

## KONSTRUKCINIO PLIENO SUVIRINIMO SIŪLIŲ MECHANINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS SUVIRINIMO METU NAUDOJANT VIBRACIJOS ENERGIJĄ

Laurynas Rumbutis<sup>1</sup>, Ivanas Višniakas<sup>2</sup>, Aurimas Jurčius<sup>3</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: <sup>1</sup>suvir@vgtu.lt; <sup>2</sup>ivanas.visniakas@vgtu.lt

**Santrauka.** Darbe nagrinėjamos statybinio konstrukcinio plieno S355J2 (LST EN 10025) suvirintųjų jungčių mechaninės savybės, suvirinant vibracijos energija. Bandiniai buvo suvirinami pusautomatiu apsauginių dujų aplinkoje CO<sub>2</sub>, naudojant pridėtinę vielą ESAB OK 12.51. Suvirinant taikomi keli vibracijos energijos intensyvumo lygiai. Vibraciniam apdirbimui naudota JAV kompanijos „Bonaf“ patentuota įranga „MetaLax 2725“. Siekiant ištirti vibracijos energijos poveikį suvirinimo siūlei buvo atlikta radiografinė kontrolė, tempimo, smūginio tašumo ir kietumo mechaniniai bandymai.

**Reikšminiai žodžiai:** vibracijos energija, suvirinimas, konstrukcinis plienas.

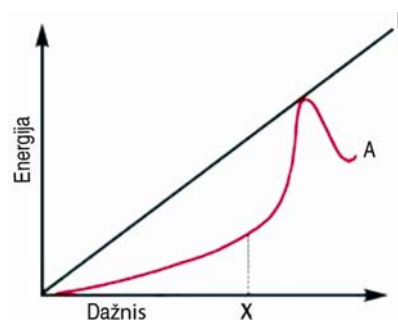
### Įvadas

Liekamieji įtempiai gali būti pagrindinė priežastis, dėl ko metalinė konstrukcija suyra į dvi ar net daugiau dalių, nors jos ir neveikia jokia išorinė apkrova. Tai leidžia teigti, kad, norint apsaugoti gaminį nuo nenumatyto ir staigaus suirimo, reikia skirti daug dėmesio liekamiesiems įtempiams ir jų mažinimo būdams. Šiuos įtempius lemia netolygi plastinė deformacija, atsirandanti mechaninio apdorojimo (lenkimo, formavimo, valcavimo, pjovimo) ar terminio proceso (suvirinimo) metu. Susikaupe liekamieji įtempiai tarp gretimų tos pačios dalies sričių jas iškraipo, t. y. atsiranda deformacijų. Įtempiai koncentruojasi ties metale esančiais defektais ir sudaro galimybę susidaryti įtrūkiams. Liekamuosius įtempius sunku rasti, išmatuoti ir nepaprastai sudėtinga apskaičiuoti.

Europos metalo konstrukcijų gamybos standartuose nurodyta, kad, siekiant prailginti konstrukcijos darbo laiką, po metalo formavimo ar suvirinimo būtina atlikti liekamųjų įtempių atpalaidavimą. Iki šiol tam taikytas terminis apdorojimas (TA), tačiau TA reikalauja didelių energijos, terminės izoliacijos medžiagų ir darbo sąnaudų. Šiuo metu pasaulyje taikomas nenaujas, tačiau neseniai patobulintas efektyvus įtempių mažinimo metodas – vibracinis apdorojimas (toliau – VSR). Vibracijos energija gali stabilizuoti ir sumažinti įtempius bet kuriuo laiku gaminant konstrukciją ar atliekant mechaninį apdirbimą nekeisdama struktūros, spalvos, nesukeldama deformacijų, neiškraipydama gaminio matmenų ir be nuodegų. Visa tai pasiekama mažiausiomis laiko, darbo ir energijos sąnaudomis.

Vibracijos proceso metu metalinei konstrukcijai galiniais nešiojamaisiais vibratoriais sukeliama rezonavimo ar subrezonavimo būseną. Apdirbimo laikas priklauso nuo mechaninių konstrukcijos medžiagos savybių, konstrukcijos svorio ir elementų storio. Paprastai tai trunka 0,5–1,5 valandos esant vibracijos dažniui 10–120 Hz. Tinkamai pastačius vibratorių, izoliacijos padėklus ir parinkus optimalius apdirbimo režimus, pasiekiami geresni rezultatai, nei taikant terminį įtempių mažinimo metodą. Vibracijos energija suvirinimo metu gerokai sumažina suvirinimo deformacijas, suvirinimo įtrūkių atsiradimą auštant metalui, porų ir įpjovų susidarymą, pastebimai didėja jungties elastingumas, smūginis tašumas.

