



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Julius Jaloveckas

FRIKCINIO TAŠKINIO SUVIRINIMO PROCESO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Lekt. dr. Ramūnas Česnavičius

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
(parašas) Prof. dr. Vytautas Grigas
(data)

FRIKCINIO TAŠKINIO SUVIRINIMO PROCESO TYRIMAS
Baigiamasis magistro projektas
Mechanikos inžinerija (kodas 621H30001)

Vadovas

(parašas) Lekt. dr. Ramūnas Česnavičius
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Jolanta Baskutienė
(data)

Projektą atliko

(parašas) Julius Jaloveckas
(data)

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Julius Jaloveckas

(Studento vardas, pavardė)

Mechanikos inžinerija 621H30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Frikinio taškinio suvirinimo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. Birželio 4 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano Juliaus Jalovecko baigiamasis projektas tema „ Frikinio taškinio suvirinimo proceso tyrimas “ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

TURINYS

ĮVADAS	7
1. LITERATŪROS APŽVALGA	9
1.1. FRIKCINIS TAŠKINIS SUVIRINIMAS	9
1.2. FRIKCINIO TAŠKINIO SUVIRINIMO ĮRANKIS	11
1.3. FRIKCINIO TAŠKINIO SUVIRINIMO MAŠINOS	14
1.4. FRIKCINIŲ TAŠKINIŲ BŪDŲ SUVIRINAMOS MEDŽIAGOS	16
1.4.1. <i>Aliuminio suvirinimas</i>	17
1.4.2. <i>Vario suvirinimas</i>	18
1.4.3. <i>Žalvario suvirinimas</i>	19
1.5. FRIKCINIO TAŠKINIO SUVIRINIMO METODO PALYGINIMAS	19
1.6. FRIKCINIO TAŠKINIO SUVIRINIMO PROCESO PARAMETRŲ TYRIMAI	21
1.7. LITERATŪROS APŽVALGOS IŠVADOS.....	22
2. EKSPERIMENTINĖ DALIS	23
2.1. ĮVADAS	23
2.2. EKSPERIMENTO ĮRANGA	24
2.3. EKSPERIMENTO METODIKA	26
2.4. EKSPERIMENTO REZULTATAI.....	27
2.4.1. <i>Eksperimentinės jėgos kitimo kreivė</i>	27
2.4.2. <i>Aliuminio lydinio 5754 bandymų rezultatai</i>	28
2.4.3. <i>Aliuminio lydinio 1050 bandymų rezultatai</i>	33
2.4.4. <i>Žalvario CuZn37 bandymų rezultatai</i>	37
2.4.5. <i>Vario M2 bandymų rezultatai</i>	39
2.5. EKSPERIMENTINĖS DALIES IŠVADOS	41
3. FRIKCINIO TAŠKINIO SUVIRINIMO MODELIAVIMAS	43
3.1. ĮVADAS	43
3.2. MODELIAVIMO METODIKA.....	44
3.2.1. <i>Skaičiavimo modeliai ir formulės</i>	44
3.2.2. <i>Skaičiavimo modelis</i>	45
3.3. MODELIAVIMO REZULTATAI IR JŲ PALYGINIMAS SU EKSPERIMENTINIAIS REZULTATAIS	48
3.4. FRIKCINIO TAŠKINIO SUVIRINIMO MODELIAVIMO IŠVADOS.....	53
4. IŠVADOS	54
5. LITERATŪRA	55
PRIEDAI	58
1. PRIEDAS. PUBLIKACIJA 19-TOSIOS TARPTAUTINĖS KONFERENCIJOS „MECHANIKA 2014“ PRANEŠIMŲ MEDŽIAGOJE.....	59
2. PRIEDAS PUBLIKACIJA „PRAMONĖS INŽINERIJA 2014: JAUNŲJŲ MOKSLININKŲ KONFERENCIJOS“ PRANEŠIMŲ MEDŽIAGOJE.....	60
3. PRIEDAS PUBLIKACIJA „PRAMONĖS INŽINERIJA 2015: JAUNŲJŲ MOKSLININKŲ KONFERENCIJOS“ PRANEŠIMŲ MEDŽIAGOJE.....	61

Jaloveckas, J. Frikcinio taškinio suvirinimo proceso tyrimas. Magistrinis baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Ramūnas Česnavičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, Mechanikos inžinerijos. katedra.

Kaunas, 2015. 60 psl.

