yra dviasis difraktometras su dviem fiksuotais kintamo kampo monochromatoriais,  $2\theta_M = 33^\circ$  ir  $76^\circ$ . Tyrimo metu buvo naudojama standartinė pozicija su  $Fe \{211\}$  monochromatoriumi ir  $2\theta_M = 76^\circ$ . Šis nustatymas leido sukurti monochromatinę neutronų bangą, kurios ilgis  $\lambda = 0,9 \text{ nm}$ .

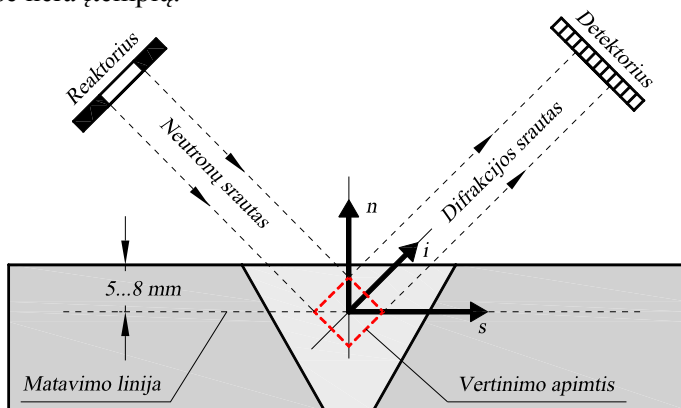
Monochromatinė banga  $\lambda$ , krentanti į medžiagą pagal *Brago* lygtį (1.6 formulė), žymi maksimalaus kampo poziciją į kristalografines plokštumas. Tokiu

būdu išreiškiamas tarpatominis tarpas  $d$ , kurio pokytis, lyginant su  $d_0$ , rodo deformaciją.

Detektorius fiksuoja difrakcijos pikus  $Fe \{211\}$ , priklausomai nuo difrakcijos kampo  $2\theta$ , pagal Brago dėsnį. Vidinės deformacijos apskaičiuotos pagal pozicijos  $2\theta$  pikų pokyčius (2.2 formulė).

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \approx \frac{\theta - \theta_0}{\theta_0}, \quad (2.2)$$

čia  $d_0$  – tarpatominis atstumas be įtempių,  $\theta_0$  – piko pozicija kai tarpkristalinėse plokštumose nėra įtempių.



**2.9 pav.** Neutronų srauto padėtis vertinimo apimties atžvilgiu

**Fig. 2.9.** Neutron beam to identify gauge volume

Kadangi tiriamų įtempių kryptis buvo žinoma, užteko atlikti trijų krypčių įtempių matavimus. Kad išmatuota deformacija būtų paversta liekamaisiais įtempiais, reikia įvertinti difrakcijos tamprumo konstantas  $E$  ir  $\nu$ . Taigi išilginiai liekamieji suvirinimo įtempiai bandiniuose apskaičiuoti taikant formulę:

$$\sigma_i = \frac{E}{1 + \nu} \left[ \varepsilon_i + \frac{\nu}{1 - 2\nu} (\varepsilon_i + \varepsilon_s + \varepsilon_n) \right], \quad (2.3)$$

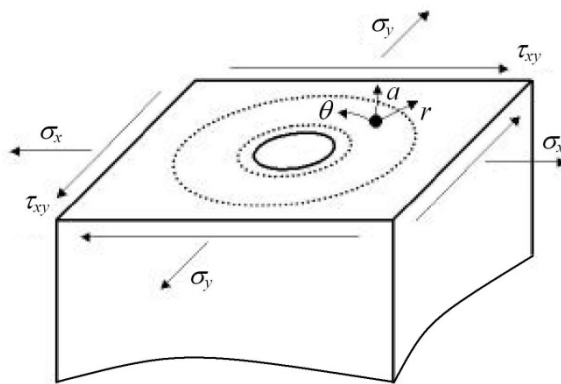
čia  $m$  – skersinės  $s$ , išilginės  $i$  ir normalės  $n$  krypties padėtis,  $E$  – tamprumo modulis,  $\nu$  – Puasono koeficientas.

Pagal 2.3 formulę galima išreikšti skersinius bei normalinius įtempius. Tačiau disertacijoje nagrinėjami tik svarbiausi išilginiai liekamieji suvirinimo įtempiai.



matiniu būdu. Gręžimas atliktas 1,6 mm skersmens grąžtu. Atstumas tarp gretimų matavimo taškų didesnis negu penki grąžto skersmenys, t. y. daugiau kaip 8 mm, todėl gretimų skylių įtaka matavimo paklaidai buvo mažesnė negu 1 % (Schajer 2005). Gręžimo gylis svyravo tarp 0,8–1,2 grąžto skersmens. Pasak autoriaus (Baldi 2005), tokia gręžimo gylio paklaida neturi įtakos liekamųjų įtempių rezultatui.

**Įtempių analizė.** Pagrindinis įtempių analizės algoritmas paremtas autoriaus (Nelson 1997) pasiūlyta skaičiavimo metodika, tačiau galutinis disertacijos tyrimo algoritmas modifikuotas pagal *DSPI* matavimo sistemą. Pirmas analizės žingsnis – atliekama bandinio paviršiaus fotografija (prieš gręžimą) bei jos išsaugojimas skaitmeninėje laikmenoje. Po to, priekinėje bandinio pusėje išgręžiama nedidelė skylė ir vėl atliekama to paties taško fotografija. Abiejų fotografijų palyginimas rodo apšvietimo bangos kelio ilgio pokytį  $\Delta P$ , kuris atitinka įtempių pokyčio sukeltą paviršiaus poslinkį. Šis kelio ilgio pokytis yra tiesiogiai susijęs su liekamaisiais įtempiais (2.11 pav. ir 2.2 formulė).



**2.11 pav.** Liekamųjų įtempių geometrija, taikant skylės gręžimo technologiją

**Fig. 2.11.** Hole-drilling residual stress geometry

$$\begin{Bmatrix} \overline{\Delta P_1} \\ \overline{\Delta P_2} \\ \overline{\Delta P_3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (2.4)$$

čia  $C_{ij}$  – suvaržymą sudarančios savybės, geometrinės savybės, holografinio jautrumo faktorius bei baigtinių elementų nustatymo koeficientas,

$$\overline{\Delta P_i} = \Delta P(r_i, \theta_i) - \Delta P(r_i, \theta_i + \pi), \quad (2.5)$$

čia  $\Delta P_i$  – kelio ilgio skirtumas tarp dviejų paviršiaus taškų, t. y. taškų išsidėsčiusių nuo skylės centro toje pačioje radialinėje vietoje.

Pakanka trijų holografinių duomenų porų, kad būtų galima nustatyti plokštumos įtempių būseną ties išgręžta skylė medžiagoje. Tačiau *DSPI* metodo fotografija paprastai susideda iš 256,000 pikselių elementų, todėl tūkstančiai duomenų taškų ties skylė yra tinkami medžiagos įtemptam būviui nustatyti. Programa atrinka tūkstančius pasikeitusių triadų ir su kiekviena jų atlieka nepriklausomą įtempių skaičiavimą.

### 2.4.5. Skaitinė analizė

Baigtinių elementų modelio pagalba siekiama atkartoti eksperimentinio bandymo procesą, t. y. suvirinimą bei liekamųjų įtempių susiformavimą. Modelio matmenys, medžiaga, suvirinimo technologija, šilumos įvedimas bei kiti įtakojantys veiksniai yra identiški kaip *BI* serijos bandinių. Šiame skyriuje *BEM* nagrinėja šiuos aspektus:

- temperatūros įvedimą ir pasiskirstymą bandinyje;
- liekamųjų suvirinimo įtempių pasiskirstymą bandinio pjūvyje.

Modeliavimą sudarė du etapai: terminis ir mechaninis. Pirmo etapo metu nustatytas temperatūros pasiskirstymas po 14 suvirinimo ėjimų, o antruoju etapu, panaudojus terminio modeliavimo rezultatus, apskaičiuoti liekamieji įtempiai bandinyje.

Pirmas ir pagrindinis terminio etapo matematinio modeliavimo žingsnis – judančio šilumos šaltinio modelis. Tai yra labai svarbus etapas, kuomet į suvirinimo konstrukciją įvedami terminiai įtempiai. Šiuos įtempius suformuoja nevaldomas metalo tūrio pokytis, kaip netolygaus temperatūros pasiskirstymo bandinyje rezultatas. Trumpalaikė terminė analizė nusako temperatūros pokytį laiko ir kintamos terminės apkrovos atžvilgiu. Savitų medžiagos savybių ir netolygaus temperatūros pasiskirstymo dėka, uždavinys tampa sudėtingas, todėl tyrimui pasirinktas dvimatis bandinio modelis.

**Terminė analizė.** Šilumos laidumas domene  $D$  formuluojamas matematine išraiška:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v(x, y, z) = \rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (-v_w) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2.6)$$

čia  $q$  – energijos generavimas domeno  $D$  tūrio vienetu ( $W/m$ );  $K_x, K_y, K_z$  – specifinis terminis laidumas  $x, y$  ir  $z$  kryptimis ( $W/m \cdot K$ );  $c$  – savitosios šilumos talpa ( $J/kg \cdot K$ );  $\rho$  – medžiagos tankis ( $kg/m^3$ );  $t$  – laikas ( $s$ );  $V$  – suvirinimo greitis ( $m/s$ ).

Pirminė išraiška:

$$T(x, y, z, o) = T_o, \text{ nes } (x, y, z) \in D. \quad (2.7)$$

Esminė paviršinė išraiška:

$$T(x, y, z, o) = T_o, \text{ nes } (x, y, z) \in D, \quad (2.8)$$

kai paviršiuje  $S_1$  ( $y, z$ )  $\in S_1$  ir  $t > 0$ .

Taigi šios sąlygos nurodo bet kurio taško temperatūrą nuo įvesto šilumos srauto. Paprastos paviršiaus sąlygos gali būti apibrėžiamos formule:

$$K_n \frac{\partial T}{\partial n} - q + h(T - T_o) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_o^4) = 0, \quad (2.9)$$

kai paviršiuje  $S_2(x, y, z) \in S_2$  ir  $t > 0$ ,

čia  $S_1$  – šilumos įvedimo paviršius;  $S_2$  – paviršiai, kurie priklauso konvekcijai ir įvedamos šilumos pasikeitimui;  $K_n$  – terminio savitojo laidumo normalė paviršiuje ( $W/m \cdot K$ );  $q$  – nurodo šilumos įvedimą ( $W/m^2$ );  $h$  – konvekcinis šilumos perdavimo koeficientas ( $W/m^2 \cdot K$ );  $T_o$  – aplinkos temperatūra ( $K$ );  $\sigma$  – *Stephan-Boltzmann'o* spinduliavimo konstanta;  $\varepsilon$  – šilumos išsiskyrimo efektyvumas (*Sathiya 2009*).

Skaičiuojant pagal 2.6 formulę ir atsižvelgiant į paviršių padėtį nusakančias formules (2.7 ir 2.8), gaunamas temperatūros pasiskirstymas kūne. Šis temperatūrinis laukas vėliau įkeliamas į mechaninį modelį, liekamųjų įtempių ir deformacijos skaičiavimui.

**Mechaninė analizė.** Pusiausvyros (2.10) ir sudedamosios lygtys (2.11) panaudotos tampriosios-plastinės deformacijos analizei.

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = 0, \quad (2.10)$$

čia  $\sigma_{ij}$  – įtempių tenzorius,  $b_i$  – kūno stiprumas. Priimta, kad įtempių tenzorius yra simetriškas, t. y.  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ .

Terminis tamprumo-plastiškumo medžiagos modelis pagrįstas *von Mises* takumo kriterijumi ir izotropinės deformacijos suketinimo taisykle. Įtempių-deformacijos santykis išreiškiamas lygtimis (2.11 ir 2.12).

$$[d\sigma] = [D^{ep}][d\varepsilon] - [C^{th}]dT, \quad (2.11)$$

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p], \quad (2.12)$$

čia  $[D^e]$  – tampriojo atsparumo matrica,  $[D^p]$  – plastinio atsparumo matrica,  $[C^{th}]$  – terminio atsparumo matrica,  $d\sigma$  – įtempių pokytis,  $d\varepsilon$  – deformacijos pokytis,  $dT$  – temperatūros pokytis.

Kadangi terminė tamprioji-plastinė analizė yra netiesinis uždavinys, tuomet pokyčio skaičiavimo technologija (2.11, 2.12 formulės) dalyvauja sprendimo uždavinyje. Pokyčio įtempiai nustatomi naudojant pilną *Niutono-Raphsono* skaičiavimo metodiką (*Peng-Hsiang 2004*).

Skaitinės analizės tyrimai disertacijoje atlikti *ANSYS* bei *ABAQUS* programe įranga.

## 2.5. Mechaniniai bandymai

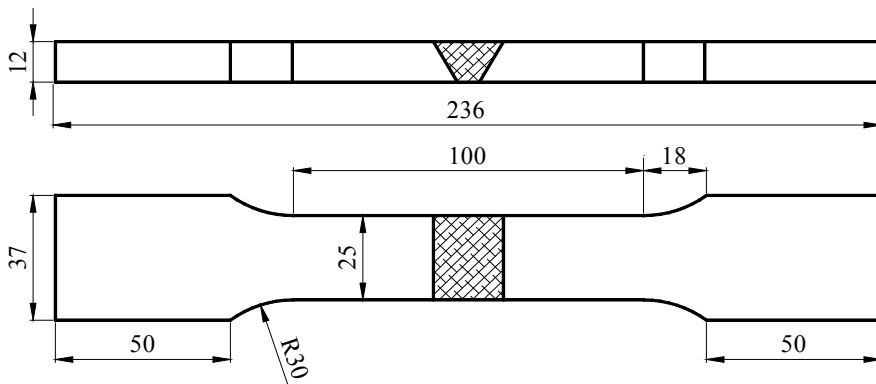
**Tempimo bandymas.** Sandūrinių jungčių skersinio tempimo bandymai atliekami pagal *LST EN 895:1998* standarto reikalavimus. Bandiniai pjaunami mechanškai iš specialiai šiam bandymui paruoštų bandinių. Suvirinimo siūlės perteklinis metalas turi būti pašalintas iš abiejų pusių. Iš kiekvienos jungties išpjauta po 2 bandinius. Bandinių matmenys ir padėtis (suvirinimo siūlės atžvilgiu) atvaizduoti 2.12 paveiksle.

Suvirinto tempimo 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 riba  $R_{eH}$  (MPa):

$$R_m = \frac{F_{max}}{S}, \quad (2.13)$$

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S}, \quad (2.14)$$

čia  $F_{max}$  – didžiausia jėga, užfiksuota tempiant bandinį;  $F_{eH}$  – jėga, kuriai veikiant metalas pradeda deformuotis plastiškai, nedidinant apkrovos;  $S$  – pradinis tempiamo bandinio skerspjūvio plotas;  $R_{eH}$  – fizinė metalo takumo riba.



**2.12 pav.** Skersinio tempimo bandinys  
**Fig. 2.12.** Transverse tensile test specimen

Bandymai buvo atliekami universalia tempimo-lenkimo bandymų mašina *MIRI 500K* (Rusija).

**Smūginio tąsumo** bandiniai išpjauti pagal standarto *LST EN ISO 15614-1:2004* reikalavimus. Bandymo temperatūra atitinka standarto *LST EN 1090-2:2008* reikalavimus. Smūginio tąsumo bandinio matmenys ir bandymo procedūra atitinka standarto *LST EN 875:1998* reikalavimus. Smūginio tąsumo kriterijai rodo metalo sugebėjimą priešintis smūginėms apkrovoms. Smūginis tąsumas  $KC$  ( $J/cm^2$ ) išreiškiamas:

$$KC = \frac{K}{S}, \quad (2.15)$$

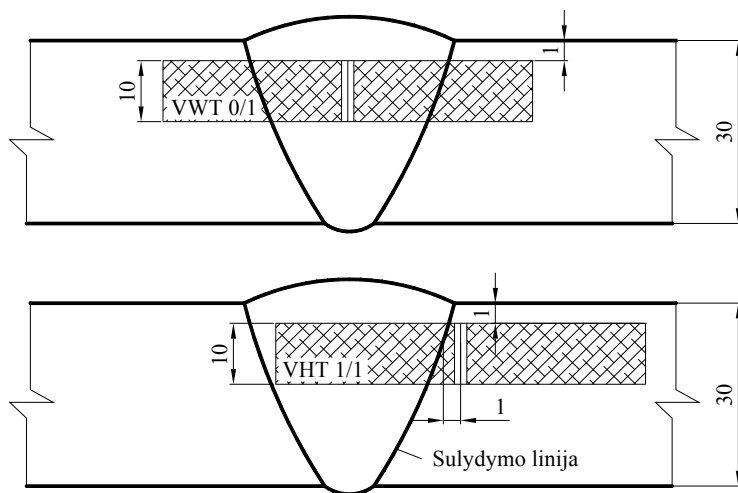
čia  $K$  – darbas, sunaudotas bandinio suardymui, veikiant smūginei apkrovai;  $S$  – bandinio skerspjūvio plotas.

Smūginio tąsumo nustatymui naudojami standartinių matmenų bandiniai su *V* formos įpjovomis. Pagal įpjovos formą bandinio vidurinėje dalyje, smūginis tąsumas žymimas  $KCV$ .

Pagal plieninių konstrukcijų gamybos standartą (*LST EN 1090-2:2008*), iš plieno *S355J2* pagamintos svarbios konstrukcijos Lietuvoje eksploatuojamos iki

-30 °C temperatūros, todėl smūginio tūsumo bandymai atlikti -30 °C temperatūroje.

Bandymai atlikti smūginiu muštuvu *Zwick/Roell Pendulum Impact Tester RKP 450* (Vokietija).



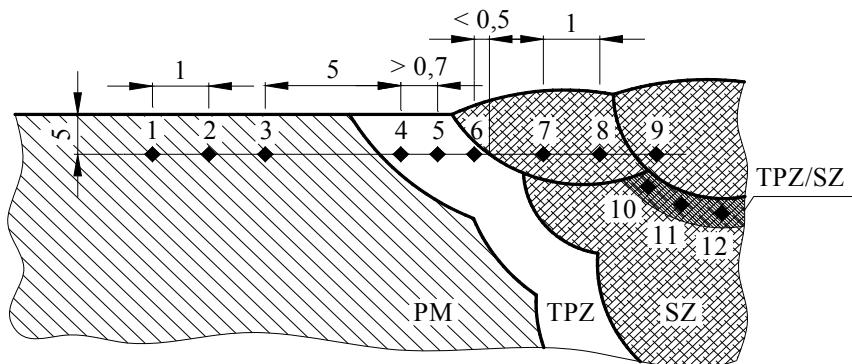
2.13 pav. Smūginio tūsumo bandinio išpjovimo vieta

Fig. 2.13. Impact test specimen location

Kiekvienam suvirintosios jungties bandiniui (*B1, B2, B3, B4*) atlikti trys smūginio tūsumo bandymai siūlės metalui ir trys bandymai terminio poveikio sričiai -30 °C temperatūroje. Siūlės metalui tirti naudojamas *VWT 0/1* bandinio tipas (2.13 pav.): *V* – Šarpio 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 (2.13 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.

**Mikro kietumo bandymai** atlikti universaliu *Zwick/Roell ZHU 2.5* elektroniniu kietmačiu, kurio matavimo paklaida 1 %. Tai pilnai automatizuotas mikro kietumo matavimo prietaisas, atliekantis matavimus pagal *Vickerso* metodą. Matavimo skalė *HV*. Tyrimo metu mikro kietumo matavimo apkrova buvo 50 kN, kurios apkrovos greitis siekė 7 N/s, išlaikymo laikas 12 s. Kietumo matavimo taškų išdėstymas ir matavimai atlikti remiantis standarto *LST EN 1043-2:1998*

„Metalinės medžiagos. Virintinių siūlių ardomieji bandymai. Kietumo bandymas. 2 dalis. Suvirintų sujungimų mikrokietumo bandymas“ nurodyta metodika.



**2.14 pav.** Mikro kietumo matavimo taškų išsidėstymas

**Fig. 2.4.** Distribution of measurement points of micro hardness tests

Kietumo matavimai atlikti keturiuose skirtinguose suvirintos jungties srityse: pagrindiniame metalė, terminio poveikio zonoje, suvirinimo siūlės metalė bei tarp suvirinimo siūlių esančios terminio poveikio zonoje *TPZ/SZ*. Kiekvienam bandiniui buvo atlikta 12 matavimų, pagal 2.14 paveiksle pateiktą schemą.

Skaitinės analizės metu, 2D modelio pjūvyje nustatytas kietumo pasiskirstymas po 14 suvirinimo ėjimų.

Pagal *LST EN ISO 15614-1:2004* plieno *S355J2* suvirintų jungčių (be terminio apdorojimo po suvirinimo) kietumas turi būti ne didesnis kaip 380 *HV*, kai po suvirinimo atliktas terminis įtempimų atleidimas – kietumas ne didesnis kaip 320 *HV*.

**Mikrostruktūros tyrimai.** Suvirintų bandinių mikrostruktūros tyrimai atlikti optinės mikroskopijos metodu, naudojant optinį mikroskopą „Keyens VHX-600“: objektyvas *VH-Z100UR*, optinis priartinimas 10×, padidrinimo ribos nuo 100× iki 1000×. Bandiniai buvo poliruoti ir ėsdinami pikrino rūgšties tirpalu.

Analizuojant mikrostruktūros tyrimų rezultatus nustatomas suvirintos jungties metalo mikrostruktūros pokytis, atsiradęs dėl vibracijos energijos suvirinimo metu.

**Technologinių savybių tyrimas.** Suvirinimo technologinių savybių tyrimas atliktas panaudojant *METALAX* vibracinio apdorojimo įrangą, suvirinimo pusautomatą *KEMPOMAT 3200*, 1,2 mm skersmens *ESAB OK Autrod 12.50* pridėtinę suvirinimo vielą, bei 6 mm storio plieno *S355J2* plokšteles. Tyrimo metu, kei-

čiant suvirimo padėtį (žemutinę *PA*, horizontalią *PC*, vertikalią aukštyn *PF*), suvirinimo srovę bei vibracinio apdorojimo dažnį, buvo analizuojamas metalo pralaidumo gylis, suvirinimo siūlės forma, bei dėl vibracijos susidarantys defektai.

Technologinių savybių tyrimai atlikti siekiant pagrįsti tyrimo metu pastebėtus vibracinės energijos sukeltus suvirinimo siūlės geometrijos ir kokybės pokyčius.

## 2.6. Antrojo skyriaus išvados

1. Išnagrinėjus šiuolaikiškas liekamųjų suvirinimo įtempių įvertinimo metodikas bei jų privalumus ir trūkumus, buvo pasirinktos magnetinės metalo atminties, ultragarso bangos sklaidimo, rentgeno spindulių difrakcijos, neutronų difrakcijos bei skylės gręžimo metodikos.

2. Rentgeno spindulių difrakcija leidžia išmatuoti liekamuosius įtempius 50–100  $\mu\text{m}$ , neutronų difrakcija iki 25  $\text{mm}$ , skylės gręžimo metodas – 1,5–2,0  $\text{mm}$  bandinio paviršiaus gylyje. *PIB* matavimo gylis priklauso nuo ultragarsinio keitiklio dažnio, tyrimo metu matavimo gylis siekia apie 3  $\text{mm}$ , kai keitiklio dažnis 5  $\text{MHz}$ .

3. Taikant baigtinių elementų metodą, galima matematiškai įvertinti liekamųjų suvirinimo įtempių susiformavimą po kiekvieno suvirinimo ėjimo ir palyginti skaičiavimo rezultatus su eksperimentiniais.

4. Atlikus liekamųjų įtempių matavimus nustatoma priimtinausia liekamųjų įtempių įvertinimo metodika, kurią galima taikyti realios konstrukcijos liekamųjų įtempių įvertinimui, kai suvirinimo metu arba po jo yra taikomas vibracinis įtempių atleidimas.

5. Bandinių mechaninių savybių tyrimai leidžia paaiškinti suvirintos jungties mechaninių savybių priklausomybes, kai liekamieji įtempiai mažinami skirtingomis technologijomis.

6. Technologinių savybių tyrimas leidžia paaiškinti dėl vibracinio apdorojimo suvirinimo siūlėje atsiradusių neigiamų pokyčių kilmę.

---

## Liekamųjų įtempių pokyčio tyrimai

Šiame skyriuje aprašyta eksperimentų atlikimo eiga, gauti rezultatai ir jų aptarimas. Pateikti liekamųjų suvirinimo įtempių matavimų rezultatai, atlikti metalo magnetinės atminties metodu, ultragarso bangos greičio matavimo metodu, rentgeno spindulių difrakcijos, neutronų difrakcijos, skylės gręžimo bei baigtinių elementų analizės metodais. Difrakcijos metodai buvo taikomi siekiant gauti tikslius paviršinius bei vidinius liekamuosius suvirinimo įtempius.

Skyriaus medžiaga publikuota autoriaus straipsniuose (*Jurčius 2009a, Jurčius 2009b, Jurčius 2010*).

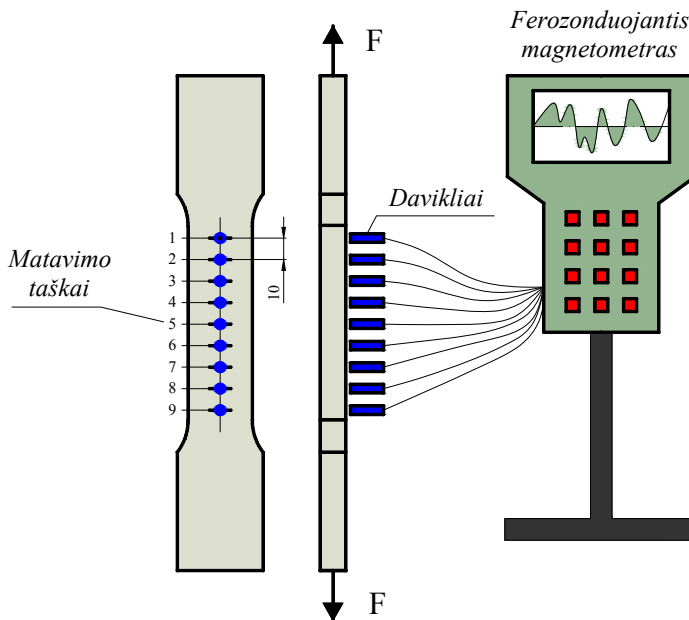
### 3.1. Magnetinės metalo atminties tyrimas

Yra žinoma, kad apkraunant feromagnetinę medžiagą mechaniniais įtempiais, gali pasikeisti jos magnetinė elgsena susijusi su vidinių magnetinių struktūros domenų judėjimu. Taigi, įmagnetinimas gali virsti nevaržomu išilgai vienašio tempimo įtempių krypties (*Dubov 1997*).

### 3.1.1. Magnetinio parametro priklausomybės nuo įtempių tyrimas

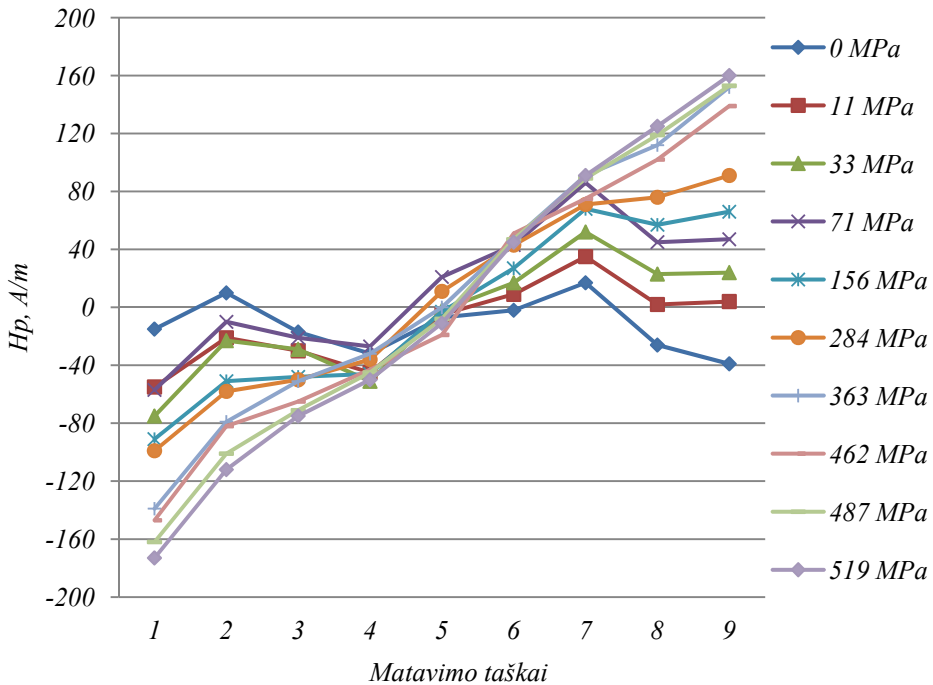
Šiame skyriuje pateiktas magnetinio parametro priklausomybės nuo įtempių tyrimas, kai plieno *S355J2* bandinį  $260 \times 30 \times 12$  mm veikia statinė tempimo apkrova.

Tyrimo metu buvo matuojamas *H<sub>p</sub>* magnetinio lauko stiprumo dydis taikant magnetinės metalo atminties kontrolės metodą.