Į paveikslą pateikta vibracijos energijos absorbcijos kreivė, kurioje matyti rezonanso pikas, t. y. kai konstrukcija nebepajėgia priešintis vibracijos energijai ir įvyksta rezonansas. Darbinis liekamųjų suvirinimo įtempių mažinimo taškas, esantis ties  $X$  žyme, vadinamas subrezonansiniu tašku. Kai konstrukcija virpa rezonanso piko arba dar didesniu dažniu, tuomet gali susidaryti plastinės deformacijos ar ji gali net suirti.



1 pav. Vibracijos energijos absorbcijos kreivė

Fig. 1. Absorption curve of vibration energy

Konstrukcijos rezonanso dažnį galima skaičiuoti pagal formulę

$$Dažnis = \frac{SS \cdot S \cdot E}{\frac{VW + EW}{VL} \cdot L},$$

čia  $SS$  – atraminė sistema;  $S$  – stiprumas;  $E$  – tamprumas;  $VW$  – vibruojamas svoris;  $EW$  – ekscentrinis svoris;  $VL$  – vibracijos lokacija;  $L$  – ilgis.

Vibracija suvirinimo metu labiausiai suderinama su MMA, MIG, MAG ir TIG suvirinimo procesais. Su kitais suvirinimo metodais VSR taikymas problemiškas.

### Tyrimų metodika

Tyrimams buvo pasirinktas 12 mm storio neanglingasis lėto stingimo konstrukcinis plienas S355J2, pasižymintis geru suvirinamumu, kuris naudojamas statybinėms metalinėms suvirintoms konstrukcijoms gaminti. Plokštelių briaunos, paruoštos su „V“ formos nuosklembomis, paviršius nuvalytas ir kur reikia pašlifuoti nešvarumai. Plokštelės (300×150×12 mm) suvirinamos tarpusavyje esant žemutinei padėčiai apsauginių CO<sub>2</sub> dujų aplinkoje MAG (135) būdu. 1-ajam ir 2-ajam bandiniams suvirinti naudota vibracija, o 3-ajam – visiškai nenaudota (1 lentelė).

#### 1 lentelė. Suvirinti bandiniai

Table 1. Welded specimens

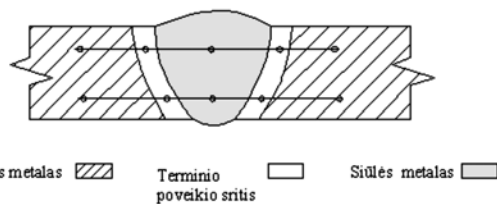
Bandinys	Apdirbimo metodas	Pastabos
1	VSR suvirinimo metu 75 Hz, e = 40 %	Apdirbtas pagal „Metalax“ technologiją, t. y. suvirinimo metu vibracijos taškas buvo apie 5–10 % iki subrezonanso amplitudės. Labai gerai atliktas bandymas. Visiškai įvirinta.
2	VSR suvirinimo metu 84,6 Hz, e = 35 %	Suvirinimo metu vibracijos amplitudės taškas buvo 50 % už subrezonansinės amplitudės. Suvirinta gerai, visiškai įvirinta, tačiau šaknyje matomas perteklinis metalo įvirinimas, suvirinimo lankas sutrūkinėjęs.
3	Be vibracijos	Suvirinta kokybiškai nenaudojant vibracijos. Visiškai įvirinta.

Visos plokštelės suvirintos vienodomis sąlygomis, t. y.:

- plokštelės šešiose vietose prikabinotos prie atramos;
- po suvirinimo laikytos prikabinotos tol, kol suvirinimo siūlė atvės iki 100 °C;
- suvirinama trimis etapais, esant vienodiems režimams;
- po suvirinimo nuvalytas šlakas.

Po suvirinimo sujungimų vidiniams defektams nustatyti buvo atlikta radiografinė kontrolė pagal LST EN 1435:1998 („Virintinių siūlių neardomoji kontrolė. Suvirintųjų sujungimų radiografinė kontrolė“) ir defektų įvertinimas pagal LST EN ISO 5817:2007 („Suvirinimas. Plieno, nikelio, titano ir jų lydinių lydomojo suvirinimo (išskyrus pluoštinį suvirinimą) jungtys. Kokybės lygiai defektų atžvilgiu“) standartų reikalavimus. Radiografinę suvirintųjų sujungimų kontrolę sertifikuotu defektoskopu atliko asmenys, turintys antrą kvalifikacijos lygį. Kontrolei naudotas ERESKO 42 MF2 markės įrenginys. Šis kontrolės būdas padeda nustatyti vidinius defektus.