SANTRAUKA

Frikcinio taškinio suvirinimo tyrimo metu apžvelgti moksliniai tyrimai šia tema. Atsižvelgus į pasaulyje jau paskelbtus mokslinius tyrimus, nuspręsta frikcinio taškinio suvirinimo proceso tyrimus taikyti šiuolaikinei gamybai. Atlikti eksperimentai buvo padalinti į kelias dalis. Aliuminio lydiniai AL5754 ir AL1050 buvo tiriami skirtingais suvirinimo procesais. Varis M2 ir žalvaris CuZn37 buvo tiriamas keičiant tik vieną proceso kintamąjį. Frikcinio taškinio suvirinimo proceso tyrimu metu buvo keičiami šie parametrai: įrankio sukimosi greitis, įsigilinimo pastūma ir išlaikymo laikas. Ištyrus priklausomybes, pasiūlyti sprendimai, kurie leistų sumažinti jėgą atsirandančią suvirinimo metu. Analizuojant suvirinimo taško skerspjūvio geometriją, nustatyti proceso parametrai, kurie daro įtaką suvirinimo taško kokybei. Modeliavimo dalyje aprašomas sukurtas frikcinio proceso baigtinių elementų modelis, kuris buvo sudarytas Abaqus/Explicit programa. Gauti modeliavimo rezultatai palyginami su eksperimentinėmis vertėmis. Darbo pabaigoje suformuluojamos išvados.

Jaloveckas, J. Investigation of friction stir spot welding process. Project for Master degree/ supervisor lect. dr. Ramūnas Česnavičius. Kaunas University of technology, Mechanical engineering and design faculty, Mechanical engineering department.

Kaunas, 2015. 60 psl.

SUMMARY

In friction stir spot welding process study it is reviewed the researches that has been made. Most of the scientific researches states that friction stir spot welding is very well applied for modern production. The experimental part of investigation has a several parts of different experiments. Aluminum alloys AL5754 and AL1050 was subjected for a several experiments to observe force that is generated in process. Copper M2 and brass CuZn37 was tested on a different process conditions. Friction stir spot welding process parameters tool rotational speed, plunge speed, stir time are changed in experiments. Examination of force dependence on process parameters was conducted and offered a solutions to reduce axial force. Analysis of welding point cross-section geometry shows the process parameters influence on welding point quality. In process simulation part a process model was created with Abaqus/Explicit. Results generated during simulation and experiment values are compared. Conclusions are made based on experimental analysis and after comparing process simulation data with experiments.

Įvadas

Temos aktualumas. Brangstantys energetiniai išteklių daro didžiulę įtaką įvairioms pramonės šakoms. Kylant energetinių išteklių kainoms ieškoma alternatyvų seniems technologiniams procesams, kurios leistų sutaupyti energijos neprarandant apdirbimo kokybės. Metalų apdirbimo įmonėse siekiama sumažinti tiek proceso metu sunaudojamą energiją, tiek parduodamų gaminių energetines sąnaudas.

Viena labiausiai energijos kainų įtakojamų pramonės sričių yra transporto pramonė. Siekiant padidinti įvairių transporto priemonių energetinį ekonomiškumą ieškoma tinkamiausių medžiagų. Perspektyviausios medžiagos galinčios pakeisti ilgai dominavusius plieno lydinius yra aliuminio ir magnio lengvieji lydiniai. Norint panaudoti šias medžiagas, reikia panaudoti suvirinimo metodus, kuriuos atlikti sudėtinga (tokius, kaip pavyzdžiui taškinis suvirinimas elektra) arba turėti aukštos kvalifikacijos suvirintojus ir suvirinimui tinkamą įrangą. Taip pat šie metalų lydiniai gali būti sujungiami kniediniu ar varžtiniu sujungimu, tačiau šie būdai tik padidina surinkimo kainą ir surinkimo procesą padaro sudėtingu [1].

Vienas iš šios problemos sprendimų pasiūlytas frikcinis taškinis suvirinimas FSSW (*Friction Stir Spot Welding*). Tai kietos būsenos suvirinimo būdas, sukurtas remiantis dviejų plokščių suvirinimu besisukančiu įrankiu. Suvirinimas sukuriama nuleidžiant besisukantį įrankį į suvirinamų medžiagų plokšteles, trumpam palaikant nuleistoje padėtyje ir staigiai atitraukiant [2]. Šiuo atveju suvirinamų detalių medžiagos sumaišomos tarpusavyje – taip sukuriama dalinį metalurginį ryšį. Suvirinimui atlikti pasirenkamas tinkamas įrankis, kuris priklauso nuo suvirinamų medžiagų [3].