3.1 pav. Bandymo standas  
Fig. 3.1. Stand of experiment

Bandymo standą (3.1 pav.) sudarė: tempimo mašina, ferozonduojantis magnetometras bei devyni magnetinio lauko stiprį fiksuojantys davikliai, kurie fikso savo magnetinio lauko normalės pasiskirstymą jų pridėjimo taškuose. Kiekvieno magnetinio daviklio jautrumas  $1 \text{ A/m}$ . Tempimo bandymas atliktas  $250 \text{ kN}$  galios *Zwick/Roell Z250* tempimo mašina. Bandymo metu apkrovos greitis siekė  $5 \text{ mm/min}$ . Stiprumo riba buvo pasiekta esant  $519 \text{ MPa}$  apkrovai. Bandymo metu automatiškai buvo fiksuojamas laikas, įtempiai, bandinio pailgėjimas ir magnetinio lauko stipris *H<sub>p</sub>*. Bandymo rezultatai, nuo nulinių iki stiprumo ribos įtempių, grafiškai pavaizduoti 3.2 paveiksle.



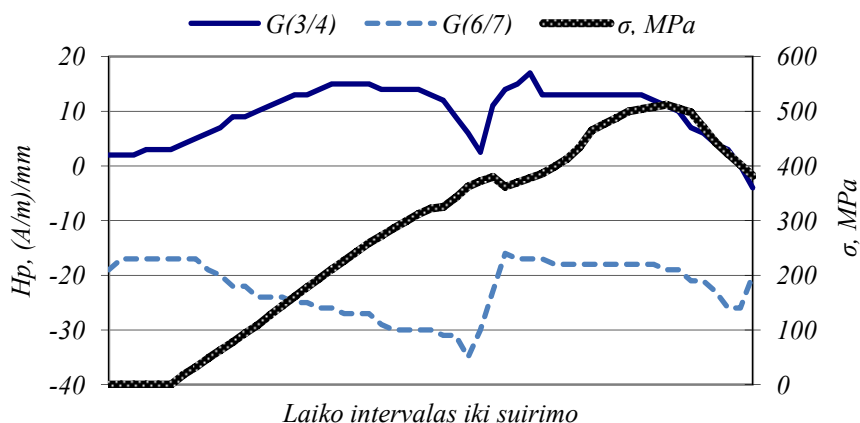
**3.2 pav.** Magnetinio lauko stiprumo  $H_p$  pasiskirstymas bandinyje tempimo metu  
**Fig. 3.2.** Distribution of magnetic field strength  $H_p$  during tensile test

Remiantis matavimais galime teigti, kad magnetinio lauko stiprumas bandinyje priklauso nuo veikiančių tempimo įtempių. Iš atliktų tempimo bandymų apskaičiuotas magnetinio lauko stiprumo gradientas tarp 3/4 ir 6/7 daviklių. Tarp šių daviklių įvyko bandinio irimas. Magnetinio lauko stiprumo gradientas apskaičiuotas pagal 3.1 formulę.

$$G_{n/m} = \frac{H_n + H_m}{L_{n/m}}, \quad (3.1)$$

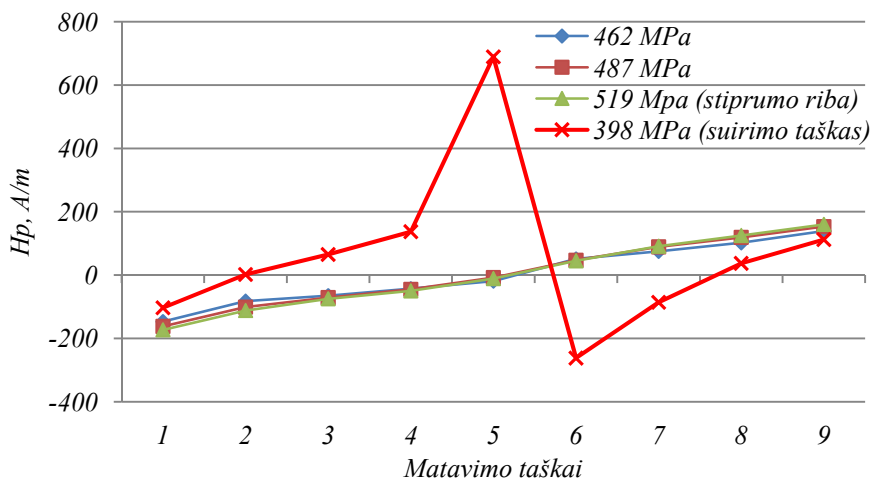
čia  $H_n$  ir  $H_m$  – magnetinio lauko stipris taškuose  $n$  ir  $m$  ( $H_p$ , A/m);  $L_{n/m}$  – bandinio pailgėjimas tarp  $n$  ir  $m$  matavimo taškų (mm).

Kadangi bandinių pailgėjimas iki stiprumo ribos sąlyginai nedidelis, buvo padaryta prielaida, kad bandinys deformavosi tolygiai per visą ilgį.



**3.3 pav.** Magnetinio lauko stiprumo gradiento (tarp taškų 3 ir 4 bei 6 ir 7) ir įtėmpių pasiskirstymas laike, veikiant statinei apkrovai

**Fig. 3.3.** Distribution of magnetic field strength (between points 3-4 and 6-7) in time during static load



**3.4 pav.** Magnetinio lauko stiprumo  $H_p$  pasiskirstymas tempiant bandinį prieš pat suirimą ir po suirimo

**Fig. 3.4.** Distribution of magnetic field strength during tensile test, moment before fracture and after fracture

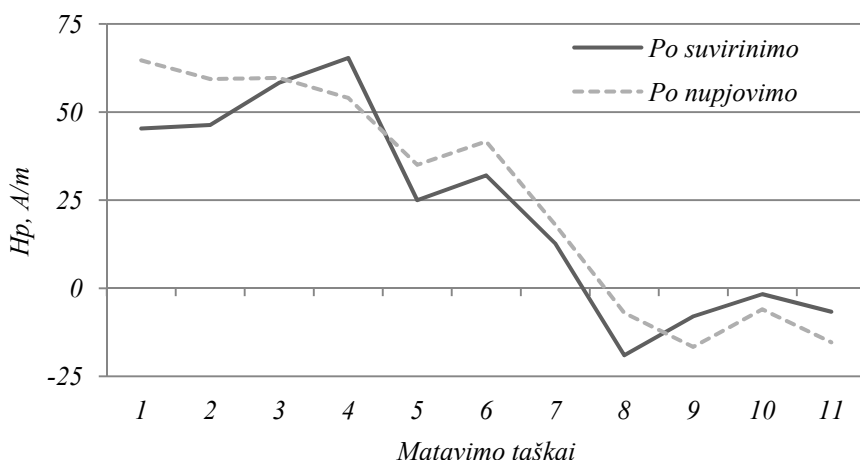
Išanalizavus bandymų rezultatus (3.2, 3.3 ir 3.4 pav.) pastebėta, kad magnetinio lauko stiprumo gradientą bei tempimo įtėpius sieja tiesinė priklausomybė. Nustatyta, kad magnetinio lauko stiprumo gradiento didžiausias kritimas vyko

metalo takumo zonoje. Tai rodo, kad šis magnetinis parametras gali būti naudojamas nustatant metalo įtemptą ir/arba deformuotą būvį.

### 3.1.2. Įtempių koncentracijos nustatymas bandiniuose

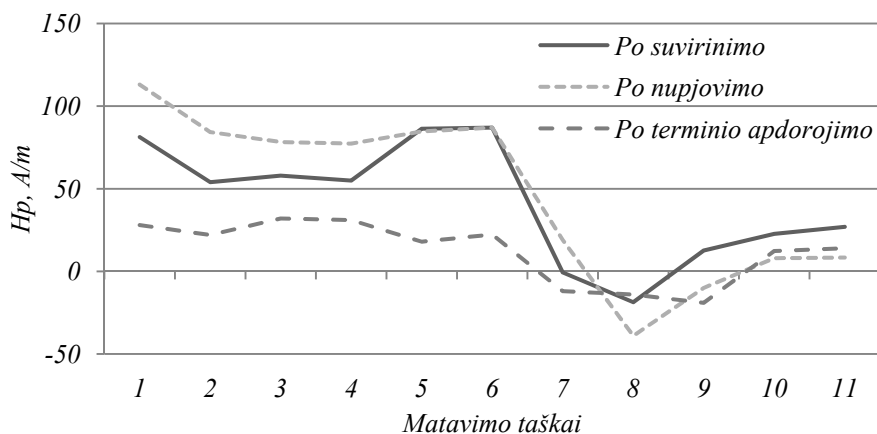
Po *B1*, *B2*, *B3* ir *B4* serijos bandinių suvirinimo, apdirbimo ir nupjovimo buvo atlikta magnetinio lauko stiprio  $H_p$  kontrolė. Siekta įvertinti kaip keičiasi magnetinio lauko stipris bandinyje po kiekvienos procedūros.

Kiekvienas bandinys turėjo vienuolikos matavimo taškų liniją, pagal 2.4 skyriuje pateiktą matavimo schemą (2.8 pav.). *B1* serijos bandinių magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas išmatuotas du kartus: po suvirinimo ir po sukabinimo siūlių nupjovimo (3.5 pav.).



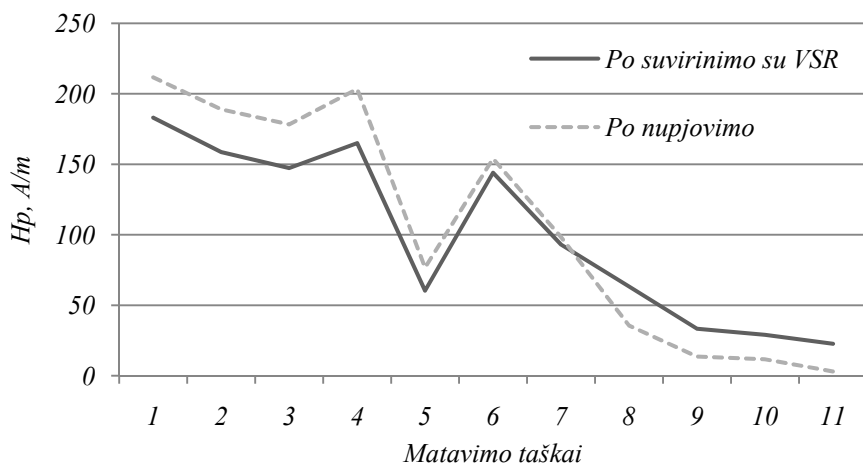
**3.5 pav.** Magnetinio lauko stiprio  $H_p$  pasiskirstymas *B1* matavimo taškuose  
**Fig. 3.5.** Distribution of magnetic field strength  $H_p$  in measurement points of *B1*

Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas *B2* serijos bandiniuose išmatuotas tris kartus: po suvirinimo, sukabinimo siūlių nupjovimo ir terminio apdorojimo (3.6 pav.).



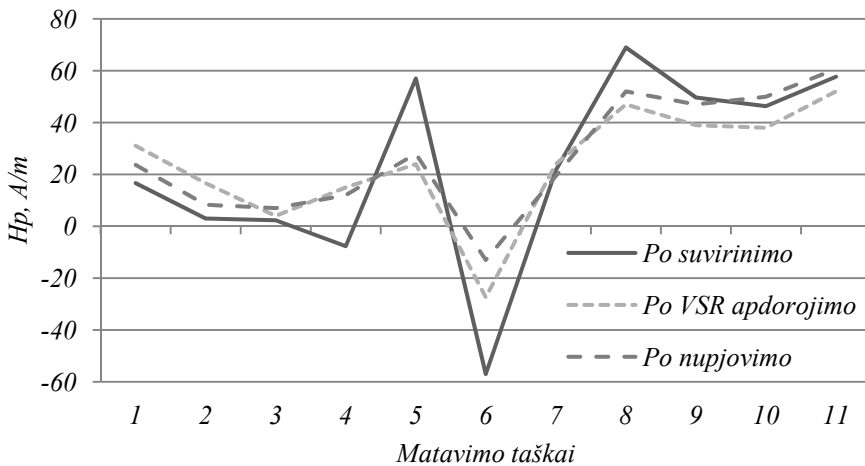
**3.6 pav.** Magnetinio lauko stiprio  $H_p$  pasiskirstymas B2 matavimo taškuose  
**Fig. 3.6.** Distribution of magnetic field strength  $H_p$  in measurement points of B2

Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas B3 serijos bandiniuose išmatuotas du kartus: po suvirinimo (naudojant vibracijos energiją suvirinimo metu) ir po sukabinimo siūlių nupjovimo (3.7 pav.).



**3.7 pav.** Magnetinio lauko stiprio  $H_p$  pasiskirstymas B3 matavimo taškuose  
**Fig. 3.7.** Distribution of magnetic field strength  $H_p$  in measurement points of B3

Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas B4 serijos bandiniuose išmatuotas tris kartus: po suvirinimo, vibracinio apdorojimo ir sukabinimo siūlių nupjovimo (3.8 pav.).



**3.8 pav.** Magnetinio lauko stiprio  $H_p$  pasiskirstymas  $B4$  matavimo taškuose  
**Fig. 3.8.** Distribution of magnetic field strength  $H_p$  in measurement points of  $B4$

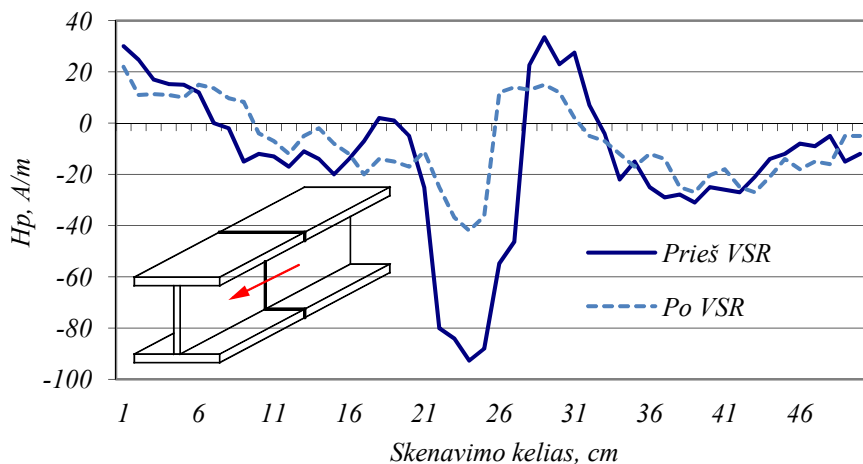
Magnetiniu metalo atminties metodu nustatyta, kad vibracinis apdorojimas *po suvirinimo* sumažino liekamųjų įtempių koncentraciją apie 35 %. Terminis apdorojimas liekamųjų įtempių koncentraciją sumažino apie 70 %. Vibracijos energijos poveikį (suvirinimo metu) liekamųjų įtempių koncentracijai sunku nustatyti, nes nėra žinoma pradinė įtempių koncentracijos reikšmė. Lyginti skirtingus bandinius nėra prasmės, nes kiekvienas bandinys Žemės magnetiniame lauke įsimagnetina skirtingai.

Tyrimo metu nustatyta, kad sukabinimo siūlės įtakoja liekamųjų suvirinimo įtempių koncentraciją bandiniuose. Po bandinių nupjovimo magnetinio lauko stiprio parametras  $H_p$  pasikeitė apie 10 %. Tai rodo, kad magnetinės metalo atminties metodas gali būti naudojamas konstrukcinio plieno įtemptam ir/arba deformuotam būviui įvertinti.

### 3.1.3. Įtempių koncentracija sijos sandūrinėje jungtyje

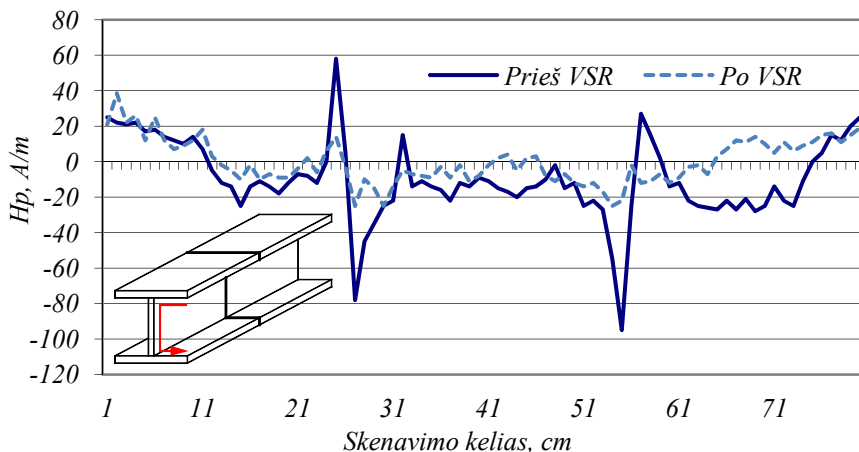
Nagrinėjant realų *MMM* metodo taikymą konstrukcijos gamybos metu, buvo atlikta keletas tyrimų. Ištirtas sijos sandūrinės suvirinimo siūlės liekamųjų suvirinimo įtempių pasiskirstymas prieš ir po *VSR* apdorojimo. Dvitėjo profilio *HEB500* sija sujungta iš dviejų dalių, bendras ilgis 16 metrų, masė – 3 tonos. Po suvirinimo buvo atliktas vibracinis liekamųjų suvirinimo įtempių atleidimas. Magnetinio lauko stiprio matavimai atlikti prieš vibracinį apdorojimą ir po jo,

tuose pačiuose matavimo taškuose. Matavimo rezultatai grafiškai pateikti 3.9, 3.10 ir 3.11 paveiksluose.



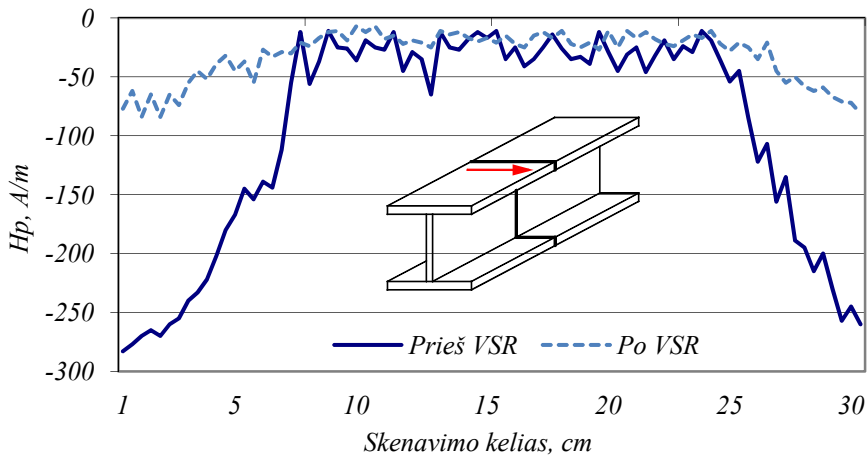
**3.9 pav.** Magnetinio lauko stiprio  $H_p$  pasiskirstymas sandūrinėje dvitėjo profilio HEB500 siūlėje (500 mm atkarpoje) prieš ir po VSR apdorojimo

**Fig. 3.9.** Distribution of magnetic field strength  $H_p$  in butt weld of profile HEB500 (in 500 mm distance) before and after VSR treatment



**3.10 pav.** Magnetinio lauko stiprio  $H_p$  pasiskirstymas sandūrinėje dvitėjo profilio HEB500 siūlėje (800 mm atkarpoje) prieš ir po VSR apdorojimo

**Fig. 3.10.** Distribution of magnetic field strength  $H_p$  in butt weld of profile HEB500 (in 800 mm distance) before and after VSR treatment



**3.11 pav.** Magnetinio lauko stiprio  $H_p$  pasiskirstymas sandūrinėje dvitėjo profilio HEB500 siūlėje (300 mm atkarpoje) prieš ir po VSR apdorojimo  
**Fig. 3.11.** Distribution of magnetic field strength  $H_p$  in butt weld of profile HEB500 (in 300 mm distance) before and after VSR treatment

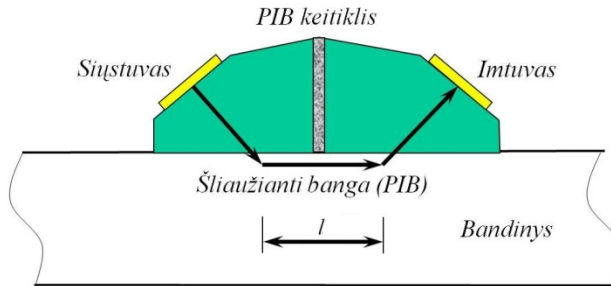
Iš praktinio MMM metodo pritaikymo galime teigti, kad magnetinio lauko stiprio  $H_p$  pokytis konstrukcijoje, prieš ir po VSR apdorojimo, įvyksta, t. y. liekamųjų suvirinimo įtempių koncentracija mažėja. Tačiau šiuo metodu sunku įvertinti liekamųjų suvirinimo įtempių dydį bei kryptį. Todėl jo taikymas konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje yra ribotas, gautas pokytis nepatvirtina konkretaus VSR poveikio efektyvumo.

## 3.2. Ultragarso bangos sklaidimo greičio tyrimas

Ultragarso liekamųjų suvirinimo įtempių nustatymo metodas paremtas išilginės ir paviršinės išilginės bangų taikymu, kai įvertinama suvirinimo siūlės zonos (SZ) bei pagrindinio metalo (PM) mikrostruktūros, t. y. eksperimentiniu būdu nustatomi abiejų zonų korekcijos koeficientai. Tyrimams panaudota korekcijos koeficiento matavimo metodika, paremta mikrostruktūros analize pagal autorių (Walaszek 2002). Šis metodas buvo sėkmingai pritaikytas mikrostruktūros korekcijos koeficientui nustatyti.

Plieno S355J2 suvirintos jungties akustinio tamprumo koeficientas nustatytas išmatavus ultragarso bangos sklaidimo greitį bandinyje, keičiantis įtempiams. Kad teisingai įvertinti akustinio tamprumo koeficientą, bangos sklaidimo kryptis turi sutapti su analizuojamų įtempių kryptimi. Dėl to tyrimui panaudota ultragarso paviršinė išilginė banga PIB, kuri paprastai vadinama šliaužiančia (angl.

*creeping wave*) banga. Šios bangos nueitas kelias bandinio paviršiuje žymimas  $l$  (3.12 pav.).



**3.12 pav.** Bendras ultragarsinio *PIB* keitiklio veikimo principas  
**Fig. 3.12.** General diagram of the *PIB* ultrasonic sensor

*PIB* tipo banga pasižymi įvairiais privalumais, lyginant su kito tipo bangomis. Šioje paviršinėje bangoje materialų dalelių virpesių išilginė dedamoji  $\zeta'$  *PIB* viršija skersinę  $\zeta''$  *PIB*. Šis esminis skirtumas lemia ir visas specifines *PIB* savybes – šliaužiamąjį sklidimo pobūdį, didžiausią sklidimo greitį, prigimtinį slopinimą, persispinduliuojant į tūrinę skersinę bangą, taip pat ir svarbiausią specifinę ypatybę – skirtingas negu *PSB* (paviršinė skersinė banga) sužadinimo sąlygas. Vienas iš efektyviausių paviršinių bangų sužadinimo kietajame izotropiniame kūne metodų yra tūrinių išilginių bangų transformavimas į paviršinės kietojo kūno paviršiuje, besiribojančiame su kūnu, kurio savitasis akustinis impedansas mažesnis (Sajauskas 2002, 2004).

*PIB* banga yra daug jautresnė prispaudimui, nei kitos bangos, tačiau ji yra mažiau jautri skirtingoms mikrostruktūroms. Nepaisant to, mikrostruktūros poveikis turi būti įvertintas kalibravimo metu.

Nustačius akustinį tamprumo koeficientą, atlikti bangos sklidimo greičio matavimai bandiniuose ir liekamųjų suvirinimo įtempių skaičiavimai.

### 3.2.1. Akustinio tamprumo konstantos nustatymas

Dėl suvirinimo metu vykstančių intensyvių šilumos mainų, suvirinimo zonoje vyksta mikrostruktūros pokyčiai, t. y. siūlės ir terminio poveikio zonos metalo mikrostruktūroje atsiranda beinito. Dėl skirtingų mikrostruktūrų skiriasi ir akustinės bangos sklidimas jose. Todėl tyrimo metu buvo nustatytos siūlės  $K_{SZ}$  ir pagrindinio metalo  $K_{PM}$  akustinio tamprumo konstantos (3.13 pav.). Terminio poveikio sričiai akustinio tamprumo koeficientas nebuvo nustatytas, nes šios zonos plotis siekė tik 1,5–3 mm.

Akustinis tamprumo koeficientas nustatytas naudojant *PIB* keitiklį *5/MB-2p*, defektoskopą *OLYMPUS EPOCH-4* ir statinę tempimo mašiną *Zwick/Roell Z250*. *PIB* banga buvo perduodama per poliruotą bandinio paviršių, kelių milimetrų gylyje. *PIB* bangos kelias bandinio paviršiumi – 22 mm.

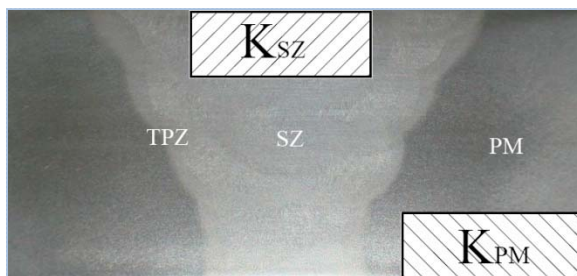
Apribojimų nukrypimams įvertinti ir susieti juos su bangos sklidimo laiku, buvo naudojama kalibravimo formulė (3.2).

$$A_{11} = \frac{E}{\sigma} \left( \frac{t - t_0}{t_0} \right), \quad (3.2)$$

čia  $A_{11}$  – bangos, kuri skleidžiama pastovios apkrovos kryptimi akustinio tamprumo koeficientas,  $\sigma$  – įtempiai,  $E$  – tamprumo modulis.

Akustinio tamprumo koeficientui nustatyti buvo panaudotas bandinys, suvirintas tokiomis pat sąlygomis kaip ir tyrimo bandiniai:

- plienas *S355J2* – *LST EN 10025-2:2005*;
- briaunų paruošimas *V* formos;
- suvirintas pusiauautomatiniu būdu (*MAG*);
- suvirinto bandinio matmenys 140×140×30 mm;
- išpjauto kalibravimo bandinio matmenys 140×29,5×9,3 mm.



**3.13 pav.** Akustinio tamprumo konstantų matavimo vietas bandinyje

**Fig. 3.13.** Zones of extraction of the tensile specimens used for the determination of the coefficients acoustoelastic

Kalibravimo procedūrą sudarė šie veiksniai:

- kalibravimo bandinio išpjovimas ir mikrošlifo paruošimas;
- mikrostruktūros analizė, *SZ* ir *PM* zonų nustatymas;
- ultragarso išilginės ir paviršinės išilginės bangų sklidimo greičio *SZ* bei *PM* zonose, kai  $\sigma=0$  MPa nustatymas;

- ultragarso paviršinės išilginės bangos sklidimo greičio  $SZ$  ir  $PM$  zonose nustatymas, veikiant išilginiams tempimo įtempimams:  $\sigma_1=50 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_2=100 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_3=150 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_4=200 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_5=250 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_6=300 \text{ MPa}$ ;
- akustinio tamprumo koeficiento  $A_{II}$  skaičiavimas;
- akustinio tamprumo konstantos  $K_{II}$  nustatymas.

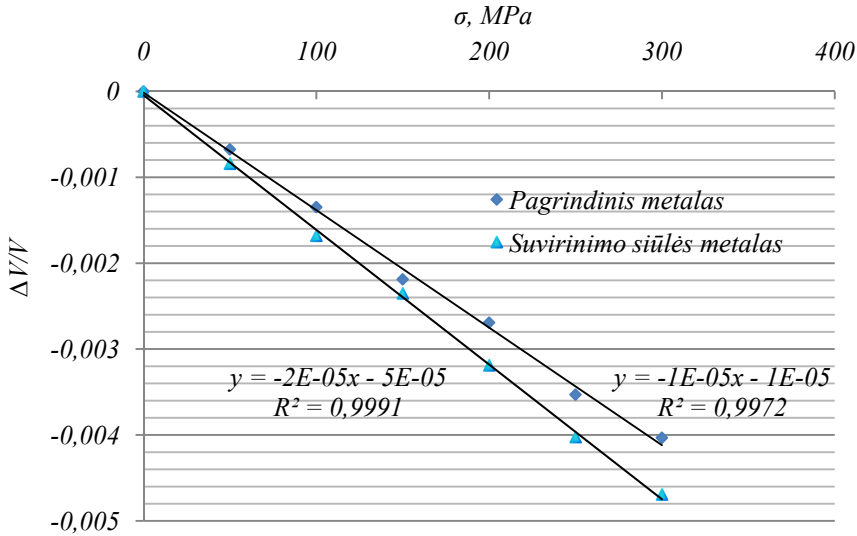
Medžiagos akustinio tamprumo koeficientas buvo nustatytas matuojant ultragarso bangos sklydimo greitį  $V$  bandinio tempimo metu. Išmatuoto greičio  $V$  santykis su  $PIB$  bangos nueitu keliu  $l$  išreiškia bangos sklidimo laiką  $T$  (3.1 lentelė). Priklausomai nuo įtempių, pagal 3.2 formulę buvo apskaičiuotos akustinio tamprumo koeficiento reikšmės.