Po radiografinės kontrolės iš suvirintų plokštelių buvo išpjauti specialūs mažesni bandinukai smūginio tūsumo ir kietumo bandymams atlikti. Kietumo matavimai atlikti Vikerso metodu pagal LST EN 1043-1:1998 („Metalinės medžiagos. Virintinių siūlių ardomieji bandymai. Kietumo bandymas. 1 dalis. Lankinio suvirinimo sujungimų kietumo bandymas“) ir LST EN ISO 6507-1:2005 („Metalai. Vikerso kietumo nustatymas. 1 dalis. Bandymo metodas“) standartų reikalavimus. Kietumo bandymams buvo pagaminta po vieną bandinuką, kuriuose nustatytas pagrindinio metalo kietumas, terminio poveikio zonos kietumas ir siūlės metalo kietumas (2 pav.). Bandinio matuojamosios plokštumos paviršius buvo šlifuojamas ir poliruojamas. Kietumui matuoti kiekviename ruože atlikta po penkis bandymus. Atstumai tarp išpaudų siūlės metale parinkti taip, kad pagal gautus rezultatus būtų galima įvertinti suvirintosios jungties kietumą. Apskaičiuotas kiekvienos zonos gautų rezultatų vidurkis.



2 pav. Kietumo matavimo tvarka

Fig. 2. Technique of hardness measurement

Smūginio tūsumo bandymams iš kiekvienos suvirintos plokštelės pagaminta po tris mažesnius bandinukus (55×10×10 mm) su „V“ formos įpjova. Bandinukų smūginio tūsumo bandymai atlikti pagal LST EN 10045-1:1998 („Metalinės medžiagos. Šarpio smūginio tūsumo bandymas. 1 dalis. Bandymo metodas“) ir LST EN 875:1998 („Metalinės medžiagos. Ardomieji siūlių bandymai. Smūginio tūsumo bandymai. Bandinių vieta, įpjovos orientacija ir tyrimas“) standartų reikalavimus. Smūginio tūsumo bandymu galima nustatyti tūsojo ir šaltojo trapumo ribas.

## Tyrimų rezultatai

### Radiografiniai tyrimų rezultatai

Atlikus suvirintų bandinių radiografinius tyrimus vidinių defektų neaptikta, tačiau antrajame bandinyje, kuriame vibracijos taškas buvo apie 50 % už subrezonanso amplitudės, akivaizdžiai matomas perteklinis šaknies metalo įvirinimas. Gauti radiografinio tyrimo rezultatai pateikti 2 lentelėje.

#### 2 lentelė. Radiografinės kontrolės tyrimo rezultatai

Table 2. Results of radiography control

Suvirintas bandinys	Optinis tankis	Jautrumas	Defektai pagal LST EN ISO 5817
1. Naudojant VSR, vibracijos taškas buvo apie 5–10 % iki subrezonanso amplitudės	1,9	0,16	Defektų nerasta
2. Naudojant VSR, vibracijos taškas buvo apie 50 % už subrezonanso amplitudės	1,9	0,16	Šaknies metalo perteklinis įvirinimas
3. Nenaudojant VSR	1,9	0,16	Defektų nerasta

### Kietumo matavimų rezultatai

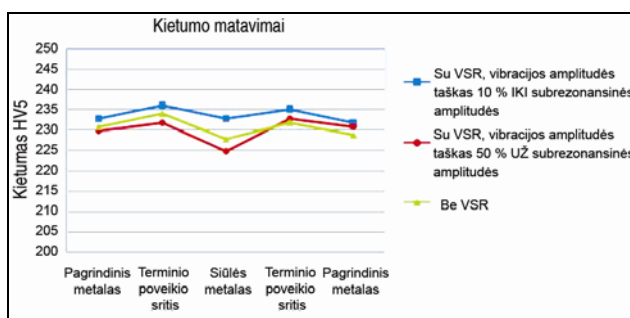
Gauti kietumo rezultatai (3 lentelė) rodo, kad kietumas skiriasi visai nedaug, tad galima teigti, kad jis nepriklauso nuo vibracijos energijos naudojimo suvirinimo metu. Grafiniai kietumo matavimo rezultatai pateikti 3 pav.

#### 3 lentelė. Kietumo matavimai HV5

Table 3. Measurement of hardness HV5

Bandinukai	PM	TPZ	SS	TPZ	PM
1. Naudojant VSR, vibracijos taškas buvo apie 5–10 % iki subrezonanso amplitudės	233	236	233	235	232
2. Naudojant VSR, vibracijos taškas buvo apie 50 % už subrezonanso amplitudės	233	232	225	233	232
3. Nenaudojant VSR	231	234	228	232	229

PM – pagrindinis metalas; TPZ – terminio poveikio zona; SS – suvirinimo siūlė.