### 3.1 lentelė. Akustinio tamprumo koeficiento matavimo duomenys

**Table 3.1.** Data of acoustoelastic coefficient measurements

| <b>Pagrindiniame metale (<math>K_{PM}</math>)</b>                                                                                                                                                                                                                                 |                 |                |               |          |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|---------------|----------|--------------|
| $\sigma, \text{MPa}$                                                                                                                                                                                                                                                              | $V, \text{m/s}$ | $l, \text{mm}$ | $T, \text{s}$ | $A_{II}$ | $\Delta V/V$ |
| 0                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 5929            | 22,00          | 3,71058E-06   | -        | 0            |
| 50                                                                                                                                                                                                                                                                                | 5933            | 22,00          | 3,70807E-06   | -2,837   | -0,000674    |
| 100                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5937            | 22,00          | 3,70558E-06   | -2,832   | -0,001347    |
| 150                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5942            | 22,00          | 3,70246E-06   | -3,065   | -0,002188    |
| 200                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5945            | 22,00          | 3,70059E-06   | -2,827   | -0,002691    |
| 250                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5950            | 22,00          | 3,69748E-06   | -2,966   | -0,003529    |
| 300                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5953            | 22,00          | 3,69562E-06   | -2,823   | -0,004032    |
| <b>Suvirinimo siūlėje (<math>K_{SZ}</math>)</b>                                                                                                                                                                                                                                   |                 |                |               |          |              |
| $\sigma, \text{MPa}$                                                                                                                                                                                                                                                              | $V, \text{m/s}$ | $l, \text{mm}$ | $T, \text{s}$ | $A_{II}$ | $\Delta V/V$ |
| 0                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 5941            | 22,00          | 3,70308E-06   | -        | 0            |
| 50                                                                                                                                                                                                                                                                                | 5946            | 22,00          | 3,69997E-06   | -3,531   | -0,000841    |
| 100                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5951            | 22,00          | 3,69686E-06   | -3,529   | -0,001680    |
| 150                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5955            | 22,00          | 3,69437E-06   | -3,291   | -0,002351    |
| 200                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5960            | 22,00          | 3,69128E-06   | -3,347   | -0,003188    |
| 250                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5965            | 22,00          | 3,68818E-06   | -3,380   | -0,004023    |
| 300                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5969            | 22,00          | 3,68571E-06   | -3,284   | -0,004691    |
| $\sigma$ – tempimo įtempiai, $V$ – ultragarso bangos sklidimo greitis matavimo taške; $l$ – ultragarso bangos nueitas kelias bandinyje; $T$ – bangos sklidimo laikas bandinyje; $A_{II}$ – akustinio tamprumo koeficientas; $\Delta V/V$ – santykinis ultragarso greičio pokytis. |                 |                |               |          |              |

Dviejų skirtingų mikrostruktūrų (*SZ* ir *PM*) akustinio tamprumo koeficiento  $A_{11}$  gautos reikšmės pateiktos 3.1 lentelėje. Tyrimo metu nustatytas koeficientas  $A_{11}$  rodo paviršinės ultragarso bangos santykinio greičio kitimo kreivės posvirį priklausomai nuo įtempių (3.14 pav.).



**3.14 pav.** SZ ir PM zonos santykinio ultragarso greičio pakyčio priklausomybė nuo įtempių

**Fig. 3.14.** Dependence of relative variation of speed according to the constraints in base metal (*PM*) and the melted zone (*SZ*)

Iš 3.1 lentelės apskaičiuoto akustinio tamprumo koeficiento  $A_{11}$ , nustatytos vidutinės pagrindinio metalo  $A_{11/PM} = -2,892$  ir siūlės metalo  $A_{11/SZ} = -3,394$  koeficiento reikšmės. Iš šių reikšmių pagal 3.3 formulę nustatytos *PM* ir *SZ* sričių akustinio tamprumo konstantos.

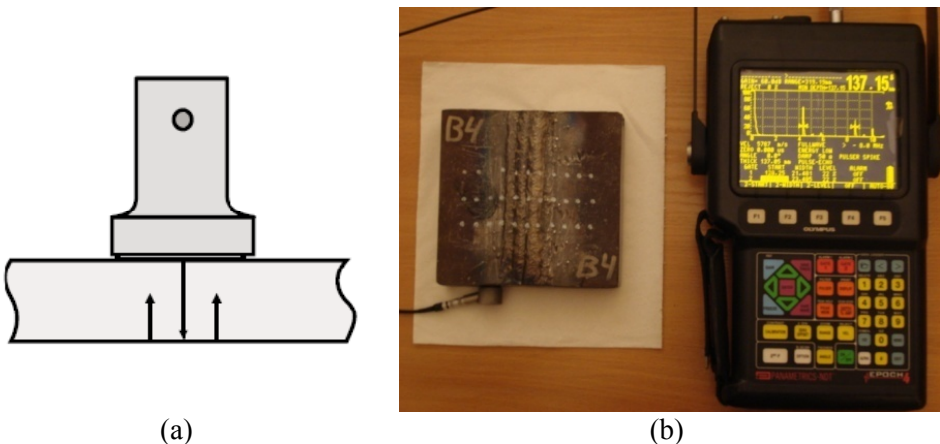
$$K_{11} = \frac{A_{11}}{E}. \quad (3.3)$$

Ekspperimentinių bandinių liekamųjų suvirinimo įtempių skaičiavimui buvo naudojamos tyrimo metu nustatytos siūlės ir pagrindinio metalo akustinio tamprumo konstantos:

- pagrindiniam metalui  $K_{11} = -1,377 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ ;
- suvirinimo siūlės metalui  $K_{11} = -1,616 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ .

### 3.2.2. Ultragarso bangos sklidimo greičio bandinyje tyrimai

Išilginiai liekamieji įtempiai bandinyje buvo išmatuoti tiesaus spindulio ultragaršiniu keitikliu. Akustinė banga, sklisdama per gaminį, susilpnėja, todėl keičiasi jos sklidimo greitis. Bangos sklidimo laikui bandinyje nustatyti reikia žinoti tikslų bangos sklidimo kelią arba, kitaip tariant, bandinio storį matavimo taške. Tuo tikslu buvo panaudotas elektroerozinis pjovimo metodas (*Accutex AU-300iA*), užtikrinantis tikslų pjovimą (iki  $0,01\text{ mm}$ ) ir nesukeliantis papildomų įtempių ar esamų įtempių sumažinimo. Elektroeroziniu pjovimo būdu buvo nupjautos minimalaus storio plokštelės (iki  $2\text{ mm}$ ) nuo dviejų bandinio galų (statmenų suvirinimo ašiai). Tokiu būdu buvo pasiektas tinkamas bandinio matavimo paviršiaus lygumas. Po pjovimo, elektroniniu slankmačiu buvo išmatuotas metalo storis  $l$  ties kiekvienu matavimo tašku. Remiantis šiuo storio parametru, kiekviename matavimo taške nustatytas ultragarso bangos sklidimo greitis ir atitinkamai apskaičiuotas sugaištas laikas  $t$  (*B priedas*), t. y. bangos sklidimo kelias  $l$  ( $m$ ) dalinamas iš bangos sklidimo greičio  $V$  ( $m/s$ ), taip išreiškiamas laikas  $t$  ( $s$ ), kurį banga sugaišta pereidama per bandinį matavimo taške. Ultragarso sklidimo greitis bandiniuose nustatytas naudojant tiesaus spindulio zondą *KRAUTKRAMER MB4F-E* ir *OLYMPUS EPOCH-4* defektoskopą (3.15 pav.).



**3.15 pav.** Liekamųjų suvirinimo įtempių matavimo schema naudojant UT metodą:

a) tiesaus spindulio keitiklis; b) defektoskopas ir bandinys

**Fig. 3.15.** Scheme of residual stresses measurement by UT method:

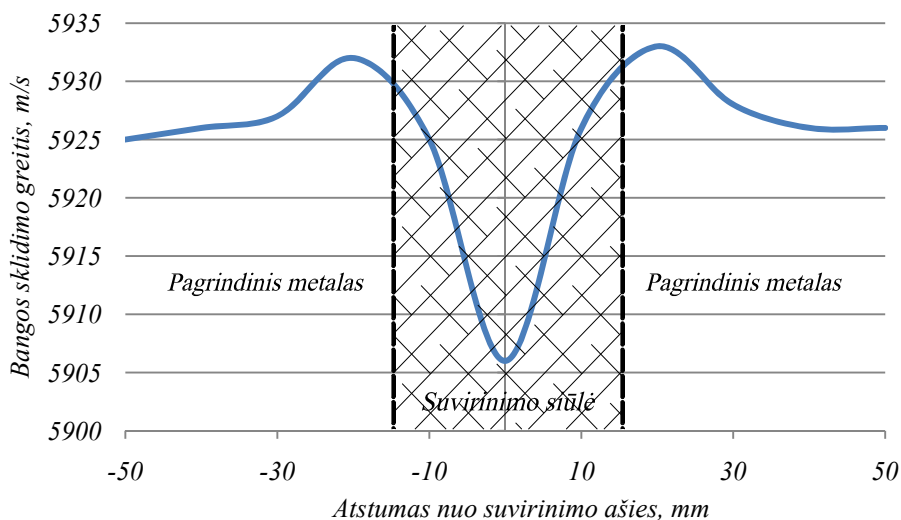
a) straight beam probe; b) ultrasonic flaw detector and specimen

Įvertinus sugaišto laiko pokytį  $\Delta t$  bei ankstesnio tyrimo metu nustatytas plieno *S355J2* suvirintos jungties akustinio tamprumo konstantas (3.2.1 skyrius), skaičiavimo programa *MS Office Excel* buvo apskaičiuoti išilginiai liekamieji įtempiai matavimo taškuose (3.4 formulė).

$$\sigma = -\frac{1}{K_{11}} \left( \frac{t - t_0}{t_0} \right), \quad (3.4)$$

čia  $\sigma$  – liekamieji suvirinimo įtempiai matavimo taške;  $K_{11}$  – akustinio tamprumo konstanta;  $t_0$  – išilginės bangos sklidimo laikas neįtemptame bandinyje;  $t$  – išilginės bangos sklidimo laikas matuojamame taške.

Ultragarso bangos sklidimo greičio pasiskirstymas *B1* serijos bandinyje pateiktas 3.16 paveiksle. Iš šios kreivės pastebimas simetriškas bangos greičio pasiskirstymas suvirinimo siūlės ašies atžvilgiu. Taip pat nustatyta, kad didėjant tempimo įtempiams mažėja bangos sklidimo greitis ir priešingai, jei liekamieji tempimo įtempiai mažėja arba tampa gniuždantys, tuomet bangos sklidimo greitis bandinio medžiagoje didėja.

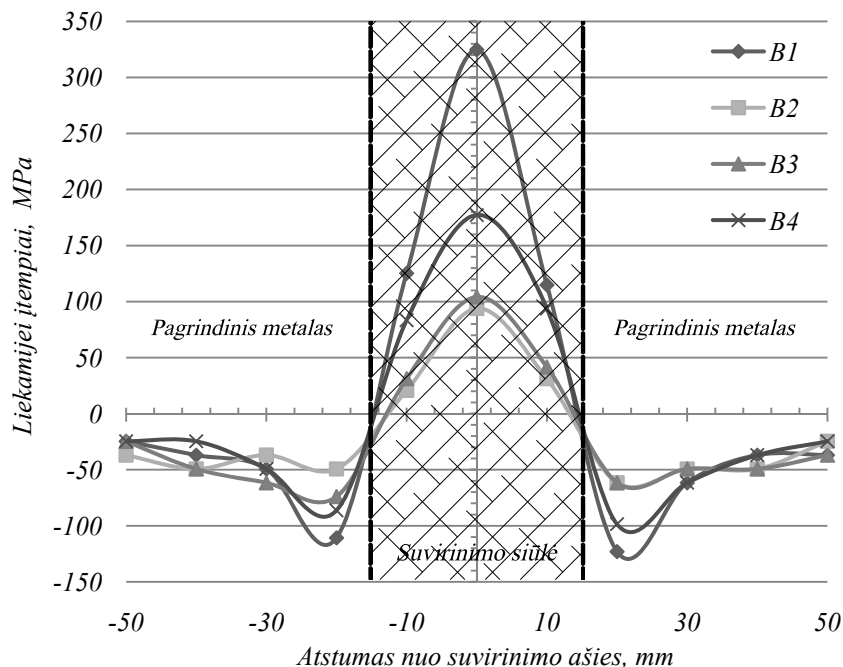


**3.16 pav.** Išilginės bangos greičio pasiskirstymas *B1* serijos bandinyje

**Fig. 3.16.** Velocity measurement of a longitudinal wave propagation on the test parts *B1*

*B1*, *B2*, *B3*, ir *B4* serijos bandinių matavimo taškų rezultatai pateikti *B.1* lentelėje (*B priedas*) bei grafiškai pavaizduoti 3.17 paveiksle. Rezultatų lentelėje dydis  $V_0$  išmatuotas naudojant plieno *S355J2* suvirintą bandinį, kurio liekamieji

įtempiai buvo artimi arba lygūs nuliui. Dydis  $t_0$  apskaičiuotas įvertinus bangos sklaidimo greitį  $V_0$  bandinyje (be įtempių) ir bangos sklaidimo kelią  $l$  ties matavimo tašku bandinyje, kurio įtempiai nežinomi.



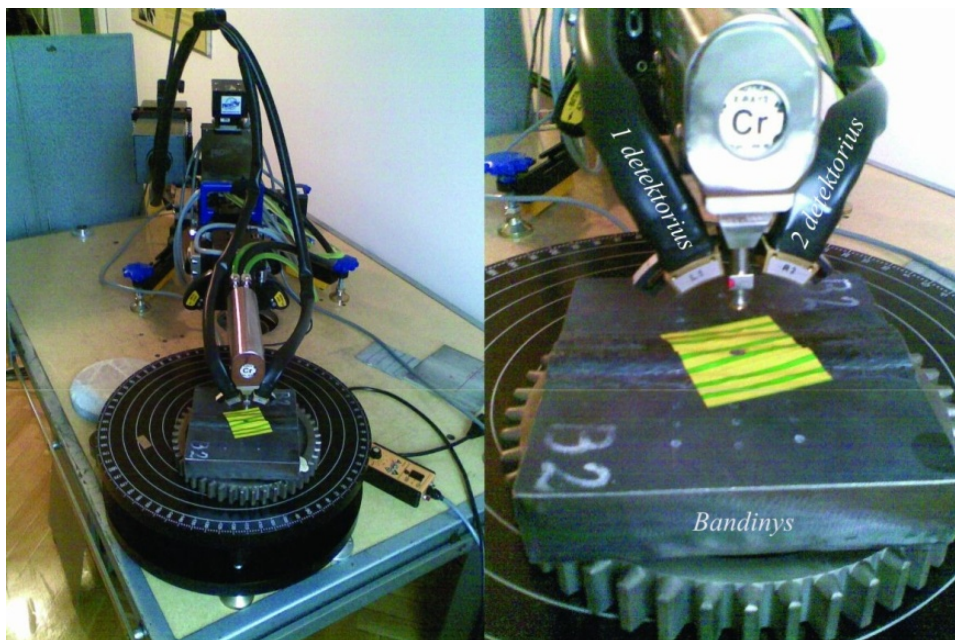
**3.17 pav.** Išilginių liekamųjų įtempių pasiskirstymas bandiniuose  
**Fig. 3.17.** Distribution of longitudinal residual stresses in specimens

Ultragarso bangos sklaidimo greičio analizė parodė (3.17 pav.), kad maksimalūs tempimo įtempiai  $324 \text{ MPa}$  buvo B1 serijos bandinyje ties suvirinimo siūlės centru. Tos pačios serijos bandinio didžiausi gniuždymo įtempiai siekė  $123 \text{ MPa}$ . B3 serijos bandinių rezultatai rodo, kad išilginiai liekamieji įtempiai po VSR suvirinimo metu, lyginant su B1 serijos bandinių maksimaliais įtempiais, buvo sumažinti apie 65 %. B4 serijos bandinių įtempių pikai vidutiniškai sumažėjo apie 47 % kai VSR apdorojimas bandiniams buvo atliktas po suvirinimo. Terminis apdorojimas B2 serijos bandinių liekamuosius įtempius sumažino apie 71 %, lyginat su B1 serijos bandinių maksimaliais liekamaisiais įtempiais. Pastebėta, kad ties terminio poveikio zona visų bandinių liekamieji įtempiai buvo artimi arba lygūs nuliui.

Šio metodo praktinis taikymas konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštėlėje nėra sudėtingas, todėl buvo sudarytas liekamųjų įtempių matavimo ultragarsu algoritmas (C priedas).

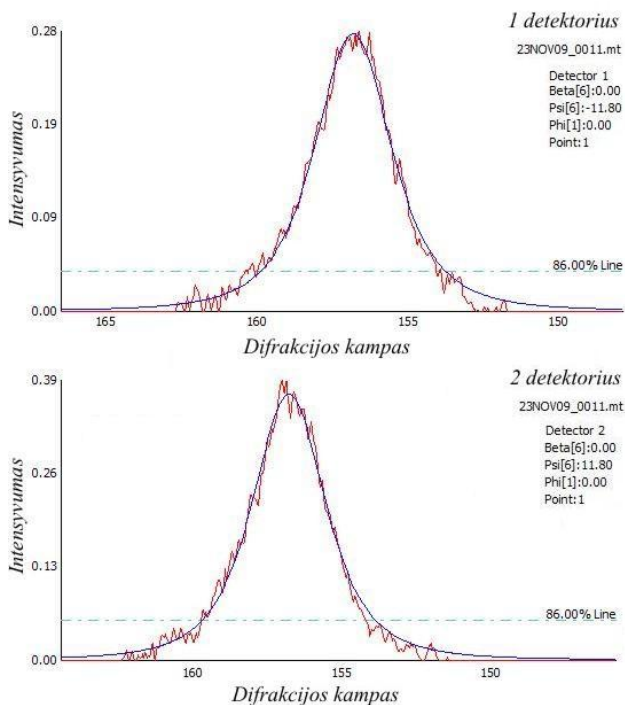
### 3.3. Rentgeno spindulių difrakcijos analizė

Liekamųjų suvirinimo įtempių matavimai atlikti *Lengvųjų lydinų tyrimų centre OML (Skavina, Lenkija)*, mobiliu rentgeno spindulių difraktometru *PROTO-iXRD*. Šiuo įrenginiu išmatuoti išilginiai liekamieji suvirinimo įtempiai bandinio paviršiuje, pagal 2.4 skyriuje pateiktą matavimo schemą (2.8 pav.). Matavimo proceso metu, 20 kV įtampos ir 4 mA srovės sukurtas rentgeno spindulių srautas sklido pro kolimatorių, kuris formavo 1 mm skersmens matavimo tašką bandinio paviršiuje. Koncentruotas jonizuojančių spindulių srautas difragavo 50–100  $\mu\text{m}$  paviršiaus gylyje. Difrakcijos kampo matavimai atlikti dviem detektoriais vienu metu (3.18 pav.). Difrakcijos pikai, priklausomai nuo kampo  $2\theta$  padėties, pateikti 3.19 paveiksle.

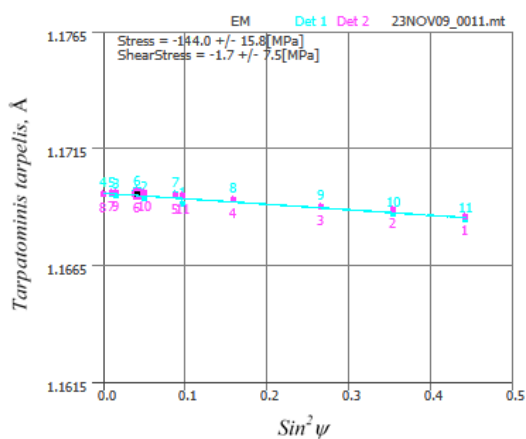


**3.18 pav.** Liekamųjų įtempių matavimas rentgeno difrakcijos metodu  
**Fig. 3.18.** Residual stresses measurement using X-Ray diffraction method

Suvirinto *B1* serijos bandinio trečio matavimo taško (nutolusio nuo suvirinimo siūlės ašies per 20 mm) liekamieji išilginiai įtempiai siekia  $-144 \pm 16 \text{ MPa}$ . Šis įtempių dydis nustatytas keičiant detektoriaus posvyrio kampą  $\beta$  vienuolika kartų, nuo  $30^\circ$  iki  $-30^\circ$ . Tokiu būdu mažėja matavimo paklaida, tačiau pailgėja tyrimo laikas, t. y. vieno taško liekamųjų įtempių analizė trunka apie 25 minutes.



**3.19 pav.** Difrakcijos pikai pirmame ir antrame detektoriuose  
**Fig. 3.19.** Diffraction picks of the first and the second detectors



**3.20 pav.**  $\sin^2 \psi$  ir tarpatominio tarpelio priklausomybė  
**Fig. 3.20.** Dependence of  $\sin^2 \psi$  and d-spacing

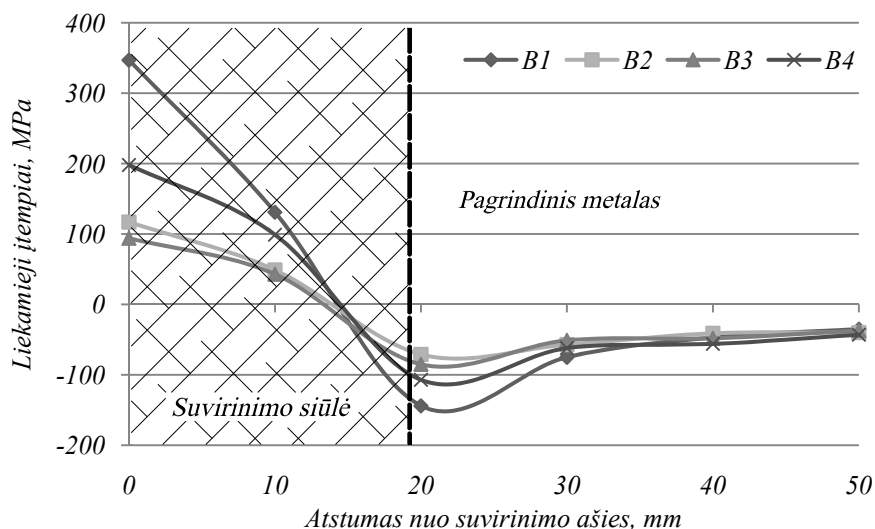
E.1 lentelėje (*E priedas*) pateikti *B1* serijos bandinio trečio matavimo taško analizės duomenys, kai kiekvienas detektorius atliko po 11 tarpatominio tarpelio  $d$  matavimų, iš kurių buvo nustatyta tarpatominių plokštumų deformacija  $\varepsilon$ . Taikant programinę įrangą *XRDWin-2.0*, *Brago* dėsnį (1.6 formulė) bei 2.4.3 skyriuje aprašytą įtempimų analizės metodiką, apskaičiuoti galutiniai tiriamo taško išilginiai liekamieji įtempiai.

Tarpatominio tarpelio ir  $\sin^2 \psi$  priklausomybės tiesė pateikta 3.20 paveiksle. Tiesės posvyris rodo liekamųjų įtempių kryptį, t. y. jei tiesė leidžiasi iš kairės į dešinę, tuomet įtempiai yra gniuždymo (neigiami), jei atvirkščiai – tempimo (teigiami) įtempiai. Jei priklausomybės tiesė yra lygiagreti  $\sin^2 \psi$  ašiai, tuomet tarpatominio tarpelio pokytis teorinio tarpelio  $d_0$  atžvilgiu yra lygus 0 ir liekamieji įtempiai matavimo taške yra lygūs 0.

Prieš matavimą buvo atliktas kiekvieno taško elektropoliravimas, kurio metu buvo pašalinti gamybos proceso metu susidarę paviršiniai nelygumai bei liekamieji gniuždymo įtempiai (dėl metalo valymo smėlio srove, vieliniu šepetėliu bei šlifavimo disku).

**Bandinių matavimo rezultatai.** Rentgeno difrakcijos metodu buvo išmatuoti įtempiai *B1*, *B2*, *B3* ir *B4* serijos suvirintuose bandiniuose. Dėl simetriško liekamųjų įtempių pasiskirstymo bandinyje, matavimai atlikti nuo suvirinimo ašies tik į vieną pusę. Kiekvienas bandinys buvo išmatuotas šešiuose taškuose. Pirmi du taškai išmatuoti ties suvirinimo siūle, trečias matavimo taškas – ties terminio poveikio zona ir kiti trys taškai – pagrindiniame metalė. Matavimo rezultatai pateikti 3.21 paveiksle. Vidutinė matavimo paklaida siekė  $\pm 14,7$  MPa.

Rentgeno spindulių difrakcijos analizė parodė, kad po suvirinimo *B1* serijos bandinių paviršiuje maksimalūs tempimo liekamieji įtempiai siekė 347 MPa. *B3* serijos bandiniuose, kurių suvirinimo metu buvo taikoma vibracija, maksimalūs liekamieji įtempiai ties suvirinimo siūlės centru siekė 94 MPa. Lyginant *B3* su *B1* serijos bandinių tyrimo rezultatais galime teigti, kad suvirinimo metu panaudotas vibracinis apdorojimas sumažino liekamųjų suvirinimo įtempių piką daugiau negu 3,5 karto, taigi, suvirintos konstrukcijos atžvilgiu tai yra labai naudingas įtempių pokytis. *B4* serijos bandinių maksimalūs liekamieji įtempiai, ties suvirinimo siūlės centru, dėl po suvirinimo atlikto vibracinio apdorojimo, nukrito iki 198 MPa. Tai ženklus pokytis lyginant su maksimaliais *B1* serijos bandinių įtempiais. Po terminio apdorojimo *B2* serijos bandinių liekamieji įtempiai nebuvo patys mažiausi. Maksimalūs liekamieji įtempiai ties suvirinimo siūlės viduriu siekė 117 MPa.

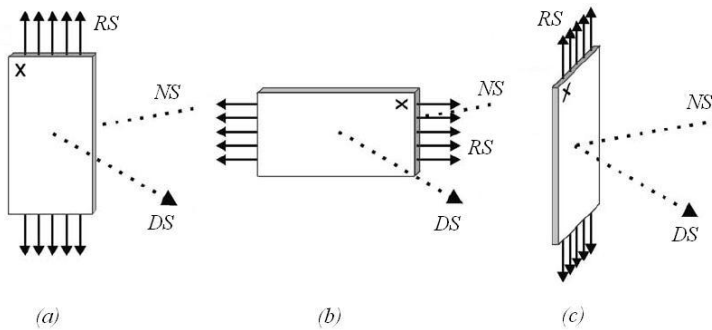


**3.21 pav.** Išilginių liekamųjų įtėmpių pasiskirstymas bandiniuose  
**Fig. 3.21.** Distribution of longitudinal residual stresses in the specimens

### 3.4. Neutronų difrakcijos tyrimai

Bandinių liekamųjų įtėmpių matavimai neutronų difrakcijos metodu, atlikti Lenkijos atominės energijos institute *POLATOM*. Tyrimams panaudotas reaktoriaus *MARIA DH-5* skleidžiamas horizontalus terminis neutronų spindulių pluoštas *H-5* bei *HB5* dviašis difraktometras su dviem fiksuotais kintamo kampo monochromatoriais. Tyrimo metu buvo naudojama standartinė pozicija su  $Fe \{211\}$  monochromatoriumi ir  $2\theta_M = 76^\circ$ . Toks nustatymas leido sukurti monochromatinę neutronų bangą, kurios ilgis  $\lambda = 0,9 \text{ nm}$ . Ši banga sklido per  $5 \text{ mm}$  skersmens kolimatorių, kuris formavo  $5 \text{ mm}$  skersmens tyrimo tašką bandinio tūryje. Tiriamų liekamųjų įtėmpių gylis bandinyje siekė  $5\text{--}8 \text{ mm}$ .

Difrakcijos pikai išgauti naudojant daigafunkcinį detektorių, pasuktą  $3^\circ$  kampu. Piko išsisklaidymo kampas  $2\theta$  buvo nustatytas atlikus kalibravimo procedūrą, kurios metu kampas  $\theta$  buvo panaudotas deformacijos įvertinimui ir išreiškiamas kaip tarpatominis tarpelis  $d$ . Kiekvieno matavimo taško deformacija, priklausomai nuo įtėmpių  $RS$ , neutronų srauto  $NS$  bei difragavusio srauto  $DS$  krypties, buvo išmatuota trimis kryptimis (3.22 pav.). Deformacijos dydis matavimo taške išreikštas pagal 3.5 formulę.



**3.22 pav.** Įtėmpių matavimo padėties: skersinės  $\varepsilon_s$  (a), išilginės  $\varepsilon_i$  (b) ir normalinės  $\varepsilon_n$  (c) deformacijos

**Fig. 3.22.** The three different orientations used to determine transverse strain  $\varepsilon_s$  (a), axial strain  $\varepsilon_i$  (b) and normal strain  $\varepsilon_n$  (c)

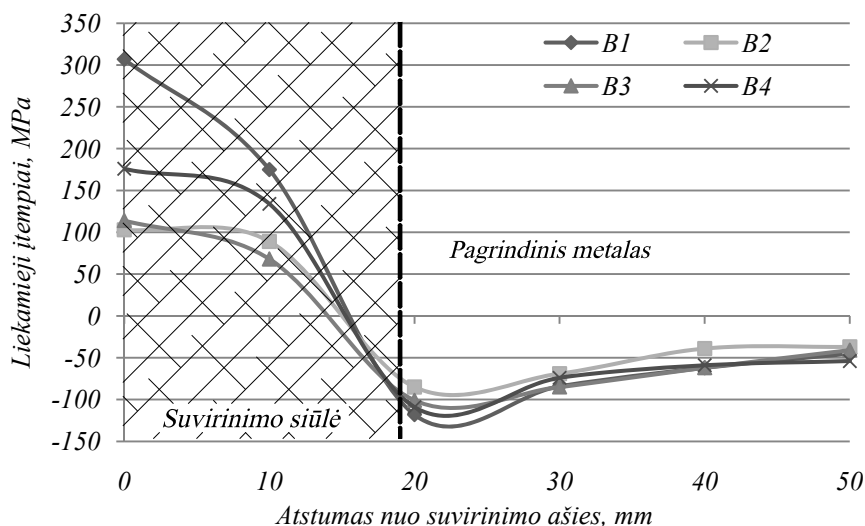
Įvertinus kiekviename taške išmatuotas trijų krypčių deformacijas ( $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_n$ ) bei pritaikius *Huko* dėsnį, buvo apskaičiuoti išilginiai liekamieji suvirinimo įtempiai bandiniuose (3.5 formulė).

$$\sigma_i = \frac{E}{1 + \nu} \left[ \varepsilon_i + \frac{\nu}{1 - 2\nu} (\varepsilon_i + \varepsilon_s + \varepsilon_n) \right], \quad (3.5)$$

čia  $E$  – medžiagos tamprumo modulis;  $\nu$  – *Puasono* koeficientas;  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_s$  ir  $\varepsilon_n$  – išilginė, skersinė bei normalinė deformacija matavimo taške.

Išilginiai liekamieji suvirinimo įtempiai, taikant neutronų difrakcijos metodą, buvo išmatuoti *B1*, *B2*, *B3* ir *B4* serijos bandiniuose. Įtėmpių matavimo linijos ir taškų išdėstymas atliktas pagal 2.4 skyriuje pateiktą schemą (2.8 pav.). Dėl simetriško įtėmpių pasiskirstymo bandinyje, matavimai atlikti tik šešiose vietose, t. y. nuo suvirinimo ašies tik į vieną pusę. Liekamųjų išilginių įtėmpių analizės rezultatai grafiškai pateikti 3.23 paveiksle. Vidutinė matavimo paklaida  $\pm 25 \text{ MPa}$ .

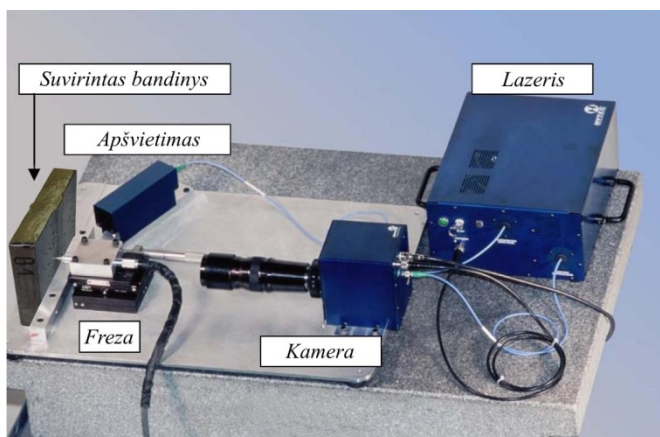
Neutronų difrakcijos analize nustatyta, kad liekamieji įtempiai metalo viduje labiausiai sumažėjo *B2* serijos bandiniuose ir siekė  $103 \text{ MPa}$ . *B3* serijos bandinių maksimalūs liekamieji įtempiai, dėl *VSR* suvirinimo metu, buvo  $114 \text{ MPa}$ . Iš pastarųjų rezultatų galime teigti, kad tiek klasikinis terminis apdorojimas tiek *VSR* suvirinimo metu, efektyviai mažino išilginius liekamuosius įtempius, t. y. įtempiai buvo sumažinti daugiau kaip 60 % lyginant su maksimaliais *B1* serijos bandinių įtempiais ( $307 \text{ MPa}$ ). Vibracinis poveikis *B5* serijos bandinių maksimalius liekamuosius įtempius sumažino iki  $176 \text{ MPa}$ , tai yra apie 43 % mažiau nei *B1* serijos bandinių maksimalūs įtempiai.



**3.23 pav.** Išilginių liekamųjų įtempių pasiskirstymas bandiniuose  
**Fig. 3.23.** Distribution of longitudinal residual stresses in the specimens

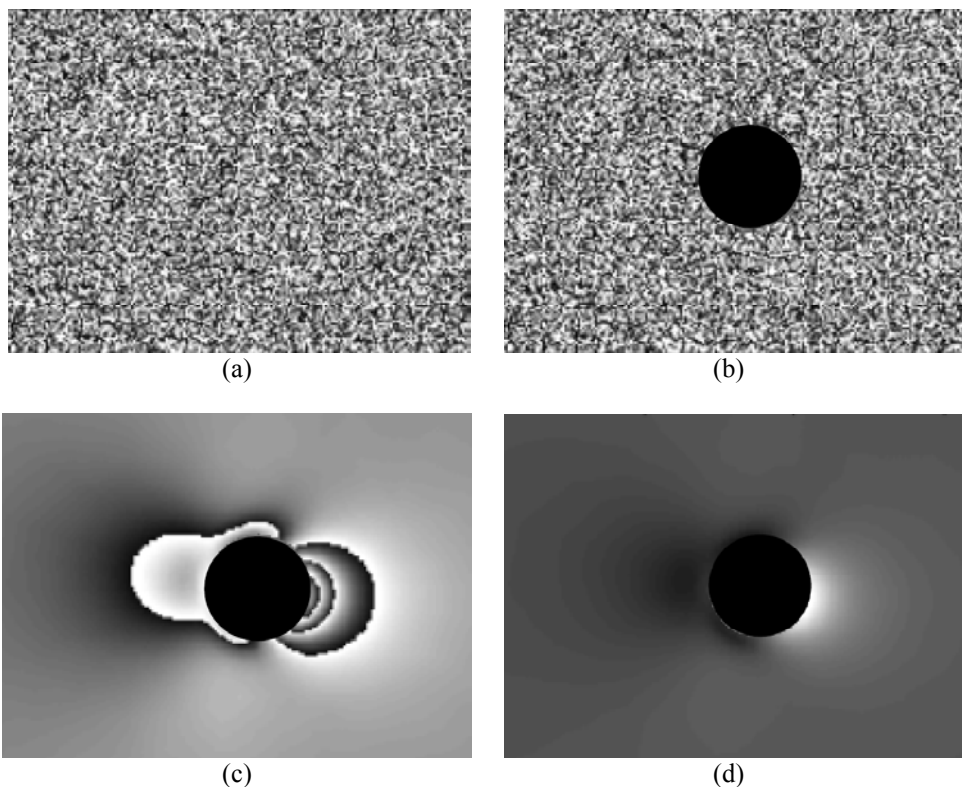
### 3.5. Skylės gręžimo metodo tyrimai

Tyrimai atlikti kombinuotu liekamųjų įtempių matavimo stendu, kurį sudarė vieno dažnio  $20mW$  Nd:YAG lazerinis agregatas, apšvietimo galvutės, skaitmeninė kamera, frezavimo įrenginys bei kompiuteris (3.24 pav.).



**3.24 pav.** Liekamųjų įtempių matavimo stendas  
**Fig. 3.24.** Experimental setup of the residual stress measurement system

Statmenai į bandinio paviršių nukreipta skaitmeninė kamera fiksavo vaizdą  $25\text{--}30\text{ mm}^2$  plote, kai šviesos srautas krito į bandinio paviršių apie  $25^\circ$  kampu. Skylės išgręžtos oru varoma turbina, kurios sukimosi greitis proceso metu siekė  $30,000\text{--}40,000\text{ aps/min}$ . Gręžimas atliktas  $1,6\text{ mm}$  skersmens grąžtu. Atstumas tarp gretimų matavimo taškų buvo  $8\text{--}9\text{ mm}$ , todėl gretimų skylių įtaka matavimo paklaidai buvo mažesnė kaip  $1\%$ . Gręžimo gylis, valdomas pusiau automatininiu būdu, svyravo  $0,8\text{--}1,2$  grąžto skersmens ribose.



**3.25 pav.** Skirtingų fazių atvaizdai: neapdoroti duomenys prieš gręžimą (a), po gręžimo (b), apskaičiuotų įtėmpių (c) ir poslinkio (d)

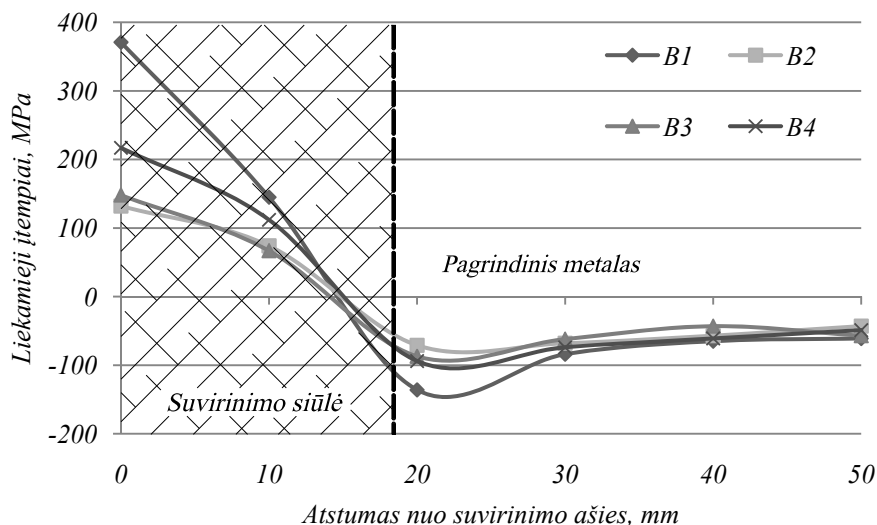
**Fig. 3.25.** Set of one pre-hole (a) and one post-hole (b) raw images and resulting phase (c) and displacement (d) maps

Skylės gręžimo metodu buvo išmatuoti įtėmpiai  $B1$ ,  $B2$ ,  $B3$  ir  $B4$  serijos suvirintuose bandiniuose. Dėl simetriško liekamųjų įtėmpių pasiskirstymo bandinyje, buvo matuotas įtėmpių pasiskirstymas nuo suvirinimo ašies tik į vieną pusę. Kiekvienas bandinys buvo išmatuotas šešiose vietose pagal 2.4 skyriuje

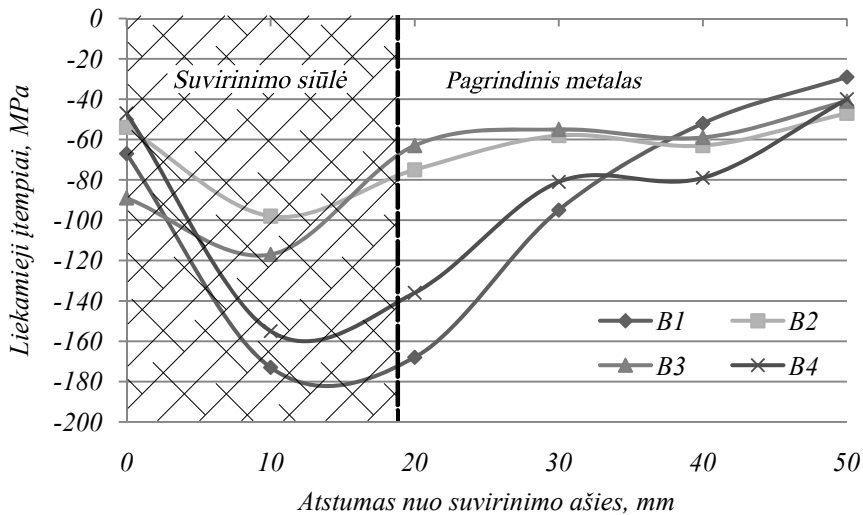
pateiktą matavimo schemą (2.8 pav.). Pirmi du taškai išmatuoti ties suvirinimo siūle, trečias matavimo taškas ties terminio poveikio zona ir kiti trys taškai – pagrindiniame metalė. Prieš gręžimą buvo atlikta kiekvieno matavimo taško fotografija, po gręžimo – antra fotografija.

B1 serijos bandinio liekamųjų įtėmpių piko, esančio ties suvirinimo siūlės ašimi, matavimo fotografijos pateiktos 3.25 paveiksle. Pirmoje (a) bei antroje (b) fotografijoje matyti bandinio paviršiaus neapdorotas vaizdas, t. y. prieš ir po skylės gręžimo atitinkamai. Juodas taškas fotografijų centre žymi išgręžtos skylės vietą. Trečioje fotografijoje (c) pateiktas skaičiavimo programos apskaičiuotas rezultatas, t. y. po skylės išgręžimo bandinio paviršiuje ties skylė įvykusi relaksacinė deformacija, kurią sukėlė liekamieji suvirinimo įtėmpiai  $\sigma_x = 371 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_y = -67 \text{ MPa}$  bei  $\tau_{xy} = 48,9 \text{ MPa}$ . Ketvirtoje (d) fotografijoje pateiktas to paties taško metalo poslinkis, įvykęs dėl įtėmpių pokyčio po skylės išgręžimo.

Kombinuoto metodo matavimo rezultato tikslumas priklauso nuo kameros matavimo kampo, apšvietimo kampo, gręžimo proceso, optinio iškraipymo bei tvirtinimo sistemos. Todėl skaičiuojant liekamuosius įtėmpius baigtiniais elementais, programa taiko klaidų ištaisymo koeficientą. Vidutinė išilginių ir skersinių liekamųjų įtėmpių matavimo paklaida atitinkamai buvo  $\pm 18,4 \text{ MPa}$  ir  $\pm 12,2 \text{ MPa}$ . B1, B2, B3 ir B4 serijos bandinių išilginių bei skersinių liekamųjų įtėmpių matavimo rezultatai grafiškai pateikti 3.26 ir 3.27 paveiksluose.



3.26 pav. Išilginių liekamųjų įtėmpių pasiskirstymas bandiniuose  
Fig. 3.26. Distribution of longitudinal residual stresses in the specimens



**3.27 pav.** Skersinių liekamųjų įtempių pasiskirstymas bandiniuose  
**Fig. 3.27.** Distribution of transversal residual stresses in the specimens

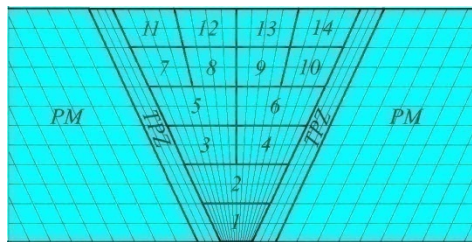
Kombinuoto *HD/DSPI* metodo išilginių įtempių matavimo analizė (3.26 pav.) parodė, kad po suvirinimo *B1* serijos bandinių paviršiuje maksimalūs išilginiai liekamieji įtempiai siekė  $371 \text{ MPa}$ . *B3* serijos bandinių, kurių suvirinimo metu buvo naudojamas vibracinis poveikis, maksimalūs liekamieji įtempiai, ties suvirinimo siūlės centru, buvo apie  $148 \text{ MPa}$ . Palyginus *B1* ir *B3* serijos bandinių tyrimo rezultatus, galime teigti, kad suvirinimo metu įvesta vibracijos energija sumažino liekamųjų suvirinimo įtempių piką apie 59 %. *B4* serijos bandinių maksimalūs liekamieji įtempiai suvirinimo siūlės centre, dėl vibracinio apdorojimo po suvirinimo, siekė  $217 \text{ MPa}$ . Tai yra reikšmingas pokytis lyginant su maksimaliais *B1* serijos bandinių įtempiais. Terminis apdorojimas *B2* serijos bandinių liekamuosius įtempius sumažino apie 64 %, lyginat su *B1* serijos bandinių maksimaliais liekamaisiais įtempiais. Skersinių įtempių analizė (3.27 pav.) parodė, kad vibracinis apdorojimas suvirinimo metu turi poveikį skersiniams liekamiesiems suvirinimo įtempiams. Maksimalūs liekamieji skersiniai įtempiai sumažėjo apie 63 %. Vibracinis apdorojimas po suvirinimo, skersinius liekamuosius įtempius sumažino apie 30 %. Terminis apdorojimas – apie 67 %.

### 3.6. Skaitinė liekamųjų įtempių analizė

Šiame skyriuje aprašyta skaitinio modelio kūrimo eiga, apkrovos, skaičiavimai bei rezultatai. Taikant dvimatį baigtinių elementų metodą, nustatytas suvirinimo temperatūros lauko bei liekamųjų įtempių paskirstymas bandinio pjūvyje.

**Modelio geometrija.** Tyrimas atliktas modeliuojant dviejų  $140 \times 70 \times 30$  mm plieno S355J2 plokštelių suvirinimą, kai jungties briaunų nusklembimas lygus  $25^\circ$  ir tarpelis tarp plokštelių 4 mm.

Tyrimo modelis buvo sudalintas į 1488 baigtinius elementus (3.28 pav.). Terminė ir mechaninė analizei atitinkamai panaudoti *PLANE55* bei *PLANE42* elementai. *PLANE55* – tai keturių mazgų elementai su vienu laisvės laipsniu bei temperatūra kiekviename mazge. *PLANE42* – keturių mazgų elementai su dviem laisvės laipsniais kiekviename mazge ( $x$  ir  $y$  kryptimis).



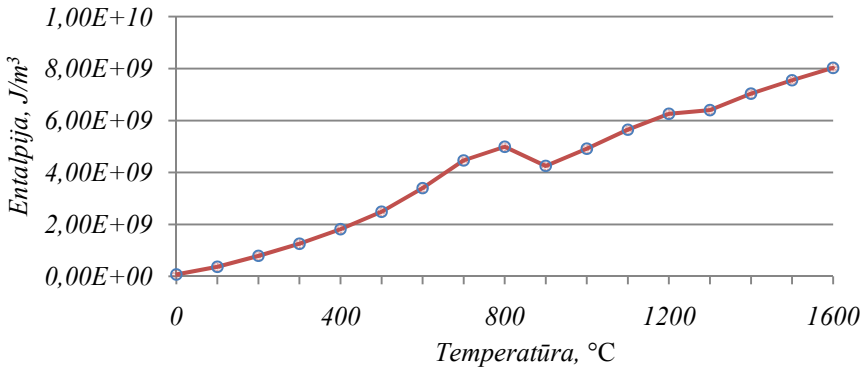
**3.28 pav.** 14 suvirinimo ėjimų turinčio bandinio simetrinis elementų išsidėstymas  
**Fig. 3.28.** The 14-weld passes in the symmetrical finite element mesh of the butt weld

Dėl aukšto temperatūros gradiento, suvirinimo siūlės sritis ir *TPZ* modelyje sudalinta į smulkesnius elementus. Daugiau kaip  $750^\circ\text{C}$  temperatūrą patiriančios *TPZ* plotis siekia 3 mm, o tai atitinka 3 elementus  $x$  ašies kryptimi (3.28 pav.).

**Terminė analizė** atlikta remiantis plieno S355J2 specifinio šilumos laidumo, terminio išsiplėtimo bei savitosios šilumos savybėmis, kurių priklausomybės nuo temperatūros grafiškai pateiktos 2.1 skyriuje (2.3 pav.). Terminės analizės metu įvertintas metalo fazinis pasikeitimas, t. y. atsižvelgiant į plieno S355J2 savitosios šilumos bei tankio pokytį keičiantis temperatūrai, apskaičiuota tiriamos medžiagos entalpija (3.6 formulė).

$$H = \int \rho c(T) dT. \quad (3.6)$$

Plieno *S355J2* entalpija yra tankio  $\rho$  ir savitosios šilumos  $c$  integralas temperatūros  $T$  atžvilgiu (formulė 3.6). Tiriamos medžiagos entalpija ( $J/m^3$ ), priklausomai nuo metalo temperatūrinės fazės, pateikta 3.29 paveiksle.



**3.29 pav.** Plieno *S355J2* entalpijos kreivė  
**Fig. 3.29.** Enthalpy graph of the *S355J2* steel

Terminę analizę sudarė 28 apkrovos žingsniai. *2D* modelyje kiekvienas suvirinimo ėjimas truko 1 sekundę, po kurios vyko 99 sekundžių trukmės aušimas (laikas skirtas pasiruošti kitam suvirinimo ėjimui) ir toliau sekantis suvirinimo ėjimas. Tokia tvarka sekė iki paskutinio 14 ėjimo, kurį užbaigus bandinys vėso iki aplinkos temperatūros. Visas suvirinimo/aušinimo modeliavimo ciklas truko 1399 sekundes.

Terminei kiekvieno žingsnio laiko analizei buvo panaudotas pilnas *Niutono-Raphsono* analizės metodas. Skaičiavimas atliktas naudojant *Jacobin Conjugate Gradient* skaičiavimo lygtis. Analizės metu buvo taikomas kombinuotas bandinio paviršiaus spinduliavimo ir konvekcijos koeficientas  $15 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , kai mažanglio plieno paviršiaus šilumos išsiskyrimas lygus 0,8 (*Sathiya* 2009).

Šilumos įvedimo dydis  $Q$ , šilumos srautas  $q$ , medžiagos specifinis terminis laidumas  $k$  bei savitoji šiluma  $c$  yra lemiantys trumpalaikės dalinio diferencijavimo lygties nariai suvirinimo metu. Tai išreikšta termine pusiausvyros lygtimi (*Robert* 2004):

$$qc \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, z, t) = -\bar{v}q(x, y, z, t) + Q(x, y, z, t). \quad (3.7)$$

Visuose suvirinimo procesuose šilumos šaltinis, suteikdamas reikiamą energiją, sukuria vietinę aukštos temperatūros dėmę. Modeliuojant suvirinimo lanko

kaitinimo efektą suvirinimo metu, lygiavertis šilumos įvedimas buvo paviršiaus šilumos srautas (*Vakili-Tahami 2009*). Šilumos įvedimas išreiškiamas taip:

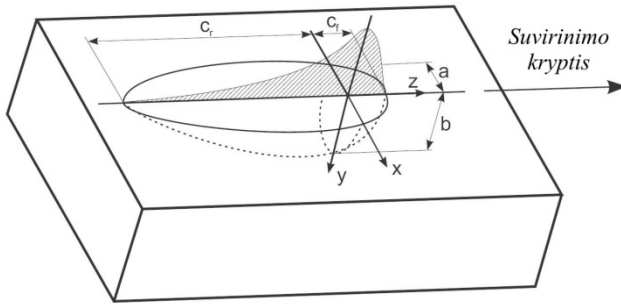
$$Q = \eta UI, \quad (3.8)$$

čia  $Q$  – šilumos energija paviršiuje,  $\eta$  – šilumos panaudojimo efektyvumas,  $U$  – suvirinimo įtampa ( $V$ ),  $I$  – suvirinimo srovė ( $A$ ).

Dydis  $Q$  gali būti pritaikytas tiksliam sulydymo zonos modeliavimui, tačiau disertacijoje aprašyti bandymai atlikti tik per paviršinį šilumos įvedimą. Pusiau automatinio suvirinimo metodo šilumos efektyvumas lygus 0,9. Paviršiaus šilumos srautas  $q_p$  išreiškiamas naudojant *Gauso* suvirinimo šilumos pasiskirstymo modelį (3.30 pav.):

$$q_p = \frac{3Q}{\pi ac} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), \quad (3.9)$$

čia  $a$  ir  $c$  – elipsoido pusašiai  $x$  ir  $z$  ašių kryptimis (3.30 pav.).



**3.30 pav.** *Gauso* elipsoidinio modelio eskizas  
**Fig. 3.30.** The sketch of Gaussian ellipsoid model

*Sabapathy et al.* (*Vakili-Tahami 2009*) modifikavo *Gauso* šilumos įvedimo lygtį pakeisdamas kelias eksponentines sąlygas. Disertacijos terminio modeliavimo tyrime šilumos įvedimas atliktas per paviršių, kai šilumos srautas išreiškiamas *Sabapathy et al.* modifikuota formule:

$$q_p = \frac{\sqrt{3}Q}{ac\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right), \quad (3.10)$$

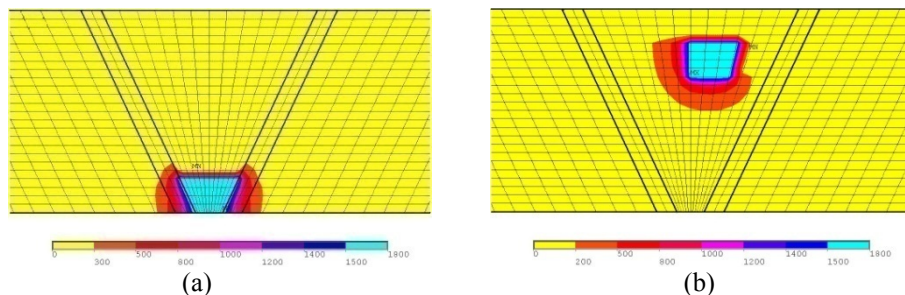
čia  $a$  ir  $c$  – pusė izotermės ilgio ir pločio atitinkamai (3.30 pav.),  $z$  – šilumos įvedimo koordinatė išreiškiama  $z = v(\tau - t)$ , kai  $v$  – suvirinimo greitis,  $\tau$  – kaitinimo šaltinio vėlavimo (atsilikimo) faktorius nuo pradinio laiko ( $t = 0$ ).

**3.2 lentelė.** Kiekvieno suvirinimo ėjimo įvedamas šilumos srautas

**Table 3.2.** Value of heat flux of each weld

| Ėjimas | Suvirinimo |             |                 | Paviršiaus plotas, $mm^2$ | Šilumos srautas $q_p, W/mm^2$ |
|--------|------------|-------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------|
|        | srovė, $A$ | įtampa, $V$ | greitis, $mm/s$ |                           |                               |
| 1      | 215        | 21          | 2,8             | 24,4                      | 166                           |
| 2      | 245        | 22          | 2,8             | 37,3                      | 130                           |
| 3-4    | 245        | 22          | 2,8             | 25,2                      | 193                           |
| 5-6    | 245        | 22          | 2,8             | 37,3                      | 130                           |
| 7-10   | 245        | 22          | 2,8             | 19,1                      | 254                           |
| 11-14  | 245        | 22          | 2,8             | 22,4                      | 217                           |

Suvirinimo modelio šilumos įvedimo sąlygos analogiškos kaip eksperimentinio *BI* serijos bandinio. Suvirinimo srovė, įtampa, greitis, geometriniai parametrai bei apskaičiuotas šilumos srautas pateikti 3.2 lentelėje.



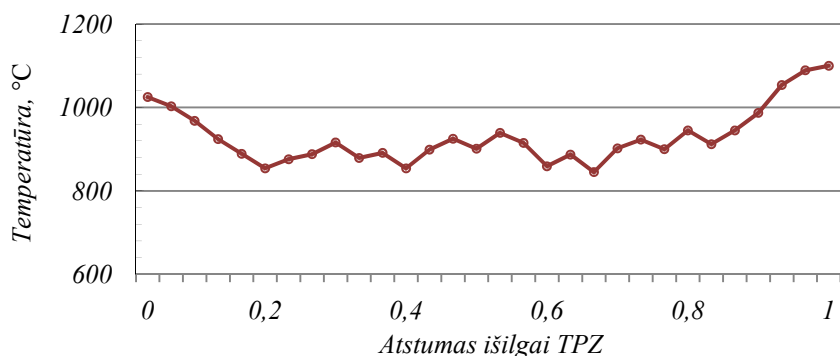
**3.31 pav.** 1 (a) ir 9 (b) suvirinimo ėjimo temperatūros pasiskirstymas pjūvyje, kai skaičiavimui naudojama „birth and death“ elementų aktyvavimo technologija

**Fig. 3.31.** Temperature counters for laying of the 1<sup>th</sup> and 9<sup>th</sup> weld pass (a and b respectively) then using “birth and death” elements activation technique

Pridėtinio metalo atsiradimo įvertinimui, modeliavimo metu buvo panaudota elementų „birth and death“ technologija (3.31 pav.). Paskutinių trylikos ėjimų elementai buvo „išjungti“ naudojant funkciją „EKILL,ALL“. Užbaigus pirmą suvirinimo ėjimą, buvo aktyvuojami antro suvirinimo ėjimo elementai ir tokiu

būdu užpildyta visa suvirinimo siūlė. Trumpalaikis elementų „išjungimas“ nėra elementų ištrynimasis, todėl po kurio laiko aktyvavus elementus, visiškai grįžta jų pradinės reikšmės: stipris, masė, elementų apkrovos ir t. t. Pritaikius šią technologiją, buvo supaprastintas suvirinimo terminės analizės modelis bei sumažėjo modeliavimo veiksmų skaičius.

Pirmas baigtinių elementų analizės rezultatas – temperatūros kontūrai ir jos pasiskirstymas. Buvo išnagrinėti kiekvieno suvirinimo ėjimo ir laiko žingsnio temperatūriniai kontūrai, esant maksimaliai temperatūrai. Temperatūros kontūrai parodė kokią maksimalią temperatūrą patyrė sulydymo ir terminio poveikio zonos, suvirinimo modeliavimo metu. 3.31 paveiksle pateikti 1 ir 9 suvirinimo ėjimo temperatūros kontūrai. Temperatūra mažoanglio plieno terminio poveikio zonoje svyruoja tarp 750–1450 °C (*Radaj 2003*).