3 pav. Grafiniai kietumo matavimo rezultatai

Fig. 3. Diagrammatical results of hardness measurement

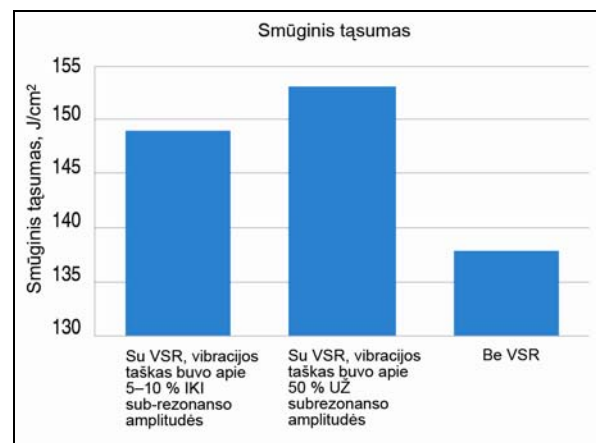
### Smūginio tašumo matavimų rezultatai

Smūginio tašumo bandymu nustatyta (4 lentelė), kad didžiausią smūginį tašumą turėjo sujungimas, suvirintas vibracijos energija, kai jos taškas buvo apie 50 % už subrezonanso amplitudės.

#### 4 lentelė. Smūginio tašumo bandymų rezultatai

Table 4. Results of impact resistance test

Suvirinimo būdas	Smūginis tašumas KV, J/cm <sup>2</sup>			
	Bandymų rezultatai			Vidurkis
1. Naudojant VSR, vibracijos taškas buvo apie 5–10 % iki subrezonanso amplitudės	145,3	154,1	148,5	149,3
2. Naudojant VSR, vibracijos taškas buvo apie 50 % už subrezonanso amplitudės	157,1	149,5	153,2	153,3
3. Nenaudojant VSR	132,8	141,1	140,3	138,1



4 pav. Smūginio tašumo matavimai

Fig. 4. Measurement of impact resistance

## Išvados

Vibracijos energijos naudojimas suvirinimo metu neturi įtakos vidiniams suvirinimo defektams atsirasti.

Bandinuke, kuriam suvirinimo metu naudota didesnė vibracija, nei rekomenduojama (vibracijos taškas buvo apie 50 % už subrezonanso amplitudės), buvo akivaizdžiai matomas perteklinis šaknies metalo įvirinimas. Tad galima teigti, kad vibracija, kurios taškas yra už subrezonanso amplitudės, didina skystojo metalo takumą.

Gauti kietumo matavimo rezultatai rodo, kad kietumas skiriasi visai nedaug, tad galima teigti, kad jis nepriklauso nuo naudojamos vibracijos energijos suvirinimo metu.

Gavus smūginio tašumo rezultatus pastebėta, kad vibracijos energija padidino suvirinimo jungties smūginį tašumą.

Smūginio tašumo bandymu nustatyta, kad didžiausią smūginį tašumą turėjo sujungimas, suvirintas esant didžiausiai vibracijos energijai, kai jos taškas buvo apie 50 % už subrezonanso amplitudės. Smūginio tašumo matavimai pateikti 4 pav.

#### Literatūra

- Claxton, R. A. and Lupton, A. 1991. Vibratory stress relieving of welded fabrications, *Welding & Metal Fabrication* 59(10): 541–542.
- Dawson, R. 1975. *Residual Stress Relief by Vibration*: Ph.D. Thesis. Liverpool University.
- Gnirss, G. 1988. Vibration and Vibratory Stress Relief. Historical development, theory and practical application, *Welding in the World/Le Soudage dans le Monde* 26(11–12): 284–291.
- Hornsey, J. S. 2001. *VSR Recent Developments*. Johannesburg.
- Hornsey, J. S. 2004. *Vibratory Stress Relieving an Alternative to Thermal Treatment*. VSR (Africa) cc December 2004.
- Kulikauskas, L. 1997. *Medžiagotyra. Konstrukcinės medžiagos*. Vilnius.

#### RESEARCH ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE WELD SEAMS OF CONSTRUCTIONAL STEEL USING VIBRATION ENERGY METHOD DURING WELDING

L. Rumbutis, I. Višniakas, A. Jurčius

#### Abstract

The paper analyzes changes in the mechanical properties of the welded joints of steel S355J2 (LST EN 10025) using vibration energy method during welding done by applying semi automatic equipment under CO<sub>2</sub> environment using supplementary wire ESAB OK 12.51. When welding, several levels of vibration energy are applied. For vibration treatment, proprietary equipment “MetaLax 2725” produced by the U.S. Company “Bonal” was employed. To investigate the effects of vibration energy on the weld seam, radiographic control and mechanical experiments on tensile, hardness distribution and impact resistance were performed.

**Keywords:** vibration energy, welding, mild steel