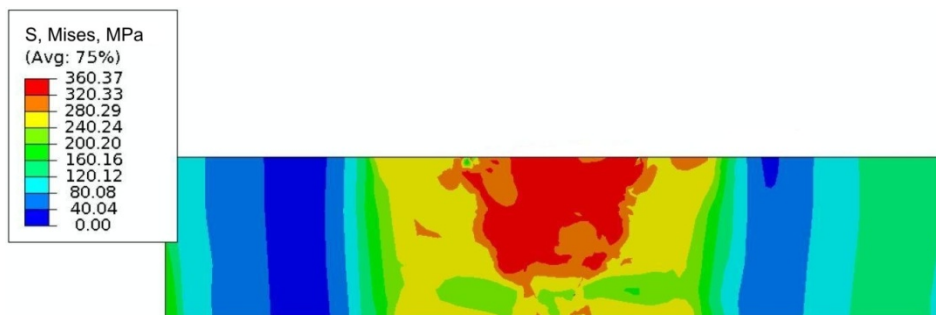
**3.32 pav.** Temperatūros pikai išilgai *TPZ* linijos, esančios tarp apatinio ir viršutinio bandinio paviršių

**Fig. 3.32.** Peak temperatures along the *HAZ* line against normalized distance measured from the lower to the upper surface

Labai svarbu yra patikrinti ar modelio temperatūros duomenys atitinka realią terminę elgseną bandinyje. Taigi kiekvienas suvirinimo ėjimas, turintis sąlyčio ryšį su *TPZ*, buvo patikrintas išanalizavus iš skirtingų mazginių taškų (*angl. nodal points*) sudarytus temperatūros kontūrus bei kreives. Pikiniai *TPZ* temperatūros taškai modelyje svyravo tarp 800–1150 °C, kaip teigia *Radaj (2003)*. Temperatūros pikai išilgai *TPZ* linijos, esančios tarp bandinio apatinio ir viršutinio paviršių, pateikti 3.32 paveiksle.

**Mechaninė analizė.** Po terminės analizės, modelio terminiai elementai buvo pakeisti struktūriniais. Mechaninei analizei papildomai buvo įvertintos plieno tamprumo modulio, takumo įtempių bei *Puasono* koeficiento priklausomybės nuo temperatūros. Kambario temperatūros plieno *S355J2* takumo įtempiai siekė

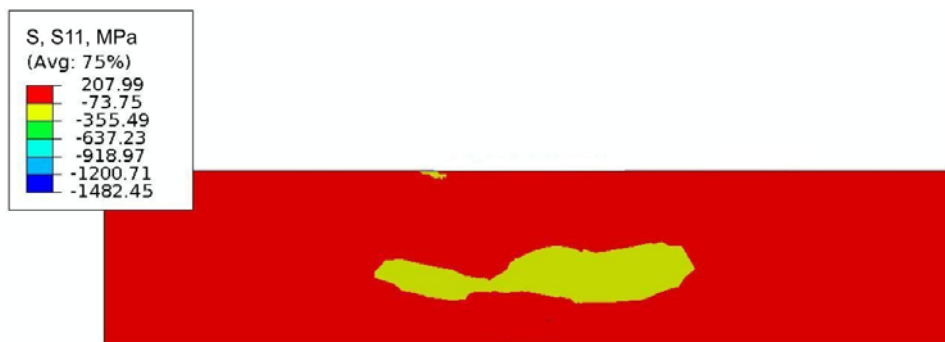
437 MPa. Mechaninei įtėmpių analizei, kaip ir termininei analizei, visi suvirinimo ėjimai buvo įvertinti atskirai. Tyrimo metu nustatyti *von-Mises* liekamieji įtėmpiai (3.33 pav.), skersiniai liekamieji įtėmpiai (3.34 pav.) bei deformacijos pasiskirstymas suvirinto bandinio pjūvyje (3.35 pav.).



**3.33 pav.** *Von Mises* įtėmpių pasiskirstymas

**Fig. 3.33.** Distribution of *von Mises* stresses

Išilginių liekamųjų suvirinimo įtėmpių pasiskirstymas, suvirintos jungties skersiniame pjūvyje, pateiktas 3.33 paveiksle. Matavimo vienetai – megapaskaliai (MPa). *Von Mises* įtėmpiai yra lokalizuotai veikiamos apkrovos tendencingas kiekybinis matas. Galima palyginti tai, kaip suvirinimo proceso ir medžiagos parametrų funkciją, kiekybiniam struktūros stabilumo įvertinimui. Liekamųjų įtėmpių pikas pasiskirstęs viršutinėje suvirintos jungties pjūvio dalyje. Maksimalūs tempimo įtėmpiai jungties paviršiuje siekia 360 MPa. Suvirinimo išilginių liekamųjų įtėmpių modeliavimas patvirtino eksperimentinių matavimų rezultatus.

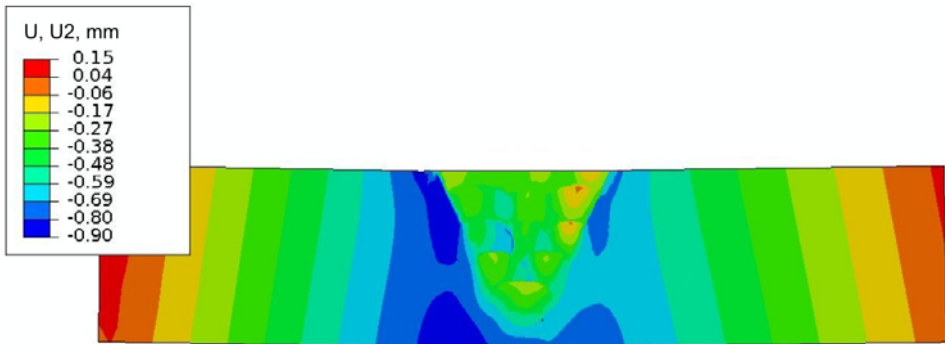


**3.34 pav.** Skersinių įtėmpių pasiskirstymas

**Fig. 3.34.** Distribution of transverse stresses

Tempimo įtempiai atsiranda ties suvirinimo siūlės viduriu, kur skersinis terminis susitraukimas yra slopinamas vėsesnio pagrindinio metalo, esančio toliau nuo suvirinimo siūlės. Dažnai suvirinimo siūlės viduryje esantys tempimo įtempiai sudaro pusiausvyrą su gniuždymo įtempiais. Po suvirinimo jungties susitraukimas yra prislopintas priverstiniu suvaržymu (sukabinimo siūlėmis), tuomet tempimo įtempiai tolygiai auga siūlėje kaip reakcijos įtempiai. Skersiniams liekamiesiems įtempiams  $\sigma_y$ , šis priverstinis suvaržymas turi nedidelį poveikį. Skersinių liekamųjų įtempių  $\sigma_y$  pasiskirstymas suvirinimo siūlės pjūvyje pateiktas 3.34 paveiksle.

*BEM* analizės nustatytą skersinių liekamųjų įtempių pasiskirstymą suvirintos jungties pjūvyje, patvirtino kombinuotu *HD/DSPI* metodu nustatytą skersinių liekamųjų įtempių pasiskirstymą, t. y. ties suvirinimo siūle, koncentruojasi gniuždantys skersiniai liekamieji įtempiai  $\sim 200 \text{ MPa}$ .



**3.35 pav.** Vertikalaus poslinkio pasiskirstymas

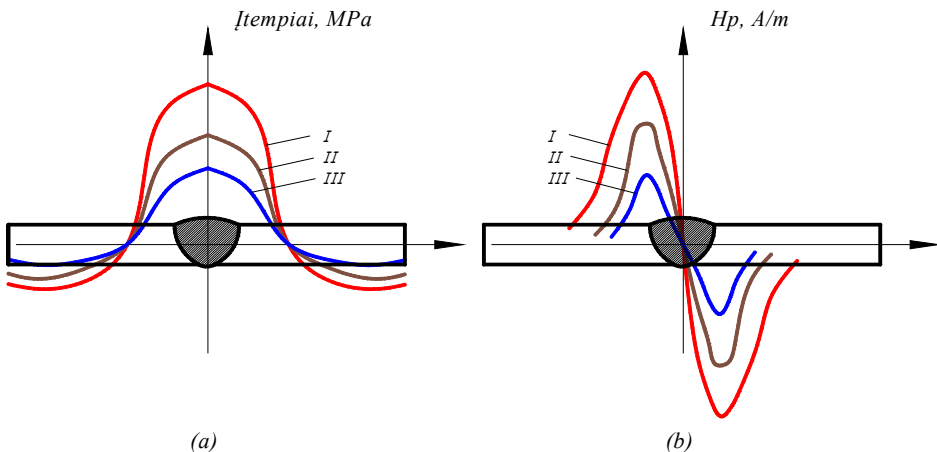
**Fig. 3.35.** Distribution of vertical displacements

Kai suvirintoje jungtyje skersinis susitraukimas nėra tolygus storio kryptimi, tokioje jungtyje susidaro kampinės deformacijos. Storasienės konstrukcijos suvirinimo jungties kampinis pokytis gali būti sumažintas tinkamai parinkus suvirinimo jungties briaunų paruošimą ir/arba tvirtinimo (sukabinimo) siūlių schemą. Tačiau, kaip rodo skaitinio tyrimo rezultatai, visiškai išvengti kampinės deformacijos jungtyje neįmanoma.

Suvirintos jungties poslinkis, vertikalės atžvilgiu, pateiktas 3.35 paveiksle. Maksimali modelio deformacija, terminio poveikio srityje, siekė  $0,9 \text{ mm}$ .

### 3.7. Trečiojo skyriaus išvados

1. Remiantis magnetinio parametro  $H_p$  pasiskirstymo suvirinimo jungtyje rezultatais, galime teigti, kad magnetinis parametras gali išreikšti liekamųjų įtėmpių koncentraciją staigiu magnetinio parametro krypties pokyčiu (3.36 pav.). Iš praktinio *MMM* metodo taikymo galime teigti, kad magnetinio lauko stiprio  $H_p$  pokytis konstrukcijoje, po *VSR* apdorojimo, įvyksta. Tyrimo rezultatai rodo, kad mažėjant įtėmpiams, mažėja ir magnetinio lauko stipris. Tačiau šiuo metodu sunku įvertinti liekamųjų suvirinimo įtėmpių reikšmę bei kryptį. Todėl metodo taikymas konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje yra ribotas, gautas įtėmpių koncentracijos pokytis nepatvirtina konkretaus *VSR* poveikio efektyvumo.



**3.36 pav.** Liekamųjų įtėmpių (a) ir magnetinio lauko stiprio  $H_p$  (b) pasiskirstymo sandūrinėje suvirinimo siūlėje priklausomybė

**Fig. 3.36.** Dependence between residual stresses (a) and magnetic field strength  $H_p$  (b) in butt weld

2. Ultragarsu paviršinės išilginės bangos sklaidimo greičio metodas (*PIB*) liekamiesiems įtėmpiams matuoti (iki 3 mm gylyje) yra praktiškas bei lengvai taikomas konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje. Tyrimo metu nustatytas konstrukcinio plieno akustinio tamprumo konstantas (pagrindiniam metalui  $-1,377 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ , suvirinimo siūlės metalui  $-1,616 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ ) galima taikyti tos pačios grupės plienų liekamųjų įtėmpių analizei ultragarsu. Ultragarso matavimo rezultatai koreliuoja su difrakcijos bei skylės gręžimo metodais gautu įtėmpių pasiskirstymu.

3. Rentgeno spindulių difrakcijos tyrimais nustatyta, kad vibracinis poveikis *suvirinimo metu* sumažino liekamųjų suvirinimo įtėmpių piką daugiau nei

3,5 karto. Taip pat nustatyta, kad vibracinis apdorojimas *po suvirinimo* sumažino liekamųjų įtempių piką bandinyje daugiau kaip 40 %. Matavimo gylis siekė 50–100  $\mu\text{m}$ .

4. Neutronų difrakcijos analize nustatyta, kad liekamieji įtempiai suvirintos jungties viduje (5–8 mm gylyje), po *VSR* taikymo suvirinimo metu, sumažėjo daugiau kaip 60 %. Vibracinis poveikis *po suvirinimo* maksimalius liekamuosius įtempius sumažino apie 43 %. Tyrimai parodė, kad tūriniai (5–8 mm gylyje) liekamieji suvirinimo įtempiai ~12 % mažesni negu įtempiai suvirintos jungties paviršiuje. Šiuo metodu neįmanoma atlikti įtempių matavimų konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje.

5. Kombinuotu *HD/DSPI* metodu atlikti tyrimai, parodė, kad maksimalūs liekamieji įtempiai (371 MPa) buvo didesni už minimalius plieno takumo ribos įtempius. Taip pat nustatyta, kad vibracinis poveikis *suvirinimo metu* sumažino liekamųjų suvirinimo įtempių piką daugiau kaip 2,5 karto. Vibracinis atleidimas *po suvirinimo* liekamųjų įtempių piką sumažino apie 42 %. Matavimo gylis siekė 1,5–2 mm. Laboratorijos sąlygomis ši matavimo technologija nėra sudėtinga.

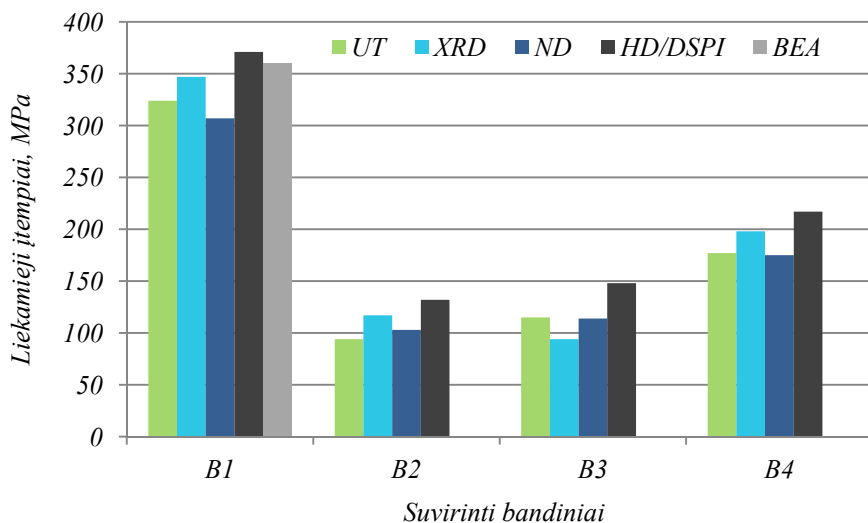
6. Skersinių įtempių analizė kombinuotu *HD/DSPI* metodu parodė, kad vibracinis poveikis teigiamai veikia skersinių įtempių mažinimą, t. y. vibracinis poveikis *suvirinimo metu* maksimalius liekamuosius skersinius įtempius sumažino apie 63 %. Vibracinis poveikis *po suvirinimo*, skersinius liekamuosius įtempius sumažino apie 30 %.

7. Skaitiniu būdu nustatytas liekamųjų įtempių pasiskirstymas bandinio pjūvyje koreliuoja su eksperimentinių metodų (*UT*, *XRD*, *ND*, *HD/DSPI*) gautais rezultatais. Maksimalūs tempimo įtempiai jungties paviršiuje siekė 360 MPa.

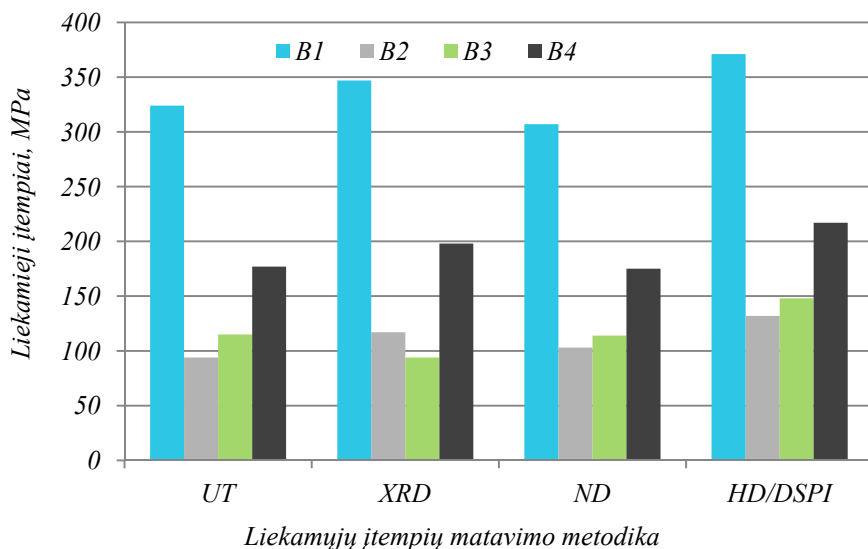
8. Nustatyta, kad vibracinis apdorojimas *suvirinimo metu*, efektyviai mažina suvirintos jungties liekamuosius įtempius iki lygio, pasiekiamo taikant terminį poveikį. Vertinant poveikį liekamiesiems įtempiams bei darbo ir energijos sąnaudas, galime teigti, kad *VSR* taikymas konstrukcinio plieno liekamiesiems suvirinimo įtempiams mažinti yra efektyvesnis negu terminis metodas.

9. Atsižvelgiant į liekamųjų suvirinimo įtempių pokyčio įvertinimo rezultatus, matavimo techniką bei įrangą, siūlomas liekamųjų įtempių matavimo metodas, kurį būtų galima taikyti konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje, yra ultragarsinis metodas. Sudaryta skirtingų matavimo metodikų praktinio taikymo, privalumų bei trūkumų palyginimo A.1 lentelė (*A priedas*).

10. Remiantis pikinių liekamųjų suvirinimo įtempių taškų palyginimu (3.37, 3.38 pav.), galime teigti, kad vibracinis atleidimas *suvirinimo metu* liekamuosius suvirinimo įtempius vidutiniškai sumažina 60 %, o vibracinis atleidimas *po suvirinimo* sumažina liekamuosius suvirinimo įtempius apie 40 %. To paties taško matavimo rezultatai nevienodi dėl skirtingo matavimo gylio.



**3.37 pav.** Liekamųjų įtęmpių pikas suvirintuose bandiniuose  
**Fig. 3.37.** Peak of residual stresses in welded specimens



**3.38 pav.** Liekamųjų įtęmpių pikas, nustatytas skirtingais metodais  
**Fig. 3.38.** Peak of residual stresses measured by different techniques



---

## Vibracijos poveikio mechaninėms ir technologinėms jungties savybėms tyrimai

Vienas iš tyrimo tikslų – ištirti vibracijos energijos poveikį suvirintos jungties mechaninėms savybėms bei mikrostruktūrai. Taip pat siekta ištirti ir patobulinti suvirinimo technologinius veiksnius, įtakančius suvirinimo siūlės kokybę tais atvejais, kai suvirinimo metu taikomas vibracinis poveikis.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai (Jurčius 2008c, Jurčius 2009b, Rumbutis 2009, Jurčius 2010).

### 4.1. Tempimo bandymų rezultatai

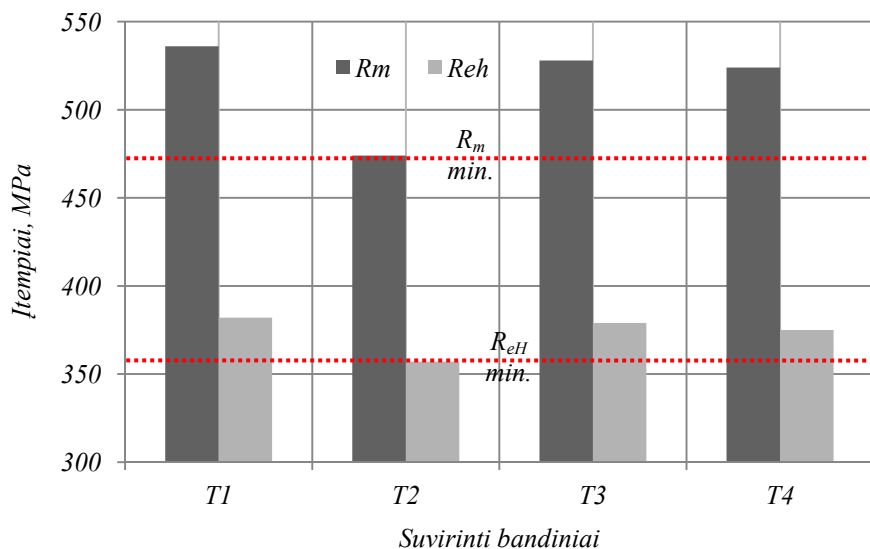
Tempimo bandymai atlikti laikantis standarto *LST EN 895:1998* reikalavimų, todėl tempimo bandymams buvo suvirinti didesni bandiniai: *T1* – be apdorojimo, *T2* – terminis apdorojimas po suvirinimo, *T3* – *VSR* suvirinimo metu, *T4* – *VSR* po suvirinimo. Visi tempiami bandiniai trūko per pagrindinio metalo sritį. Prilydytame metale silicio yra apie 0,64 %, o mangano apie 0,1 % daugiau negu pagrindiniame, todėl naudojant daugiau legiruotą pridėtinį metalą, užtikrinamas didesnis siūlės metalo stiprumas ir taip kompensuojamas jungties susilpninimas

dėl suvirinimo siūlės defektų. Kai tempimo bandymo metu suvirintas bandinys suyra pagrindinio metalo srityje, tokia suvirinta jungtis yra tinkama eksploatacijai. Projektuojant konstrukcijas, skaičiavimams naudojami tik pagrindinio metalo leistini įtempiai, darant prielaidą, kad prilydyto metalo leistinių įtempių reikšmės analogiškos arba geresnės. Atlikus suvirintų bandinių tempimo bandymus, buvo nustatyta stiprumo riba  $R_m$ , takumo riba  $R_{eH}$  ir bandinio santykinis pailgėjimas. Tyrimo rezultatai pateikti 4.1 lentelėje ir 4.1 paveiksle.

**4.1 lentelė.** Tempimo bandymų rezultatai

**Table 4.1.** The tensile test results

| Bandinys | Stiprumo riba<br>$R_m$ , MPa |     |      | Takumo riba<br>$R_{eH}$ , MPa |     |      | Santykinis pailgėjimas,<br>% |    |      |
|----------|------------------------------|-----|------|-------------------------------|-----|------|------------------------------|----|------|
|          | 1                            | 2   | Vid. | 1                             | 2   | Vid. | 1                            | 2  | Vid. |
| T1       | 514                          | 557 | 536  | 388                           | 376 | 382  | 29                           | 27 | 28   |
| T2       | 478                          | 469 | 474  | 352                           | 362 | 357  | 32                           | 35 | 34   |
| T3       | 532                          | 524 | 528  | 373                           | 385 | 379  | 31                           | 32 | 32   |
| T4       | 521                          | 527 | 524  | 382                           | 368 | 375  | 26                           | 28 | 27   |



**4.1 pav.** Tempimo bandymo rezultatai

**Fig. 4.1.** The tensile test results

Bandinio *T1* tempimo rezultatai atitiko plieno *S355J2* gamintojo deklaruotas vertes. Terminiškai apdoroto bandinio *T2* tempimo rezultatai rodo ženklų takumo ir stiprumo ribos sumažėjimą. Pastarieji rezultatai beveik siekia minimalius plieno *S355J2* stiprumo dydžius ( $R_m = 470 \text{ MPa}$ ,  $R_{eH} = 355 \text{ MPa}$ ). *T3* ir *T4* bandiniai buvo apdoroti vibracine energija, tačiau jungties takumo ir stiprumo ribai tai įtakos nepadarė. Atlikus mechaninių savybių tyrimą, galime teigti, kad vibracinis įtempis atleidimas, priešingai nei terminis atleidimas, neturi neigiamo poveikio jungties stiprumo savybėms. Santykinio pailgėjimo rezultatai viršija minimalius reikalavimus 20 %. Bandinio *T3* santykinio pailgėjimo rezultatai rodo, kad vibracinė energija *suvirinimo metu* padidina jungties plastiškumą, nekeičiant stiprumo savybių.

## 4.2. Smūginio tūsumo bandymų rezultatai

Kiekvienam suvirintam bandiniui (*B1*, *B2*, *B3*, *B4*) buvo atlikti trys smūginio tūsumo bandymai siūlės metalui ir trys bandymai terminio poveikio sričiai, kai bandymo temperatūra  $-30^\circ\text{C}$ . Siūlės metalui tirti buvo naudojami *VWT 0/1* ir terminio poveikio sričiai tirti naudojami *VHT 1/1* tipo bandiniai. Bandymo rezultatai pateikti 4.2 lentelėje ir 4.2 paveiksle.

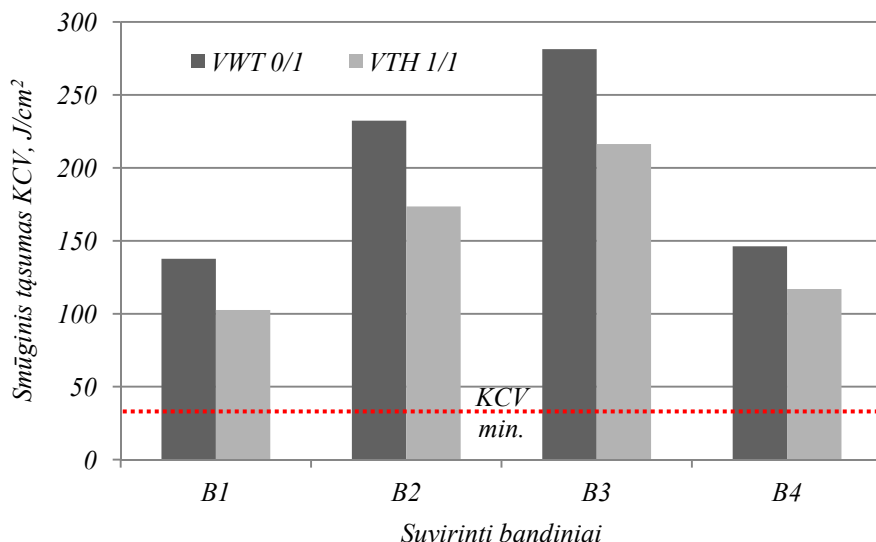
**4.2 lentelė.** Suvirintų bandinių smūginio tūsumo bandymo rezultatai

**Table 4.2.** Impact strength test results of welded specimens

| Bandinys | Tipas   | Smūginis tūsumas $KCV, \text{J/cm}^2$ |       |       |          |
|----------|---------|---------------------------------------|-------|-------|----------|
|          |         | 1                                     | 2     | 3     | Vidurkis |
| B1       | VWT 0/1 | 140,7                                 | 138,2 | 134,1 | 137,7    |
|          | VTH 1/1 | 107,0                                 | 98,3  | 102,5 | 102,6    |
| B2       | VWT 0/1 | 239,4                                 | 242,1 | 215,7 | 232,4    |
|          | VTH 1/1 | 179,2                                 | 167,1 | 174,5 | 173,6    |
| B3       | VWT 0/1 | 287,4                                 | 273,0 | 283,7 | 281,4    |
|          | VTH 1/1 | 223,8                                 | 231,7 | 193,4 | 216,3    |
| B4       | VWT 0/1 | 158,9                                 | 152,4 | 127,3 | 146,2    |
|          | VTH 1/1 | 109,7                                 | 127,1 | 114,2 | 117,0    |

Smūginio tūsumo bandymų rezultatų grafinis vaizdas (4.2 pav.) rodo, kad termiškai neapdorotų *B1* ir *B4* serijos bandinių terminio poveikio zonos smūginis tūsumas yra mažiausias iš visų bandymų, bet didesnis nei standarto *LST EN 10025-2:2005* nurodomas minimalus smūginio tūsumo dydis  $33,8 \text{ J/cm}^2$ , esant

-30 °C temperatūrai. Tyrimo rezultatai rodo, kad vibracinis įtempių atleidimas po suvirinimo nekeičia siūlės ir terminio poveikio zonos smūginio tūsumo.



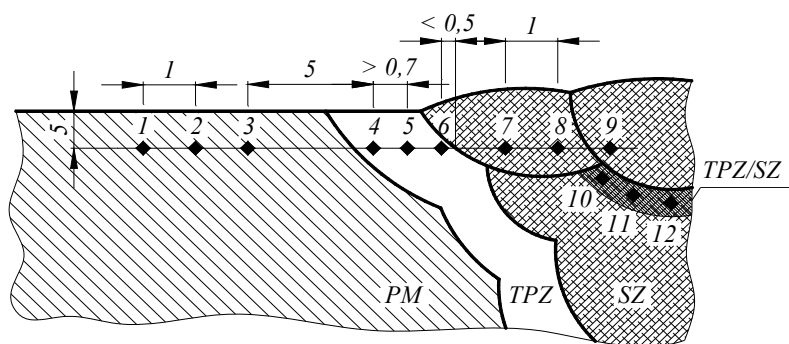
**4.2 pav.** Smūginio tūsumo bandymo rezultatai

**Fig. 4.2.** The impact strength test results

B3 serijos bandinių smūginio tūsumo tyrimo rezultatai rodo, kad vibracinis apdorojimas *suvirinimo metu* ženkliai padidina suvirinimo siūlės ir TPZ smūginį tūsumą. Tyrimų metu nustatyta, kad vibracinis apdorojimas *suvirinimo metu* labiau didina jungties plastiškumą negu terminis apdorojimas po suvirinimo. Iš atlikto tyrimo rezultatų galime teigti, kad konstrukcija, suvirinta naudojant vibracinį poveikį, tampa atsparesnė dinaminėms apkrovoms, nuovargiui bei spontaniškam irimui.

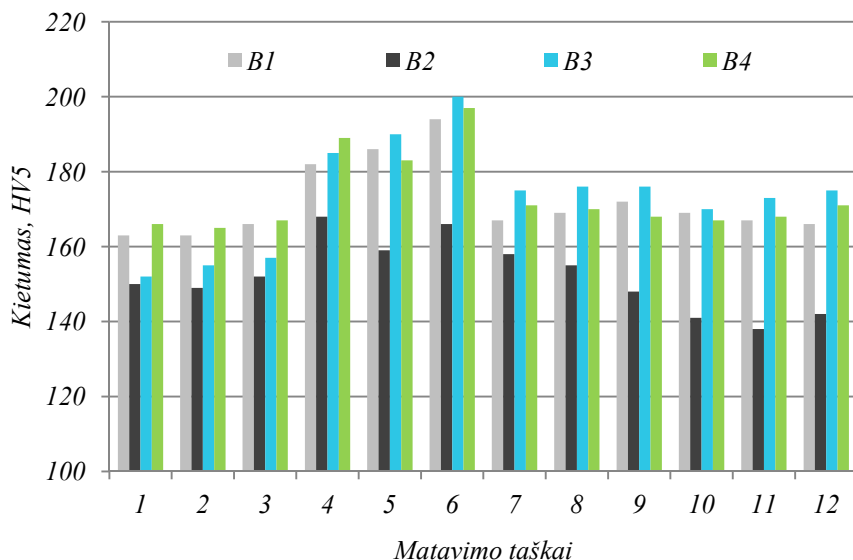
### 4.3. Kietumo bandymų rezultatai

Buvo matuojamos keturios sritys: pagrindinio metalo, terminio poveikio zonos, suvirinimo siūlės metalo bei tarp suvirinimo siūlių esančios terminio poveikio zonos (TPZ/SZ). Taigi kiekvienam bandiniui buvo atlikta 12 matavimų, pagal 4.3 paveiksle pateiktą schemą. Mikrokietumo matavimo rezultatai grafiškai pateikti 4.4 paveiksle.



4.3 pav. Kietumo matavimo taškų išdėstymas

Fig. 4.3. Distribution of measurement points of hardness tests



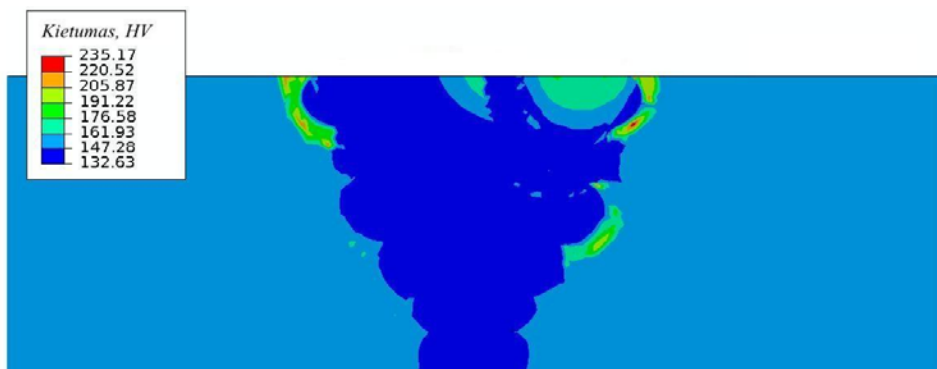
4.4 pav. Kietumo pasiskirstymas B1, B2, B3 ir B4 serijos bandiniuose

Fig. 4.4. Distribution of hardness in B1, B2, B3 and B4 series specimens

Kietumo tyrimais nustatyta, kad vibracijos energija *suvirinimo metu* neturi įtakos pagrindinio metalo, siūlės ir terminio poveikio zonos kietumui. Maksimali kietumo reikšmė terminio poveikio zonoje, ties sulydymo linija, siekė 200 HV. Mažiausias kietumas nustatytas prilydytame metalo – apie 175 HV. Suvirintų B4 serijos bandinių kietumo tyrimas parodė, kad po suvirinimo taikomas vibracinis įtempių atleidimas nekeičia jungties kietumo. Nustatyta, kad terminis įtempių

atleidimas sumažino suvirintos jungties kietumą apie 12 %. Minimali kietumo reikšmė po terminio apdorojimo, tarp siūlių esančioje terminio poveikio zonoje, siekė 141 *HV*. Mikro kietumo tyrimas parodė, kad vibracinio poveikio liekamiesiems įtempiams negalima vertinti pagal jungties kietumą, nes vibracinis poveikis, priešingai nei terminis įtempių atleidimas, neturi įtakos suvirintos jungties kietumui.

Metalo kietumas bandinio skerspjūvyje taip pat buvo nustatytas liekamųjų suvirinimo įtempių modeliavimo metu. Kietumo pokyčio suvirinimo siūlės skerspjūvyje skaičiavimas paremtas mikrostruktūros, aušinimo greičio bei metalo sudėties analize. Baigtinių elementų metodu atliktas kietumo pasiskirstymo tyrimas, analizuojant jungtį sudarytą iš 14 suvirinimo ėjimų. Analizės rezultatai pateikti 4.5 paveiksle.



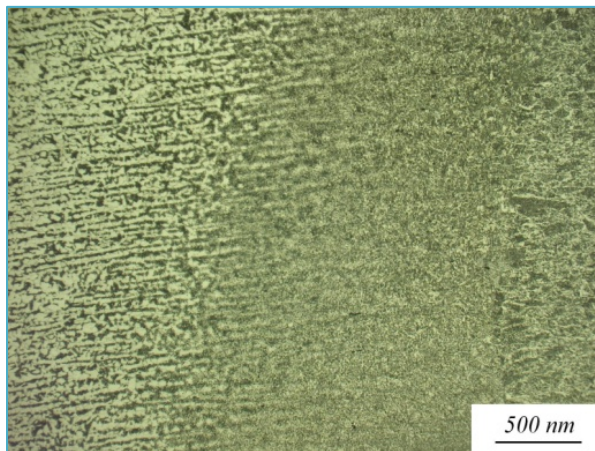
**4.5 pav.** Kietumo pasiskirstymas suvirinimo siūlės pjūvyje  
**Fig. 4.5.** The hardness distribution in section of weld

Maksimali kietumo reikšmė (~235 *HV*) bandinyje apskaičiuota terminio poveikio zonoje. Suvirinimo siūlės metalo kietumas, lyginant su pagrindinio metalo kietumu, mažesnis apie 10 %. *BEM* analizės rezultatai koreliuoja su eksperimentinio matavimo rezultatais.

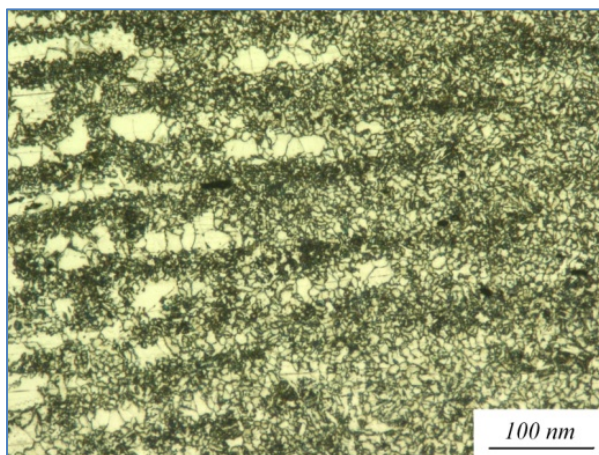
Pagal plieninių konstrukcijų gamybos standartų rekomendacijas (*LST EN 1090-2:2008*, *LST EN ISO 15614-1:2004*), plieno *S355J2* suvirintų jungčių kietumas (be terminio apdorojimo) turi būti ne didesnis kaip 380 *HV*, kai po suvirinimo atliekamas terminis įtempių atleidimas – kietumas ne didesnis kaip 320 *HV*. Tyrimo bandinių kietumas, nepriklausomai nuo apdorojimo metodo, neviršijo maksimalios leistinos ribos.

## 4.4. Mikrostruktūros tyrimai

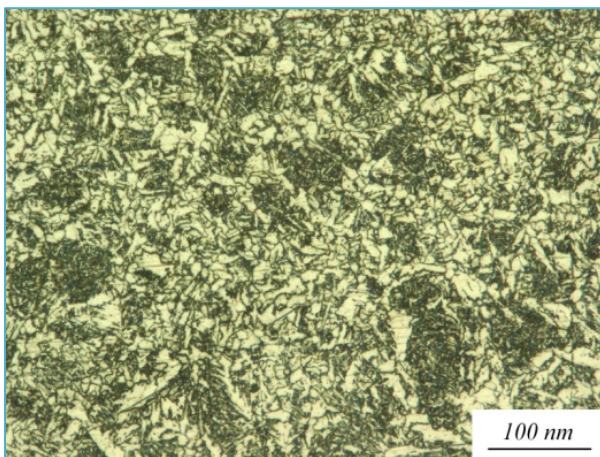
Skirtingai apdorotų suvirintų jungčių metalo mikrostruktūros tyrimai atlikti optinės mikroskopijos metodu, naudojant optinį mikroskopą „Keyens VHX-600“. Mikrošlifai pagaminti iš liekamųjų įtempių matavimui panaudotų *B1*, *B2* ir *B3* serijos bandinių. Mikrostruktūros nuotraukos pateiktos 4.6–4.17 paveiksluose.



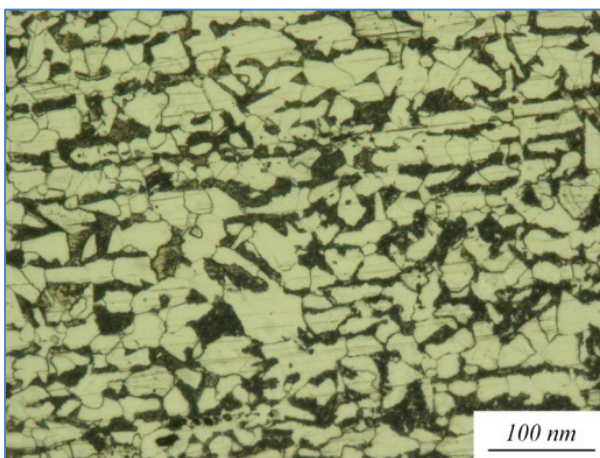
4.6 pav. Bandinio *B1* TPZ mikrostruktūra, padidinta 100×  
Fig. 4.6. Microstructure of *HAZ* of the specimen *B1*, zoom 100×



4.7 pav. Bandinio *B1* TPZ mikrostruktūra, padidinta 500×  
Fig. 4.7. Microstructure of *HAZ* of the specimen *B1*, zoom 500×

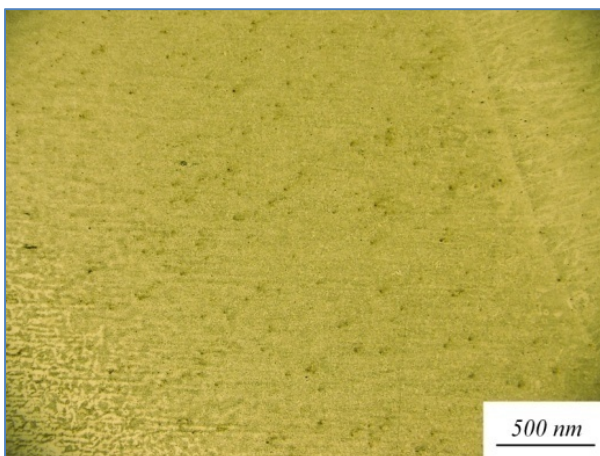


**4.8 pav.** Bandinio *B1* prilydyto metalo mikrostruktūra, padidinta 500×  
**Fig. 4.8.** Microstructure of welded metal of the specimen *B1*, zoom 500×



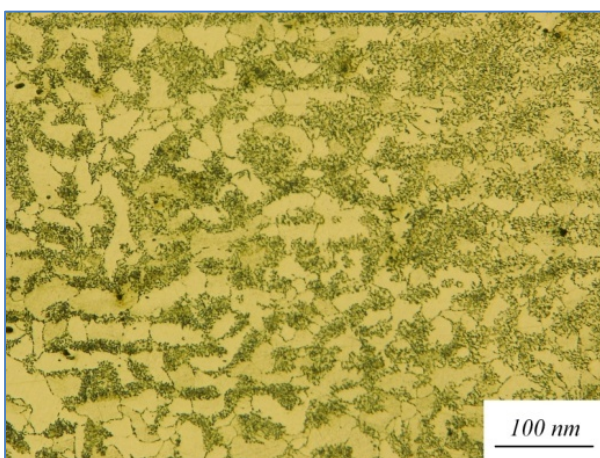
**4.9 pav.** Bandinio *B1* pagrindinio metalo mikrostruktūra, padidinta 500×  
**Fig. 4.9.** Microstructure of parent metal of the specimen *B1*, zoom 500×

Suvirinto *B1* serijos bandinio mikrostruktūros tyrimas (4.6–4.9 pav.) parodė tipišką šios rūšies plienų mikrostruktūros pasikeitimą po suvirinimo. Pagrindinio metalo struktūra feritas-perlitas, suvirinimo siūlės metalas – feritas su nedideliu kiekiu beinito. Aiškiai matomos terminio poveikio zonos plotis svyruoja 1,5–3 mm ribose (4.6 pav.). Suvirinimo siūlės metalo struktūra – smulkiagrūdė. Tokia struktūra užtikrina geras suvirinimo jungties plastiškumo ir atsparumo nuovargiui savybes.



**4.10 pav.** Bandinio *B2* TPZ mikrostruktūra, padidinta 100×

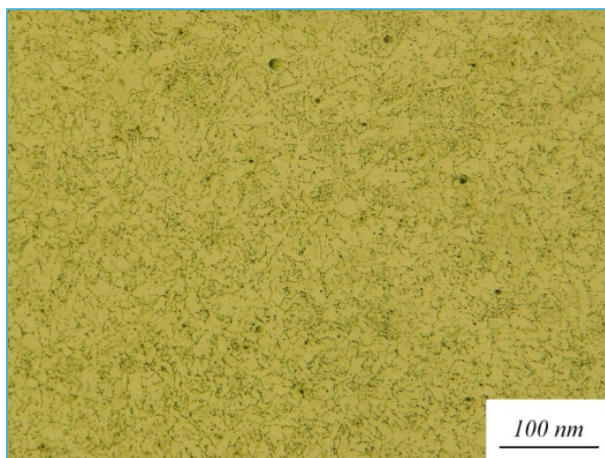
**Fig. 4.10.** Microstructure of *HAZ* of the specimen *B2*, zoom 100×



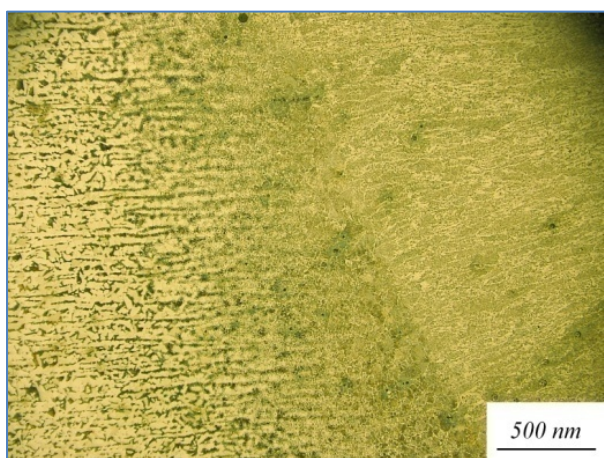
**4.11 pav.** Bandinio *B2* TPZ mikrostruktūra, padidinta 500×

**Fig. 4.11.** Microstructure of *HAZ* of the specimen *B2*, zoom 500×

Po terminio įtempių atleidimo pasikeitė *B2* serijos bandinio suvirinimo siūlės mikrostruktūros grūdelių dydis ir forma, t. y. rekristalizacijos proceso dėka, grūdeliai tapo smulkesni, struktūra tolygesnė per visą siūlės plotą (4.10–4.12 pav.). Apdorojimo metu fazinis virsmas nevyko, nes terminio įtempių atleidimo temperatūra nesiekė fazinio virsmo  $A_1$  temperatūros (720 °C). Fazinio virsmo metu galimos papildomos deformacijos (*Kulikauskas 1997*).

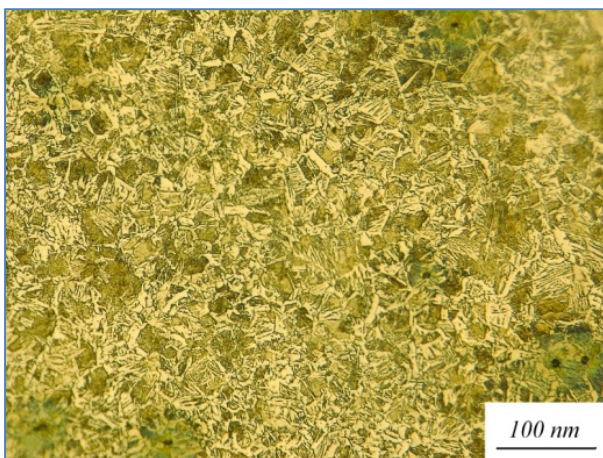


**4.12 pav.** Bandinio *B2* prilydyto metalo mikrostruktūra, padidinta 500×  
**Fig. 4.12.** Microstructure welded metal of the specimen *B2*, zoom 500×



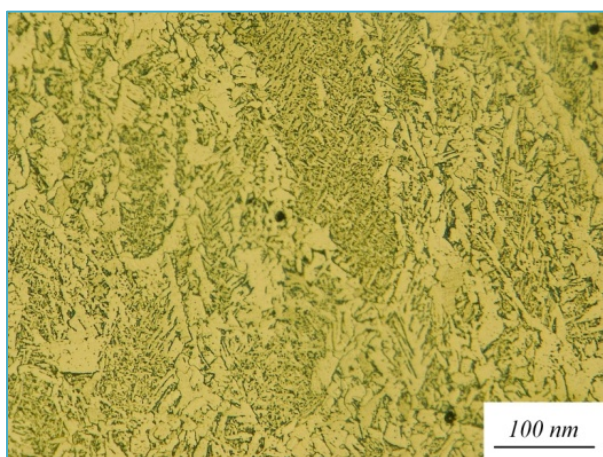
**4.13 pav.** Bandinio *B3* TPZ mikrostruktūra, padidinta 100×  
**Fig. 4.13.** Microstructure of *HAZ* of the specimen *B3*, zoom 100×

*B3* serijos bandinio mikrostruktūros tyrimas (4.13–4.15 pav.) parodė, kad vibracijos energija *suvirinimo metu* nežymiai keičia prilydyto metalo struktūrą. Joje dominuoja eglutės formos linijų derinys, nukreiptas į suvirinimo jungties viršų. Lyginant su *B1* serijos bandinio suvirintos jungties mikrostruktūra, galime teigti, kad vibracija paveikia skysto metalo konvekciją ir kristalizacijos procesą.



**4.14 pav.** Bandinio *B3* TPZ mikrostruktūra, padidinta 500×

**Fig. 4.14.** Microstructure of *HAZ* of the specimen *B3*, zoom 500×

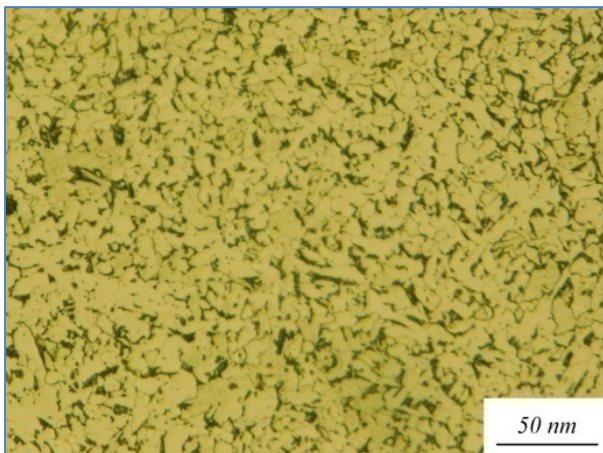


**4.15 pav.** Bandinio *B3* prilydyto metalo mikrostruktūra, padidinta 500×

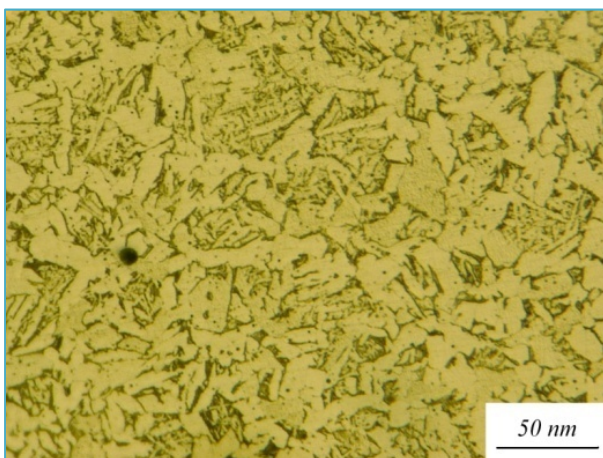
**Fig. 4.15.** Microstructure of welded metal of the specimen *B3*, zoom 500×

Palyginimui pateiktos *B1* ir *B3* serijos bandinių mikrostruktūros fotografijos, padidintos 1000 kartų (4.16, 4.17 pav.). Pastebima, kad dėl vibracijos poveikio grūdelių dydis ir forma skiriasi nuo bandinio, kuris nebuvo apdorotas jokiais metodais. Vibracijos paveiktas kristalizacijos procesas suformavo stambesnius ferito grūdus, nes dėl pakitusios konvekcijos grūdėliai auga ne nuo kieto kristalizacijos fronto paviršiaus, o spontaniškai nuo savaiminių kristalizacijos cen-

trų, susidariusių skysto metalo tūryje. Tokių, galinčių augti kristalizacijos centrų kiekis yra ribotas, todėl susidaro stambesnio grūdo struktūra.



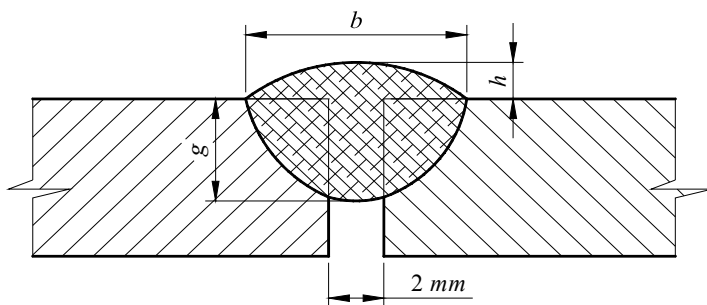
**4.16 pav.** Bandinio *B1* suvirinimo siūlės metalo mikrostruktūra, padidinta 1000×  
**Fig. 4.16.** Microstructure of welded metal of the specimen *B1*, zoom 1000×



**4.17 pav.** Bandinio *B3* suvirinimo siūlės metalo mikrostruktūra, padidinta 1000×  
**Fig. 4.17.** Microstructure of welded metal of the specimen *B3*, zoom 1000×

## 4.5. Technologinių suvirinamumo savybių tyrimas

Tiriant, kai bandiniai suvirinimo metu buvo veikiami vibracijos, pastebėta, kad daugiasluoksniame suvirinimo siūlėje, tarp suvirinimo ėjimų, formuojasi nesulydymo defektai (4.19, 4.20 pav.). Dėl šios priežasties buvo atliktas vibracijos poveikio suvirinimo technologinėms savybėms tyrimas, panaudojant *METALAX* vibracinio apdorojimo įrangą, suvirinimo pusautomatį *KEMPOMAT 3200*, 1,2 mm skersmens *ESAB OK Autrod 12.50* pridėtinę suvirinimo vielą bei 100×50×6 mm dydžio plieno *S355J2* plokšteles. Tyrimo metu, keičiant suvirimo padėtį (žemutinę *PA*, horizontalią *PC*, vertikalią aukštyn *PF*), suvirinimo srovę bei vibracinio apdorojimo dažnį buvo analizuojamas metalo pralaidumo gylis, suvirinimo siūlės forma, bei dėl vibracijos susidarantys defektai. Pagrindiniai matavimo parametrai: suvirinimo siūlės plotis  $b$ , pralaidumo gylis  $g$  ir rumbelės aukštis  $h$  (4.18 pav.).



**4.18 pav.** Suvirinimo siūlės geometrinių išmatavimų schema  
**Fig. 4.18.** Measurement scheme of the weld geometry

Technologinių savybių tyrimai atlikti siekiant pagrįsti tyrimo metu pastebėtus vibracinio poveikio suvirinimo siūlėje sukeltus neigiamus pokyčius. Atlikto tyrimo rezultatai pateikti 4.3 lentelėje. Tyrimo metu bandinių suvirinimo greitis, vielos tiekimo greitis, suvirinimo srovės poliškumas, vielos iškyšos dydis ir apsauginių dujų debitas buvo pastovūs. Suvirinimo metu nebuvo atliekami cikliški elektrodinės vielos švytuojantys judesiai.

Remiantis technologinių savybių bandymų rezultatais, galime teigti, kad vibracinis poveikis suvirinimo metu mažina įvirinimo gylį, todėl daugiasluoksniame suvirinimo siūlėje atsiranda nesulydymo defektai. Padidinus suvirinimo srovę 10–20 %, gaunama tinkama siūlės forma ir įvirinimo gylis. Padidinus vibracinį poveikį, mažėja įvirinimo gylis bei išorinėje jungties dalyje formuojasi perteklinis metalas. Tai vyksta dėl smarkiai pakitusios konvekcijos. Sumažinus

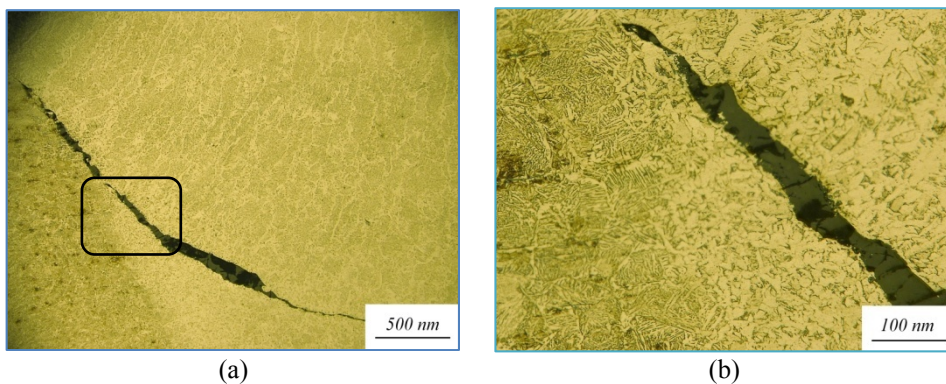
vibracijos poveikį 5 %, pasiekama identiška suvirinimo siūlės forma, kaip bandinio be vibracijos, tačiau tokiu būdu liekamieji įtempiai gali būti nevysiškai atleisti. Siekiant suvirinimo padėtyse *PA* ir *PC* išvengti nevysiškai atleistų įtempų ir nesulydymo defektų (4.21, 4.22 pav.), vibracinio apdorojimo energija turi siekti 20 % rezonanso amplitudės piko, o įprastą suvirinimo srovę reikia padidinti 10–20 %. Remianti tyrimo rezultatais, *PF* padėtyje suvirinimo srovę galima didinti ne daugiau kaip 10 %. Padidinus suvirinimo srovę daugiau kaip 10 % – mažėja suvirinimo gylis bei jungties išoriniame paviršiuje formuojasi perteklinis metalas.

#### 4.3 lentelė. Technologinių suvirinimo savybių bandymo rezultatai

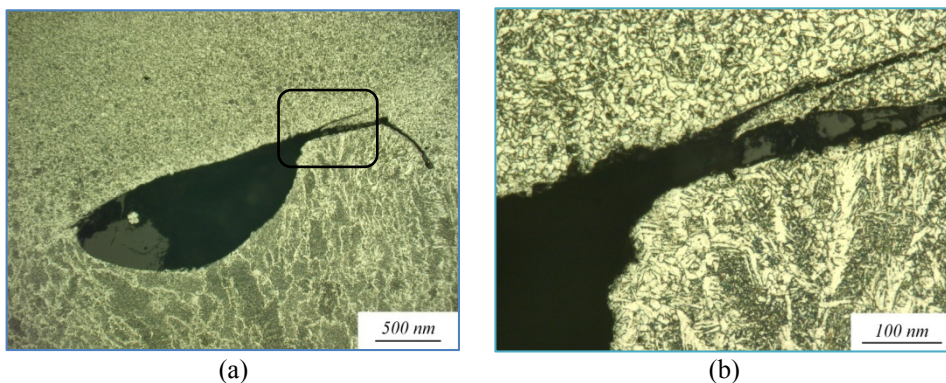
**Table 4.3.** Test results of welding technological properties

| Bandinių suvirinimo sąlygos                | Vibracijos dažnis,<br><i>Hz</i> | Suvirinimo         |                     | Siūlės formos matmenys, <i>mm</i> |                     |           |           |
|--------------------------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------|-----------|
|                                            |                                 | srovė,<br><i>A</i> | įtampa,<br><i>V</i> | pozicija                          | suvirinimo padėtis* |           |           |
|                                            |                                 |                    |                     |                                   | <i>PA</i>           | <i>PC</i> | <i>PF</i> |
| Be <i>VSR</i>                              | -                               | 170                | 22                  | <i>b</i>                          | 8,3                 | 8,0       | 7,4       |
|                                            |                                 |                    |                     | <i>h</i>                          | 2,2                 | 2,5       | 2,7       |
|                                            |                                 |                    |                     | <i>g</i>                          | 3,9                 | 3,3       | 4,2       |
| Su <i>VSR</i>                              | 78                              | 170                | 22                  | <i>b</i>                          | 9,4                 | 8,2       | 7,0       |
|                                            |                                 |                    |                     | <i>h</i>                          | 2,1                 | 2,7       | 3,3       |
|                                            |                                 |                    |                     | <i>g</i>                          | 3,3                 | 2,9       | 3,1       |
| Su <i>VSR</i><br>(10 % didesnė suv. srovė) | 78                              | 187                | 24                  | <i>b</i>                          | 7,7                 | 7,5       | 7,1       |
|                                            |                                 |                    |                     | <i>h</i>                          | 2,0                 | 2,3       | 3,0       |
|                                            |                                 |                    |                     | <i>g</i>                          | 4,4                 | 4,2       | 3,9       |
| Su <i>VSR</i><br>(20 % didesnė suv. srovė) | 78                              | 204                | 26                  | <i>b</i>                          | 7,8                 | 8,0       | 6,8       |
|                                            |                                 |                    |                     | <i>h</i>                          | 2,3                 | 2,2       | 3,7       |
|                                            |                                 |                    |                     | <i>g</i>                          | 5,1                 | 4,7       | 3,2       |
| Su <i>VSR</i><br>(5 % mažesnis VSR dažnis) | 74                              | 170                | 22                  | <i>b</i>                          | 8,6                 | 7,8       | 7,5       |
|                                            |                                 |                    |                     | <i>h</i>                          | 2,5                 | 2,6       | 2,4       |
|                                            |                                 |                    |                     | <i>g</i>                          | 3,8                 | 3,0       | 4,0       |
| Su <i>VSR</i><br>(5 % didesnis VSR dažnis) | 82                              | 170                | 22                  | <i>b</i>                          | 8,5                 | 8,1       | 7,1       |
|                                            |                                 |                    |                     | <i>h</i>                          | 3,4                 | 3,2       | 3,5       |
|                                            |                                 |                    |                     | <i>g</i>                          | 3,1                 | 2,9       | 2,6       |

\* - suvirinimo padėtys pagal standartą *LST EN ISO 6947:2000*.



**4.19 pav.** Suvirinimo defektas tarp suvirinimo ėjimų, padidinta 100× (a), 500× (b)  
**Fig. 4.19.** Welding defect between weld runs, zoom 100× (a), 500× (b)



**4.20 pav.** Suvirinimo defektas tarp suvirinimo ėjimų, padidinta 100× (a), 500× (b)  
**Fig. 4.20.** Welding defect between weld runs, zoom 100× (a), 500× (b)

Siekiant išvengti nesulydymo defektų, pagrindiniai disertacijos tyrimo B3 serijos bandiniai, skirti liekamųjų suvirinimo įtempių pokyčio tyrimams, buvo suvirinti vadovaujantis šio skyriaus tyrimų išvadomis.

## 4.6. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Mechaninių savybių tyrimas parodė, kad *po suvirinimo* atliekamas vibracinis įtempių atleidimas neturi esminio poveikio medžiagos stiprumui, plastiškumui bei kietumui. Po vibracinio apdorojimo jungties medžiagos savybės lieka analogiškos kaip ir be apdorojimo, tačiau liekamieji įtempiai būna mažesni.

2. Vibracijos poveikis *suvirinimo metu* didina suvirintos jungties plastiškumą 2 kartus, nesumažindamas jungties metalo stiprumo ir kietumo, priešingai negu terminis įtempių atleidimas. Galima teigti, kad vibracinis įtempių atleidimas *suvirinimo metu* yra pranašesnis už įprastą terminį įtempių atleidimą.

3. Terminis liekamųjų įtempių atleidimas didina suvirintos jungties plastiškumą ~70 %, tačiau tuo pačiu mažina jungties stiprumą ~10 % bei kietumą ~12 %.

4. Bandinių mikrostruktūros tyrimai rodo, kad vibracinis apdorojimas *suvirinimo metu* turi įtakos suvirinimo siūlės metalo kristalizacijai. Dėl pakitusios konvekcijos ferito grūdeliai susidaro stambesni, nes pradeda augti ne nuo kieto kristalizacijos fronto paviršiaus, o spontaniškai nuo savaiminių kristalizacijos centrų, susidariusių skysto metalo tūryje.

5. Tyrimų metu nustatyta, kad daugiasluoksnio suvirinimo metu, naudojant vibracinį poveikį, tarp suvirinimo siūlių susidaro nesulydymo defektai. Siekiant išvengti šių defektų būtina padidinti suvirinimo srovę: *PA* ir *PC* suvirinimo padėtyje 10–20 %, *PF* padėtyje iki 10 %.

---

## Bendrosios išvados

1. Taikant skirtingas liekamųjų įtempių matavimo technologijas, patvirtinta, kad vibracinis poveikis *suvirinimo metu* mažina didžiausius liekamuosius suvirinimo įtempius apie 60 %, *po suvirinimo* – apie 40 %, o terminis atleidimas – apie 62 %. Tuo remiantis, klasikinis terminis įtempių atleidimo metodas konstrukcinio plieno suvirintų jungčių liekamiesiems įtempiams mažinti gali būti pakeistas vibraciniu atleidimo metodu.

2. Tyrimo metu nustatyta, kad magnetinio lauko stiprumo gradientą ir tempimo įtempius sieja tiesinė priklausomybė, todėl metalo magnetiniu atminties metodu galima nustatyti metalo įtemptą ir/arba deformuotą būvį. Magnetinis parametras liekamųjų suvirinimo įtempių koncentraciją išreiškia staigiu magnetinio parametro pokyčiu ties liekamųjų įtempių koncentracijos piku. Šiuo metodu sunku įvertinti liekamųjų suvirinimo įtempių dydį bei veikimo kryptį, todėl jo taikymas konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje yra ribotas. Matavimų rezultatai nepatvirtina konkretaus *VSR* poveikio efektyvumo.

3. Nustatyta, kad ultragarso paviršinės išilginės bangos sklaidimo greitį metalo ir tempimo įtempius sieja tiesinė priklausomybė. Nustatytos konstrukcinio plieno akustinio tamprumo konstantos: pagrindiniam metalui  $K_{PM} = -1,377 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ , siūlės metalui  $K_{SZ} = -1,616 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ . Paviršinės išilginės bangos metodas jautrus jutiklio prispaudimui, todėl matuojant suvirinimo siūlės įtempius reikia sulyginti suvirinimo siūlę su pagrindiniu metalu. Tyrimo metu ultra-

garsu nustatytas liekamųjų įtempių pasiskirstymas bandiniuose koreliuoja su difrakcijos bei skylės gręžimo metodu gautu įtempių pasiskirstymu. Paviršinės ultragarso bangos sklidimo gylis bandinio paviršiuje siekia 2,5–3 mm gylį. Sukurtas liekamųjų įtempių nustatymo ultragarsu algoritmas lengvai taikomas konstrukcijos gamybos ir surinkimo aikštelėje.

4. Tyrimo metu nustatyta, kad rentgeno spindulių difrakcija galima išmatuoti tik paviršinius liekamuosius įtempius 50–100  $\mu\text{m}$  gylyje. Ši matavimo technologija labai jautri medžiagos paviršiaus apdirbimo kokybei, be to įrangos mobilumas ribotas. Dėl šių priežasčių rentgeno spindulių difrakcijos metodo taikymas konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje yra sudėtingas, tačiau įtempių matavimo procesas yra bekontaktis, patikimas bei pilnai automatizuotas.

5. Neutronų difrakcijos tyrimais nustatyta, kad tūriniai (5–8 mm gylyje) liekamieji suvirinimo įtempiai ~12 % mažesni negu įtempiai suvirintos jungties paviršiuje. Matavimo metodas yra labai tikslus, nereikalingas matuojamo paviršiaus paruošimas, tačiau liekamųjų įtempių matavimai trunka labai ilgai, o tyrimai galimi tik laboratorijoje.

6. Kombinuotu *HD/DSPI* metodu liekamųjų įtempių matavimo gylis siekė 1,5–2,0 mm. Vieno taško matavimas truko iki 5 kartų greičiau negu matuojant rentgeno spindulių difrakcijos metodu, tačiau abiejų metodų matavimo tikslumas ir matuojamų įtempių gylis yra tapatūs. Dėl didelio jautrumo aplinkos virpesiams, *HD/DSPI* įtempių matavimo technologijos taikymas konstrukcijos gamybos ar surinkimo aikštelėje yra ribotas.

7. Skaitiniu būdu nustatytas liekamųjų įtempių pasiskirstymas bandinio pjūvyje koreliuoja su eksperimentinių metodų (*UT*, *XRD*, *ND*, *HD/DSPI*) gautais rezultatais. *FEM* analizė parodė, kad po suvirinimo maksimalūs tempimo įtempiai jungties paviršiuje siekia 360 MPa.

8. Vibracinis įtempių atleidimas *po suvirinimo* neturi esminio poveikio medžiagos stiprumui, plastiškumui bei kietumui. Terminis liekamųjų įtempių atleidimas didina suvirintos jungties plastiškumą ~70 %, tačiau mažina stiprumą ~10 % bei kietumą ~12 %. Vibracija *suvirinimo metu* didina suvirintos jungties plastiškumą 2 kartus, nekeisdama stiprumo bei kietumo, priešingai negu terminis įtempių atleidimas.

9. Vibracinis apdorojimas turi įtakos suvirinimo siūlės metalo kristalizacijai. Dėl pakitusios skysto metalo konvekcijos vonelėje kristalizuojasi stambesni ferito grūdėliai, nes nauji kristalai pradeda augti ne nuo kieto kristalizacijos fronto paviršiaus, o spontaniškai nuo savaiminių kristalizacijos centrų, susidariusių skysto metalo tūryje.

10. Tyrimo metu nustatyta, kad vibracija *suvirinimo metu* mažina įvirinimo gylį, todėl daugiasluoksniu suvirinimo metu atsiranda nesulydymo defektai. Siekiant išvengti šių defektų būtina padidinti suvirinimo srovę: *PA* ir *PC* suvirinimo padėtims 10–20 %, *PF* padėčiai iki 10 %.

---

## Literatūra ir šaltiniai

ASM International. 1993. *ASM Handbook: Welding, Brazing, and Soldering*. 10<sup>th</sup> ed. ASM International. ISBN 0-87170-382-3.

Aoki, S.; Nishimura, T. 2003. Reduction Method for Residual Stress of Welded Joint Using Random Vibration, in *Transactions of the 17<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactors Technology, Prague, Czech Republic, 2003*, 385–389.

Baldi, A. 2005. A New Analytical Approach for Hole Drilling Residual Stress Analysis by Full Field Method, *Journal of Engineering Material and Technology* 127: 165–169.

Bazaras, Ž.; Kalpokas, J. 2002. Evaluation of Residual Stresses in Weld Rails, *Mechanika* 1(33): 22–26.

Beghini, M.; Bertini, L.; Mori, L. F.; Rosellini, W. 2008. Genetic Algorithm Optimization of the Hole-drilling Method for Non-uniform Residual Stress Fields, *Journal of Strain Analysis* 44: 105–115.

Bražėnas, A. 2006. *Eksperimentinės mechanikos pagrindai: vadovėlis. Šiauliai: Šiaulių knygriškla*. ISBN 9986-38-663-2.

Clapham, L.; Abdullah, K.; Jeswiet, J. J.; Wild, P. M.; Rogge, R. 2001. Neutron Diffraction Residual Stress Mapping in Same Gauge and Differential Gauge Tailor-welded Blanks, *Journal of Materials Proceeding Technology* 148: 177–185.

Claxton, R.; Bentley, A. 1999. Vibratory Stress Relief: Recent Developments, *Metallurgia* 66(5): 49–53.

Deaconu, V. 2007. Finite Element Modeling of Residual Stress – a Powerful Tool in the Aid of Structural Integrity Assessment of Welded Structures, in *5<sup>th</sup> International Conference Structural Integrity of Welded Structures, Timisoara, 2007*, 2–9.

Delin, R. 2005. Reduce the Residual Stress of Welded Structures by Post-weld Vibration, *Material Science Forum, Residual Stresses VII* 490: 102–106.

Dubov, A. A.; Dubov, A. A.; Kolokolnikov, S. M. 2003. Method of Metal Magnetic Memory and Inspection Instruments, *Training Handbook V-1347*: 320–325.

Dubov, A. A. 1997. Investigation of Metal Properties Using the Magnetic Memory Method, *Physical Metallurgy and Thermal Treatment of Metals* 9: 256–261.

Feng, Z. 2005. *Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress Distortion*. Oak Ridge: CRC Press. ISBN 0849-33-467-5.

Gao, H.; Guo, H.; Blackburn, J. M.; Hendricks, R. W. 2000. Determination of Residual Stresses by X-Ray Diffraction in HSLA-100 Steel Weldments [interaktyvus] [žiūrėta 2009 spalio 7 d.]. Prieiga per internetą: <[http://www.mse.vt.edu/faculty/hendricks/publications/ICRS5\\_Weld\\_Paper.pdf](http://www.mse.vt.edu/faculty/hendricks/publications/ICRS5_Weld_Paper.pdf)>.

Gnirss, G. 1988. Vibration and Vibratory Stress Relief: Historical Development, Theory, and Practical Application, *Journal Welding in The World* 11(12): 284–291.

Grunitz, L. 2003. Evaluation of the Welding Residual Stress State in a Thick HY-80 steel plate, in *Proc. of the 13<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference Material, vol. 1. Honolulu, Hawaii, USA, 2003*, 141–146.

Goldak, J. A.; Akhlaghi, M. 2005. *Computational Welding Mechanics*. New York: Springer. ISBN 0387-23-287-7.

Habel, T. E. 2001. Successful Stress Relief of Welds Using Sub-harmonic Energy, *Welding Journal* 80(1): 38–42.

Hahn, W. F. 2002. Vibratory Residual Stress Relief and Modification in Metals to Conserve Resources and Prevent Pollution [interaktyvus] [žiūrėta 2009 rugsėjo 7 d.]. Prieiga per internetą: <<http://ceer.alfred.edu/research/vibratory.html>>.

Jiling, R.; Kai, S. W. 2004. Mechanism Study of Metal Magnetic Memory Testing, in *Proc. of 10<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on NDT, Brisbane, Australia, 2004*, 35–39.

Kou, S. 2003. *Welding Metallurgy*. Hoboken: A Johan Wiley & Sons. ISBN 0-471-43491-4.

Kulikauskas, L. 1997. *Medžiagotyra*. Vilnius: Žara. ISBN 9986-34-019-5.

Lihavainen, V. 2004. Fatigue Strength of a Longitudinal Attachment Improved by Ultrasonic Impact Treatment, *Journal Welding in The World* 48(9): 5–12.

Lindqvist, S.; Holmgren, J. 2007. Alternative Methods for Heat Stress Relief, *Civilingenjörsprogrammet Maskinteknik* 277: 12–16.

Lindgren, L. E. 2001. Finite Element Modeling and Simulation of Welding. Part 1: Increased Complexity, *Journal of Thermal Stresses* 24: 141–192.

Lord, J. D.; Penn, D.; Whitehead, P. 2008. The Application of Digital Image Correlation for Measuring Residual Stress by Incremental Hole Drilling, *Mechanics and Materials* 14: 65–73.

LST EN 1090-2:2008 *Plieninių ir aliumininių konstrukcijų darbų atlikimas. 2 dalis. Techniniai plieninių konstrukcijų darbų atlikimo reikalavimai*. Vilnius, 2008. 56 p.

LST EN 13480-4:2003 *Metalinis pramoninis vamzdynas. 4 dalis. Gamyba*. Vilnius, 2003. 25 p.

LST EN 13445-4:2009 *Nekaitinamieji slėginiai indai. 4 dalis. Gamyba*. Vilnius, 2009. 38 p.

LST EN 10025-2:2005 *Karštai valcuoti konstrukcinio plieno gaminiai. 2 dalis. Nelegiruotojo konstrukcinio plieno techninės tiekimo sąlygos*. Vilnius, 2005. 24 p.

LST EN 1011-2:2002 *Suvirinimas. Metalų suvirinimo rekomendacijos. 2 dalis. Lankinis feritinio plieno suvirinimas*. Vilnius, 2002. 38 p.

LST EN ISO 17663:2009 *Suvirinimas. Suvirinimui ir panašioms procesams naudojamam terminio apdorojimo kokybės reikalavimai*. Vilnius, 2009. 5 p.

LST EN 895:1998. *Metalinės medžiagos. Ardomieji siūlių bandymai. Skersinio tempimo bandymas*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 1998. 8 p.

LST EN ISO 15614-1:2004 *Metalų suvirinimo procedūrų aprašas ir patvirtinimas. Suvirinimo procedūros bandymas. 1 dalis. Pieno lankinis ir dujinis suvirinimas, nikelio ir nikelio lydinių lankinis suvirinimas*. Vilnius, 2004. 19 p.

LST EN 875:1998 *Metalinės medžiagos. Ardomieji siūlių bandymai. Smūginio tūsumo bandymai. Bandinių vieta, įpjovos orientacija ir tyrimas*. Vilnius, 1998. 5 p.

LST EN 1043-2:1998 *Metalinės medžiagos. Virintinių siūlių ardomieji bandymai. Kietumo bandymas. 2 dalis. Suvirintų sujungimų mikrokietumo bandymas*. Vilnius, 1998. 5 p.

LST EN ISO 9692-1:2004 *Suvirinimas ir panašūs procesai. Jungčių paruošimo rekomendacijos. 1 dalis. Plienų rankinis lankinis suvirinimas, lankinis suvirinimas lydžiuoju elektrodu apsauginėje dujose, dujinis suvirinimas, TIG suvirinimas ir pluoštinis suvirinimas*. Vilnius, 2004. 4 p.

LST EN ISO 6947:2000 *Siūlės. Suvirinimo padėtytys. Nuolydžio ir posūkio kampų apibrėžimai*. Vilnius, 2000. 6 p.

Monin, V. I.; Gurova, T. Castello, X. 2009. Analysis of Residual Stress State in Welded Steel Plates by X-ray Diffraction Method, *Material Science* 19: 172–175.

Nelson, D. V.; Makino, A.; Fuch, E. A. 1997. The Holographic-hole Drilling Method for Residual Stress Determination, *Optics and Lasers in Engineering* 27: 3–23.

Paradowska, A. M.; Price, J. W. H.; Ibrahim, R. 2006. The Effect of Heat Input on Residual Stress Distribution of Steel Welds Measured by Neutron Diffraction, *Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering* 17(2): 385–388.

Peng-Hsiang, C. 2004. Numerical and Experimental Investigations on the Residual Stresses of the Butt-welded Joints, *Computational Materials Science* 29: 11–22.

Radaj, D. 2003. *Welding Residual Stresses and Distortion*. Duesseldorf: DVS-Verl. ISBN 3871-55-791-9.

Robert, W.; Messler, Jr. 2004. *Principles of Welding*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH&Co. ISBN 0471-25-376-1.

Robbins, E. M. 2004. Topics in Vibratory Stress Relief of Weldments, in *The Vibratory Stress Relief Library, 2004*, 7–20.

Sajauskas, S. 2004. *Longitudinal Surface Acoustic Waves*, Kaunas: Technologija. ISSN 9955-09-777-9.

Sajauskas, S. 2002. Paviršinių išilginių akustinių bangų sužadinimo problema, *Ultragar-sas* 43(2): 17–20.

Steinzig, M.; Hayman, G.; Rangaswamy, P. 2001. Data Reduction Methods for Digital Holographic Stress Measurement, in *Proc. of the 2001 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Portland, USA, 2001*, 115–119.

Schajer, G. S.; Steinsig, M. 2005. full-field Calculation of Hole-drilling Residual Stresses from Electronic Speckle Pattern Interferometry Data, *Experimental Mechanics* 45: 526–532.

Sathiya, P.; Jinu, G. R.; Singh, N. 2009. Simulation of Weld Bead Geometry in GTA Welded Duplex Stainless Steel (DSS), *Scholarly Research Exchange* 10: 3–9.

Tall, L. 1991. Residual Stresses in Welded Plates a Theoretical Study, *Welding Journal* 43(1): 10–23.

Tanala, E.; Bourse, G. 1994. Determination of Near Surface Residual Stresses on Welded Joints Using Ultrasonic Methods, *NDT&E International* 28(2): 83–88.

Totten, G. E. 2002. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International. ISBN 0-87170-729-2.

Vakili-Tahami, F.; Sorkhabi, A. H. D. 2009. Finite Element Analysis of Thickness Effect on the Residual Stress in Butt-welded 2.25CrMo Steel, *Journal of Applied Science* 9(7): 1331–1337.

Walaszek, H.; Lieurade, H. P.; Peyrac, C.; Hoblos, J.; Rivenez, J. 2002. Potentialities of Ultrasonic's for Evaluating Residual Stresses: Influence of Microstructure, *Journal of Pressure Vessel Technology* 124: 349–353.

Walaszek, H.; Hoblos, J.; Bouteille, P. 2006. Ultrasonic Stress Measurement: Application to Welded Joints, in *9<sup>th</sup> European Conference on NDT, Berlin, Germany, 2006*, 2–7.

Withers, P.J.; Bhadeshia, H.K. 2001. Residual Stress Measurement Techniques, *Materials Science and Technology* 17: 355–375.

---

## Autoriaus publikacijos disertacijos tema

### Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Jurčius, A.; Valiulis, A. V.; Černašėjus, O.; Kurzydowski, K. J.; Jaskiewicz, A.; Lech-Grega, M. 2010. Influence of Vibratory Stress Relief on Residual Stresses in Weldments and Mechanical Properties of Structural Steel Joint, *Journal of Vibroengineering* 12(1): 133–141. ISSN 1392-8716 (Thomson ISI Web of Science).

Jurčius, A.; Valiulis, A. V.; Kumšlytis, V. 2008a. Vibratory Stress Relieving – It's Advantages as an Alternative to Thermal Treatment, *Journal of Vibroengineering* 10(1): 123–127. ISSN 1392-8716 (Thomson ISI Web of Science).

### Straipsniai kituose leidiniuose

Jurčius, A.; Valiulis, A. V.; Černašėjus, O. 2009b. Effects of Vibration Energy Input on Stress Concentration in Weld and Heat-affected Zone of S355J2 Steel, in *The 5<sup>th</sup> International Conference Mechatronic Systems and Materials MSM2009, Vilnius, Lithuania*, 2009. Solid State Phenomena (Scopus), (priimtas).

Jurčius, A.; Valiulis, A. V. 2009a. Effects of Vibration Energy Input on Stress Concentration in Weld and Heat-affected Zone, in *Proc. of 14<sup>th</sup> International Conference Me-*

chanika 2009, Kaunas, Lithuania, 2009. Kaunas: Technologija, 171–177. ISSN 1822-2951 (Inspec).

Jurčius, A.; Valiulis, A. V. 2008c. Reduce of Material Residual Stresses Using Vibration Energy, in *Proc. of 7<sup>th</sup> International Conference Vibroengineering 2008, Kaunas, Lithuania, 2008*. Kaunas: Technologija, 50–54. ISSN 1822-1262 (Inspec).

Jurčius, A.; Valiulis, A. V.; Kumšlytis, V. 2008a. Vibrational Conditioning of Metals is the Alternative to Classical Thermal Stress Relief, in *Proc. of the 13<sup>th</sup> International Conference Mechanika 2008b, Kaunas, Lithuania, 2008*. Kaunas: Technologija, 202–206. ISSN 1822-2951 (Inspec).

Rumbutis, L.; Jurčius, A.; Višniakas, A. 2009. Konstrukcinio plieno suvirinimo siūlių mechaninių savybių tyrimas naudojant vibracijos energiją suvirinimo metu, iš *Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba*: 12-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2009 m. kovo 25–27 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 1–4. ISBN 9986-05-907-0.

Jurčius, A.; Valiulis, A. V. 2007. Liekamųjų suvirinimo įtempių nustatymo metodai, taikomi vibromechaniškai apdirbus, iš *Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba*: 10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2007 m. balandžio 19–20 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 99–104. ISBN 9986-05-907-0.

Jurčius, A.; Černašėjus, O. 2006. C-Mn plieno suvirinimo siūlių vibromechaninio apdirbimo tyrimas, iš *Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba*: 9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2006 m. balandžio 27–28 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 113–119. ISBN 9986-05-907-0.

---

## Priedai

### **A priedas. Liekamųjų įtempių matavimo technologijų palyginimas**

Šis palyginimas sudarytas remiantis disertacijos tyrimo metu įgautu patyrimu bei literatūroje pateiktais kontrolės metodų aprašymais. Palyginime įvertinta taikyto arba aprašyto metodo praktiškumas, bandymo tikslumas, įrangos kaina, darbo greitis, mobilumas bei darbuotojo kvalifikacija.

**A1 lentelė.** Liekamųjų suvirinimo įtempių matavimo technologijų palyginimas  
**Table A1.** Comparison of residual stress measurement technique

| Metodas                        | Įtempiai                                                      | Matavi-<br>mo gylis       | Taško<br>rezoliucija | Tikslu-<br>mas | Privalumai                                                                                       | Trūkumai                                                                     |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| MMM                            | koncen-<br>tracija                                            | < 5 mm                    | ~ 5 mm               | $\pm 2$ A/m    | Labai greitas,<br>mobilus, gali<br>dirbti lauko<br>sąlygomis                                     | Tik feromagnetinėms medžiagoms, nenurodo įtempių krypties ir dydžio          |
| Barkhausen magnetinio triukšmo | $\sigma^I$<br>$\sigma^{II}$<br>$\sigma^{III}$                 | < 10 mm                   | 1 mm                 | 10 %           | Greitas, mobilus, gali dirbti lauko sąlygomis                                                    | Tik feromagnetinėms medžiagoms, jautrus mikrostruktūros pokyčiams            |
| UT                             | $\sigma^I$<br>$\sigma^{II}$<br>$\sigma^{III}$                 | PIB < 3 mm,<br>TSB > 3 mm | 5 mm                 | 10 %           | Paprastai naudojamas, greitas, pigus, mobilus, gali dirbti lauko sąlygomis                       | Ribotos rezoliucijos, jautrus prispaudimui ir mikrostruktūros pokyčiams      |
| XRD                            | $\sigma^I$<br>$\langle \sigma^{II} \rangle$<br>$\sigma^{III}$ | < 100 $\mu\text{m}$       | 1–3 mm               | $\pm 20$ MPa   | Universalus, plačiai taikomas, greitas, iš dalies mobilus, 3D įtempių atvaizdavimas, bekontaktis | Brangi technologija, tik paviršiniai įtempiai, jautrus paviršiaus paruošimui |
| Neutronų difrakcijos           | $\sigma^I$<br>$\langle \sigma^{II} \rangle$                   | < 25 mm                   | 500 $\mu\text{m}$    | $\pm 25$ MPa   | Gilus prasišverbimas, aukšta rezoliucija, 3D įtempių atvaizdavimas, bekontaktis                  | Brangus, aukštos kvalifikacijos personalas, tik laboratorijos sąlygomis      |
| Kombinuotas: HD/holo davikliai | $\sigma^I$                                                    | ~ 1,2 skylės skersmens    | 50 $\mu\text{m}$     | $\pm 40$ MPa   | Paprastas, plačiai pritaikomas, mobilus, tinka daugeliui medžiagų                                | Pusiau ardomas, ribotas deformacijos jautrumas ir rezoliucija                |
| Kombinuotas HD/DSPI            | $\sigma^I$                                                    | ~ 1,2 skylės skersmens    | 10 $\mu\text{m}$     | $\pm 20$ MPa   | Greitas, paprastas, plačiai pritaikomas, mobilus, tinka daugeliui medžiagų                       | Pusiau ardomas, jautrus aplinkos vibracijai                                  |

## B priedas. Ultragarso sklaidimo greičio bandiniuose matavimų duomenys

**B.1 lentelė.** Liekamųjų suvirinimo įtempių skaičiavimo duomenys

**Table B1.** Data for residual stresses calculation

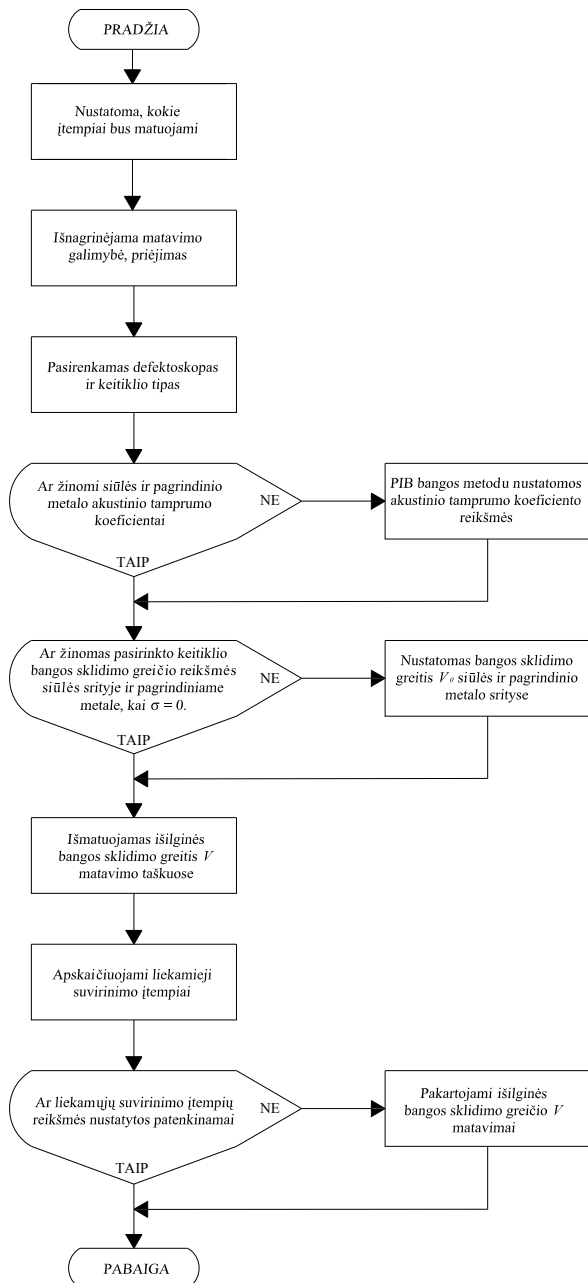
| <i>B1</i>  |               |              |             |                           |                         |                            |               |
|------------|---------------|--------------|-------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------|
| <i>Nr.</i> | <i>V, m/s</i> | <i>l, mm</i> | <i>t, s</i> | <i>V<sub>0</sub>, m/s</i> | <i>t<sub>0</sub>, s</i> | <i>K, MPa<sup>-1</sup></i> | <i>σ, MPa</i> |
| 1          | 5925          | 137,46       | 2,32000E-05 | 5923                      | 2,32078E-05             | -1,37E-05                  | -24,64        |
| 2          | 5926          | 137,47       | 2,31978E-05 | 5923                      | 2,32095E-05             | -1,37E-05                  | -36,95        |
| 3          | 5927          | 137,47       | 2,31939E-05 | 5923                      | 2,32095E-05             | -1,37E-05                  | -49,26        |
| 4          | 5932          | 137,48       | 2,31760E-05 | 5923                      | 2,32112E-05             | -1,37E-05                  | -110,74       |
| 5          | 5925          | 137,48       | 2,32034E-05 | 5937                      | 2,31565E-05             | -1,62E-05                  | 125,33        |
| 6          | 5906          | 137,47       | 2,32763E-05 | 5937                      | 2,31548E-05             | -1,62E-05                  | 324,81        |
| 7          | 5926          | 137,47       | 2,31978E-05 | 5937                      | 2,31548E-05             | -1,62E-05                  | 114,87        |
| 8          | 5933          | 137,48       | 2,31721E-05 | 5923                      | 2,32112E-05             | -1,37E-05                  | -123,03       |
| 9          | 5928          | 137,48       | 2,31916E-05 | 5923                      | 2,32112E-05             | -1,37E-05                  | -61,57        |
| 10         | 5926          | 137,48       | 2,31995E-05 | 5923                      | 2,32112E-05             | -1,37E-05                  | -36,95        |
| 11         | 5926          | 137,49       | 2,32011E-05 | 5923                      | 2,32129E-05             | -1,37E-05                  | -36,95        |
| <i>B2</i>  |               |              |             |                           |                         |                            |               |
| <i>Nr.</i> | <i>V, m/s</i> | <i>l, mm</i> | <i>t, s</i> | <i>V<sub>0</sub>, m/s</i> | <i>t<sub>0</sub>, s</i> | <i>K, MPa<sup>-1</sup></i> | <i>σ, MPa</i> |
| 1          | 5926          | 136,21       | 2,29852E-05 | 5923                      | 2,29968E-05             | -1,37E-05                  | -36,95        |
| 2          | 5927          | 136,22       | 2,29830E-05 | 5923                      | 2,29985E-05             | -1,37E-05                  | -49,26        |
| 3          | 5926          | 136,22       | 2,29868E-05 | 5923                      | 2,29985E-05             | -1,37E-05                  | -36,95        |
| 4          | 5927          | 136,23       | 2,29846E-05 | 5923                      | 2,30002E-05             | -1,37E-05                  | -49,26        |
| 5          | 5935          | 136,21       | 2,29503E-05 | 5937                      | 2,29426E-05             | -1,62E-05                  | 20,85         |
| 6          | 5928          | 136,21       | 2,29774E-05 | 5937                      | 2,29426E-05             | -1,62E-05                  | 93,95         |
| 7          | 5934          | 136,22       | 2,29558E-05 | 5937                      | 2,29442E-05             | -1,62E-05                  | 31,28         |
| 8          | 5928          | 136,23       | 2,29808E-05 | 5923                      | 2,30002E-05             | -1,37E-05                  | -61,57        |
| 9          | 5927          | 136,23       | 2,29846E-05 | 5923                      | 2,30002E-05             | -1,37E-05                  | -49,26        |
| 10         | 5927          | 136,24       | 2,29863E-05 | 5923                      | 2,30019E-05             | -1,37E-05                  | -49,26        |
| 11         | 5925          | 136,25       | 2,29958E-05 | 5923                      | 2,30035E-05             | -1,37E-05                  | -24,64        |

### B.1 lentelės pabaiga

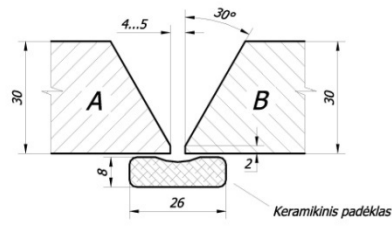
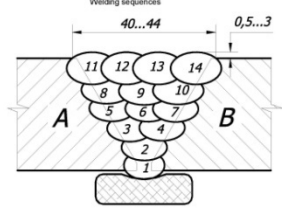
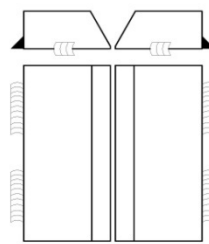
| B3  |           |          |             |             |             |                         |                |
|-----|-----------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|----------------|
| Nr. | $V$ , m/s | $l$ , mm | $t$ , s     | $V_0$ , m/s | $t_0$ , s   | $K$ , MPa <sup>-1</sup> | $\sigma$ , MPa |
| 1   | 5925      | 137,83   | 2,32624E-05 | 5923        | 2,32703E-05 | -1,37E-05               | -24,65         |
| 2   | 5927      | 137,83   | 2,32546E-05 | 5923        | 2,32703E-05 | -1,37E-05               | -49,29         |
| 3   | 5928      | 137,82   | 2,32490E-05 | 5923        | 2,32686E-05 | -1,37E-05               | -61,62         |
| 4   | 5929      | 137,83   | 2,32468E-05 | 5923        | 2,32703E-05 | -1,37E-05               | -73,94         |
| 5   | 5934      | 137,84   | 2,32289E-05 | 5937        | 2,32171E-05 | -1,62E-05               | 31,27          |
| 6   | 5927      | 137,85   | 2,32580E-05 | 5937        | 2,32188E-05 | -1,62E-05               | 104,23         |
| 7   | 5933      | 137,85   | 2,32345E-05 | 5937        | 2,32188E-05 | -1,62E-05               | 41,69          |
| 8   | 5928      | 137,84   | 2,32524E-05 | 5923        | 2,32720E-05 | -1,37E-05               | -61,62         |
| 9   | 5927      | 137,86   | 2,32597E-05 | 5923        | 2,32754E-05 | -1,37E-05               | -49,29         |
| 10  | 5927      | 137,87   | 2,32613E-05 | 5923        | 2,32771E-05 | -1,37E-05               | -49,29         |
| 11  | 5926      | 137,87   | 2,32653E-05 | 5923        | 2,32771E-05 | -1,37E-05               | -36,97         |
| B4  |           |          |             |             |             |                         |                |
| Nr. | $V$ , m/s | $l$ , mm | $t$ , s     | $V_0$ , m/s | $t_0$ , s   | $K$ , MPa <sup>-1</sup> | $\sigma$ , MPa |
| 1   | 5925      | 137,16   | 2,29080E-05 | 5923        | 2,29158E-05 | -1,37E-05               | -24,65         |
| 2   | 5925      | 137,17   | 2,29063E-05 | 5923        | 2,29141E-05 | -1,37E-05               | -24,65         |
| 3   | 5927      | 137,16   | 2,28986E-05 | 5923        | 2,29141E-05 | -1,37E-05               | -49,29         |
| 4   | 5930      | 137,15   | 2,28904E-05 | 5923        | 2,29174E-05 | -1,37E-05               | -86,27         |
| 5   | 5929      | 137,15   | 2,28959E-05 | 5937        | 2,28651E-05 | -1,62E-05               | 83,38          |
| 6   | 5920      | 137,16   | 2,29324E-05 | 5937        | 2,28668E-05 | -1,62E-05               | 177,19         |
| 7   | 5928      | 137,16   | 2,29015E-05 | 5937        | 2,28668E-05 | -1,62E-05               | 93,81          |
| 8   | 5931      | 137,15   | 2,28916E-05 | 5923        | 2,29225E-05 | -1,37E-05               | -98,59         |
| 9   | 5928      | 137,14   | 2,28981E-05 | 5923        | 2,29174E-05 | -1,37E-05               | -61,62         |
| 10  | 5926      | 137,14   | 2,29058E-05 | 5923        | 2,29174E-05 | -1,37E-05               | -36,97         |
| 11  | 5925      | 137,12   | 2,29097E-05 | 5923        | 2,29174E-05 | -1,37E-05               | -24,65         |

$V$  – ultragarso bangos sklaidimo greitis matavimo taške;  
 $l$  – ultragarso bangos nueitas kelias bandinyje;  
 $t$  – bangos sklaidimo laikas bandinyje;  
 $V_0$  – ultragarso bangos sklaidimo greitis, kai įtempiai lygūs nuliui;  
 $t_0$  – bangos sklaidimo laikas bandinyje, kai įtempiai lygūs nuliui;  
 $K$  – akustinio tamprumo konstanta;  
 $\sigma$  – įtempiai.

## C priedas. Įtempių matavimo ultragarsu algoritmas



## D priedas. Suvirinimo procedūros aprašas

|                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                               |                                                                                                                     |                                        |                                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                           |                                               | <b>Suvirinimo procedūrų aprašas</b><br>Welding procedure specification<br>(SPA sudarytas pagal LST EN ISO 15609-1)  |                                        | <b>SPA Nr.</b> 09/01<br><b>WPS Nr.</b> LT/013/562/09<br><b>WPCR Nr.</b><br><b>Data</b> 2009-08-18                                                                                    |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Gamintojas</b> AB „MONTUOTOJAS“<br><b>Užsakovas</b> VGTU                                                                                                                                                                                                                                |                                               | <b>Objektas</b> Mokslinių tyrimų bandinio 140x140x30 suvirinimas.<br>Vibracinis įtempimų atleidimas suvirinimo metu |                                        |                                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Elementų matmenys</b><br>Elements measurement                                                                                                                                                                                                                                           | <b>Metalas</b><br>Metal                       | <b>Grupė</b><br>Group                                                                                               | <b>Standartas</b><br>Standard          | <b>Elementų matmenys</b><br>Elements measurement                                                                                                                                     | <b>Metalas</b><br>Metal                                                             | <b>Grupė</b><br>Group                            | <b>Standartas</b><br>Standard           |                                          |                                |
| <b>A</b><br>t - 30<br>Ø -                                                                                                                                                                                                                                                                  | S355J2                                        | 1.2                                                                                                                 | LST EN 10025-2                         | <b>B</b><br>t - 30<br>Ø -                                                                                                                                                            | S355J2                                                                              | 1.2                                              | LST EN 10025-2                          |                                          |                                |
| <b>Jungties tipas</b><br>Type of joint                                                                                                                                                                                                                                                     | Sandūrinis                                    | pagal LST EN ISO 17659                                                                                              |                                        | <b>Suvirinimo būdas</b><br>Welding process                                                                                                                                           | 135                                                                                 | pagal LST EN ISO 4063                            |                                         |                                          |                                |
| <b>Siūlės tipas</b><br>Type of weld                                                                                                                                                                                                                                                        | BW                                            | pagal LST EN ISO 17659                                                                                              |                                        | <b>Apsauginės dujos</b><br>Shielding gas                                                                                                                                             | C1 arba M21                                                                         | pagal LST EN 439                                 |                                         |                                          |                                |
| <b>Suvirinimo padėtis</b><br>Welding position                                                                                                                                                                                                                                              | PA                                            | pagal LST EN ISO 6947                                                                                               |                                        | <b>Volframo elektrodas</b><br>Type of tungsten electrode                                                                                                                             | -----                                                                               |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Jungties paruošimas</b><br>Joint design                                                                                                                                                                                                                                                 |                                               |                                                                                                                     |                                        | <b>Suvirinimo eiliškumas ir siūlės forma</b><br>Welding sequences                                                                                                                    |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
|                                                                                                                                                                                                           |                                               |                                                                                                                     |                                        |                                                                                                     |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Briaunų paruošimas:</b> pagal 1.4 - LST EN ISO 9692-1:2004<br><b>Briaunų paviršius:</b> vidiniai ir išoriniai paviršiai (apie 20 mm nuo kraštų) turi būti mechanškai apdirbti iki metalinio blizgesio. Ant sujungimų kraštų neturi būti dažų, tepalo, rūdžių, nuodegų ar kitų medžiagų. |                                               |                                                                                                                     |                                        | 1. Sukabinimą atlikti žemiau pateikta schema.<br>2. Lanką uždegti tik ant technologinės plokštelės.<br>3. Nutrūkus lankui, prieš suvirinimą, mechaniniu šlifavimu pašalinti kraterį. |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Pridėtinis metalas</b><br>The filler metal                                                                                                                                                                                                                                              |                                               |                                                                                                                     |                                        |                                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Indeksas</b><br>Index                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>Pavadinimas</b><br>Name                    | <b>Gamintojas</b><br>Manufacturer                                                                                   | <b>Klasifikacija</b><br>Classification | <b>Standartas</b><br>Standard                                                                                                                                                        | <b>Iškaitinimas</b><br>Redrying                                                     | <b>Laikymas</b><br>Keep in thermos               |                                         |                                          |                                |
| W                                                                                                                                                                                                                                                                                          | OK AristoRod 12.50                            | ESAB                                                                                                                | G3S1                                   | LST EN 440                                                                                                                                                                           | -                                                                                   | -                                                |                                         |                                          |                                |
| <b>Suvirinimo parametrai</b><br>Parameters of welding                                                                                                                                                                                                                                      |                                               |                                                                                                                     |                                        |                                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Ėjimas</b><br>Run                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Suvirinimo procesas</b><br>Welding process | <b>Pridėtinis metalas</b><br>The filler metal                                                                       |                                        | <b>Srovė</b><br>Current                                                                                                                                                              | <b>Suvirinimo greitis</b><br>Welding speed                                          | <b>Veios pastūmos greitis</b><br>Wire feed speed | <b>Dujų debitas, l/min</b><br>Gas debit |                                          |                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                               | <b>Indeksas</b><br>Index                                                                                            | <b>Ø, mm</b>                           |                                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                  | <b>A</b>                                | <b>Tipas/poliškumas</b><br>Type/polarity | <b>Apsauginis</b><br>Shielding |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 135                                           | W                                                                                                                   | 1,2                                    | 170-220                                                                                                                                                                              | DC/+                                                                                | 16                                               | 6                                       | 15                                       | -                              |
| 2-14                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 135                                           | W                                                                                                                   | 1,2                                    | 190-250                                                                                                                                                                              | DC/+                                                                                | 17                                               | 7                                       | 16                                       | -                              |
| <b>Aplinkos temperatūra</b><br>Ambient temperature                                                                                                                                                                                                                                         |                                               |                                                                                                                     |                                        |                                                                                                   |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Pašildymo temperatūra</b><br>Preheating temperature                                                                                                                                                                                                                                     |                                               |                                                                                                                     |                                        |                                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Tarpėjiminė temperatūra</b><br>Interpass temperature                                                                                                                                                                                                                                    |                                               |                                                                                                                     |                                        |                                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Temperatūros kontrolės priemonės</b><br>Equipment of temperature measurement                                                                                                                                                                                                            |                                               |                                                                                                                     |                                        |                                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Pašildymo priemonės</b><br>Preheating equipment                                                                                                                                                                                                                                         |                                               |                                                                                                                     |                                        |                                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Papildomos priemonės</b><br>Additional equipment                                                                                                                                                                                                                                        |                                               |                                                                                                                     |                                        |                                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Vibracinis apdirbimas</b><br>Vibration treatment                                                                                                                                                                                                                                        |                                               |                                                                                                                     |                                        | <b>Sukabinimas</b><br>35...40 mm                                                                                                                                                     |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Rezonansas</b><br>Resonance                                                                                                                                                                                                                                                             |                                               |                                                                                                                     |                                        | 86,6 Hz                                                                                                                                                                              |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Apdirbimas</b><br>Treatment                                                                                                                                                                                                                                                             |                                               |                                                                                                                     |                                        | 83 Hz suvirinimo metu; 84,4 Hz po suvirinimo                                                                                                                                         |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Išlaikymas</b><br>Holding                                                                                                                                                                                                                                                               |                                               |                                                                                                                     |                                        | Po suvirinimo VSR nutrūkti tik bandiniui atvėsus iki 100° C                                                                                                                          |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>Pastaba</b><br>Note                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                               |                                                                                                                     |                                        |                                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| Suvirinimo srityje būtina apsaugoti nuo skersvėjų ir atmosferinių kritulių. Po suvirinimo suvirintos sritys turi būti nuvalytos ir pašalinti bet kokie likučiai, šlakas, pūslės ir pan.                                                                                                    |                                               |                                                                                                                     |                                        |                                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                  |                                         |                                          |                                |
| <b>SPA sudarė</b><br>WPS made                                                                                                                                                                                                                                                              |                                               | <b>Suvirinimo priežiūros meistras</b><br>Felixas KAVALIAUSKAS                                                       |                                        |                                                                                                                                                                                      | <b>SPA patikrino</b><br>WPS check                                                   |                                                  | <b>Užsakovo atstovas</b><br>Customer    |                                          |                                |
|                                                                                                                                                                                                         |                                               | AB „MONTUOTOJAS“<br>Welding engineer<br>Aurimas JURČIUS                                                             |                                        |                                                                                                                                                                                      |  |                                                  |                                         |                                          |                                |

**E.1 lentelė.** Liekamųjų įtempių skaičiavimo kintamieji, matuojant *XRD* metodu  
**Table E1.** Variables of residual stresses calculations by *XRD* technique

| 1 detektorius |        |               |          |           |               |        |      |          |
|---------------|--------|---------------|----------|-----------|---------------|--------|------|----------|
| $\beta$       | $\psi$ | $\sin^2 \psi$ | $d$      | $2\theta$ | $\varepsilon$ | $FWHM$ | $b$  | $I$      |
| 30,00         | 18,20  | 0,0976        | 1,169114 | 156,61    | -0,368        | 3,09   | 3,47 | 0,284538 |
| 24,80         | 13,00  | 0,0506        | 1,169318 | 156,52    | -0,193        | 3,15   | 3,51 | 0,302750 |
| 19,29         | 7,49   | 0,0170        | 1,169446 | 156,46    | -0,084        | 3,08   | 3,43 | 0,312897 |
| 11,80         | -0,00  | 0,0000        | 1,169545 | 156,41    | 0,000         | 2,97   | 3,40 | 0,319644 |
| 5,55          | -6,25  | 0,0118        | 1,169532 | 156,42    | -0,011        | 2,96   | 3,38 | 0,299022 |
| 0,00          | -11,80 | 0,0418        | 1,169562 | 156,40    | 0,015         | 3,05   | 3,52 | 0,278288 |
| -5,55         | -17,34 | 0,0888        | 1,169501 | 156,43    | -0,037        | 3,02   | 3,37 | 0,268122 |
| -11,80        | -23,59 | 0,1602        | 1,169250 | 156,55    | -0,252        | 2,99   | 3,45 | 0,245626 |
| -19,29        | -31,08 | 0,2665        | 1,168969 | 156,68    | -0,492        | 2,92   | 3,52 | 0,224418 |
| -24,80        | -36,59 | 0,3553        | 1,168666 | 156,83    | -0,751        | 2,78   | 3,27 | 0,236939 |
| -30,00        | -41,80 | 0,4442        | 1,168422 | 156,94    | -0,960        | 2,69   | 3,18 | 0,238323 |
| 2 detektorius |        |               |          |           |               |        |      |          |
| $\beta$       | $\psi$ | $\sin^2 \psi$ | $d$      | $2\theta$ | $\varepsilon$ | $FWHM$ | $b$  | $I$      |
| 30,00         | 41,80  | 0,4442        | 1,168530 | 156,89    | -0,867        | 2,94   | 3,36 | 0,284226 |
| 24,80         | 36,59  | 0,3553        | 1,168851 | 156,74    | -0,593        | 2,81   | 3,27 | 0,316614 |
| 19,29         | 31,08  | 0,2665        | 1,168975 | 156,68    | -0,487        | 2,76   | 3,24 | 0,342201 |
| 11,80         | 23,59  | 0,1602        | 1,169267 | 156,54    | -0,237        | 2,79   | 3,28 | 0,353676 |
| 5,55          | 17,34  | 0,0888        | 1,169431 | 156,46    | -0,097        | 2,78   | 3,32 | 0,369920 |
| 0,00          | 11,80  | 0,0418        | 1,169493 | 156,43    | -0,044        | 2,79   | 3,25 | 0,388752 |
| -5,55         | 6,25   | 0,0118        | 1,169580 | 156,39    | 0,030         | 2,78   | 3,33 | 0,403020 |
| -11,80        | 0,00   | 0,0000        | 1,169545 | 156,41    | 0,000         | 2,65   | 3,14 | 0,424242 |
| -19,29        | -7,49  | 0,0170        | 1,169580 | 156,39    | 0,030         | 2,78   | 3,31 | 0,368487 |
| -24,80        | -13,00 | 0,0506        | 1,169575 | 156,40    | 0,026         | 2,71   | 3,24 | 0,343077 |
| -30,00        | -18,20 | 0,0976        | 1,169453 | 156,45    | -0,078        | 2,79   | 3,31 | 0,333576 |

$\beta$  – detektoriaus posvyrio kampas nuo pradinės padėties;  
 $\psi$  – kampas tarp krintančio srauto ir bandinio normalių;  
 $d$  – tarpatominis tarpelis (matuojamas angstromais,  $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm}$ );  
 $2\theta$  – difrakcijos kampas;  
 $\varepsilon$  – atominės gardelės deformacija;  
 $FWHM$  – plotis esantis ties puse difrakcijos piko aukščio;  
 $b$  – piko plokštumos integralas, t. y. piko kreivės plotas padalintas iš piko aukščio;  
 $I$  – jonizuojančių spindulių intensyvumas.

## F priedas. Vibracinio apdorojimo protokolas Nr. 1

| META-LAX <sup>®</sup> Provider                                                                                                                                                      |               | Customer                                                                                                                                                          |                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| JSC MONTUOTOJAS                                                                                                                                                                     |               | VGTU<br>Basanaviciaus g. 28<br>Vilnius, 03224<br>Tel#: +37061888306<br>Aurimas Jurcius                                                                            |                                       |
| Part(s)                                                                                                                                                                             |               | Settings                                                                                                                                                          |                                       |
| Part: 1 thru 1<br>WO#: 1<br>Serial#: none<br>Part Name: VSR suvirinimo metu<br>Material/Type: Plienas S355J2<br>Size: x x in<br>Weight: 350 kg<br>Cold Worked: Nc                   |               | Location: 1 of 1<br>Force Inducer: 2A<br>Material Class: A Steel<br>Batch Weight: 350 kg<br>Mode: Manual Weld Conditioning<br>Cool Timer: 5 min<br>Eccentric: 30% |                                       |
| META-LAX <sup>®</sup> Weld Conditioning Certification                                                                                                                               |               |                                                                                                                                                                   |                                       |
| <p>Amplitude</p> <p>Digital Gain: 10</p> <p>FREQUENCY (Hz)</p>                                                                                                                      |               |                                                                                                                                                                   |                                       |
| Scan Results                                                                                                                                                                        |               |                                                                                                                                                                   |                                       |
| All Scans Completed                                                                                                                                                                 | First Scan    | Final Scan                                                                                                                                                        | Scan Results                          |
| Harmonic Frequency:                                                                                                                                                                 | 86.6 Hz       | 87.4 Hz                                                                                                                                                           | Harmonic Frequency Difference: 0.8 Hz |
| Peak Amplitude:                                                                                                                                                                     | 82.1          | 102.2                                                                                                                                                             | Peak Amplitude Difference: 20.1       |
| SUB-Harmonic Frequency:                                                                                                                                                             | 84.4 Hz       | 84.4 Hz                                                                                                                                                           | Total Weld Time: 25:00                |
| Date & Time: 18/08/2009 10:35:44                                                                                                                                                    | Final Dwell % | 21                                                                                                                                                                | Total Cool Time: 0:00                 |
| META-LAX <sup>®</sup> Provider                                                                                                                                                      |               | Job Notes                                                                                                                                                         |                                       |
| JSC MONTUOTOJAS<br>Naugarduko 34<br>Vilnius, 03228<br>Tel#: +370 5 213 50 48<br>Fax#: +370 5 213 67 28<br>Opr: Feliksas Kavaliauskas                                                |               |                                                                                                                                                                   |                                       |
| <small>META-LAX<sup>®</sup> is a registered trademark of Bonal Technologies, Inc. Form and Software Copyright © 2001-2006, by Bonal Technologies, Inc. All rights reserved.</small> |               |                                                                                                                                                                   |                                       |

## G priedas. Vibracinio apdorojimo protokolas Nr. 2

| META-LAX <sup>®</sup> Provider                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |               | Customer                                                                                                                                                                                 |                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| JSC MONTUOTOJAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |               | VGTU<br>Basanaviciaus g. 28<br>Vilnius, 03224<br>Tel#: +37061888306<br>Aurimas Jurcius                                                                                                   |                                       |
| Part(s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |               | Settings                                                                                                                                                                                 |                                       |
| Part: 1 thru 1<br>WO#: 1<br>Serial#: 1<br>Part Name: VSR po suvirinimo<br>Material/Type: Plienas S355J2<br>Size: x x in<br>Weight: 350 kg<br>Cold Worked: No                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |               | Location: 1 of 1<br>Force Inducer: 2A<br>Material Class: A Steel<br>Batch Weight: 350 kg<br>Mode: Manual Stress Relief<br>Dwell Timer: 25 min<br>Monitor Timer: 10 min<br>Eccentric: 30% |                                       |
| META-LAX <sup>®</sup> Stress Relief Certification                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |               |                                                                                                                                                                                          |                                       |
| <p>Amplitude vs Frequency (Hz) graph showing two curves (1 and 2) representing stress relief results. The y-axis is labeled 'AMPLITUDE' and ranges from 0 to 130. The x-axis is labeled 'FREQUENCY (Hz)' and ranges from 0 to 120. Curve 1 (red) peaks at approximately 100 amplitude at 85.4 Hz. Curve 2 (black) peaks at approximately 100 amplitude at 84.3 Hz. The background includes the META-LAX logo and text: 'Stress Relief &amp; Yield Conditioning' and 'Manufactured by BONAL TECHNOLOGIES'.</p> |               |                                                                                                                                                                                          |                                       |
| Scan Results                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |               |                                                                                                                                                                                          |                                       |
| Total Scans Completed: 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | First Scan    | Final Scan                                                                                                                                                                               | Scan Results                          |
| Harmonic Frequency:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 84.3 Hz       | 85.4 Hz                                                                                                                                                                                  | Harmonic Frequency Difference: 1.1 Hz |
| Peak Amplitude:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 100.0         | 100.0                                                                                                                                                                                    | Peak Amplitude Difference: 0.0        |
| SUB-Harmonic Frequency:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 79.6 Hz       | 82.5 Hz                                                                                                                                                                                  | Total Dwell Time: 26:20               |
| Date & Time: 18/08/2009 08:49:47                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Final Dwell % | 25                                                                                                                                                                                       | Total Monitor Time: 10:00             |
| META-LAX <sup>®</sup> Provider                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |               | Job Notes                                                                                                                                                                                |                                       |
| JSC MONTUOTOJAS<br>Naugarduko 34<br>Vilnius, 03228<br>Tel#: +370 5 213 50 48<br>Fax#: +370 5 213 67 28<br>Opr: Feliksas Kavaliauskas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |               |                                                                                                                                                                                          |                                       |
| <small>Meta-Lax<sup>®</sup> is a registered trademark of Bonal Technologies, Inc. Form and Software Copyright © 2001-2006, by Bonal Technologies, Inc. All rights reserved.</small>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |               |                                                                                                                                                                                          |                                       |

Aurimas JURČIUS

KONSTRUKCINIO PLIENO LIEKAMŲJŲ SUVIRINIMO ĮTEMPIŲ  
VIBRACINIO ATLEIDIMO TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,  
mechanikos inžinerija (09T)

Aurimas JURČIUS

EFFECT OF VIBRATORY TREATMENT ON RESIDUAL STRESSES  
IN STRUCTURAL STEEL WELDMENTS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,  
Mechanical Engineering (09T)

2010 04 19. 12,50 sp. I. Tiražas 20 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto  
leidykla „Technika“,  
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,  
<http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino UAB „Biznio mašinų kompanija“,  
J. Jasinskio g. 16A, 01112 Vilnius,  
<http://www.bmk.lt>