Darbo tikslas – ištirti frikcinio taškinio suvirinimo metu atsirandančias ašines jėgas, nustatyti suvirinimo kokybę ištiriant suvirinimo taškų mikrostruktūrą. Sudaryti kompiuterinį frikcinio taškinio suvirinimo proceso modelį ir palyginti rezultatus su eksperimentiniais duomenimis.

Uždaviniai:

- Apžvelgti literatūra susijusią su darbo tema;
- Atlikti eksperimentinius frikcinio taškinio suvirinimo tyrimus, kuriais nustatyti atsirandančias ašines jėgas, kurios gaunamos atliekant bandymus su vienodu medžiagų plokšteles;
- Iš eksperimentų metu gautų rezultatų, nustatyti tinkamiausius frikcinio taškinio proceso parametrus, kurie leistų sumažinti ašinę jėgą ;

- Nustatyti kokybiškus suvirinimo proceso parametrus panaudojant suvirinimo vietos skerspjūvio tyrimus.
- Sudaryti kompiuterinį frikcinio taškinio suvirinimo proceso modelį.
- Palyginti kompiuterinio modelio rezultatus su gautais eksperimento metu.
- Iš eksperimentinio ir modeliavimo rezultatų suformuluoti išvadas.

Autoriaus įnašas.

Atliktų tyrimų rezultatai pristatyti konferencijų metu skaitant pranešimus:

- 19-tojoje tarptautinėje konferencijoje „Mechanika 2014“;
- konferencijoje „Pramonės inžinerija 2014: jaunųjų mokslininkų konferencija“;
- konferencijoje „Pramonės inžinerija 2015: jaunųjų mokslininkų konferencija“;
- 11-tojoje tarptautinėje konferencijoje „Mechatronic Systems and Materials“ (MSM 2015);

Tyrimo rezultatai išspausdinti:

„Pramonės inžinerija 2014: jaunųjų mokslininkų konferencijos“ pranešimų medžiagoje

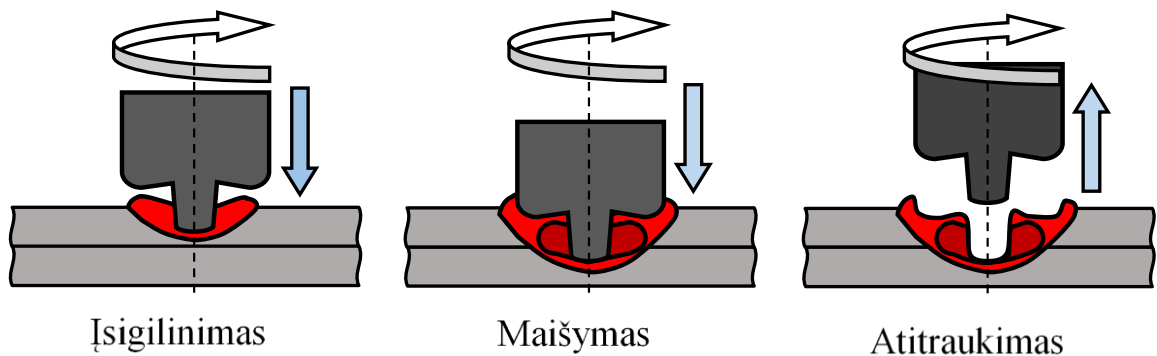
19-tosios tarptautinės konferencijos „Mechanika 2014“ pranešimų medžiagoje.

- **Krasauskas P., Česnavičius R., Jaloveckas J.** Experimental Investigation of the Aluminum Alloy 5754 Friction Stir Spot Welding Process Behaviour. *Mechanika 2014 : proceedings of the 19th international conference, 24, 25 April 2014, Kaunas University of Technology, Lithuania / Kaunas University of Technology, Lithuanian Academy of Science.* p. 141-144.
- **Jaloveckas J.** Aliuminio lydinio 5754 plokštelių frikcinio taškinio suvirinimo proceso eksperimentinis tyrimas. *Pramonės inžinerija 2014: jaunųjų mokslininkų konferencija, 2014 m. gegužės 8 d.: pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.* p. 33-37.
- **Jaloveckas J.** Žalvario CuZn37 ir vario M2 plokštelių frikcinio taškinio suvirinimo proceso eksperimentinis tyrimas. *Pramonės inžinerija 2015: jaunųjų mokslininkų konferencija, 2015 m. gegužės 14 d.: pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.*

1. Literatūros apžvalga

1.1. Frikcinis taškinis suvirinimas

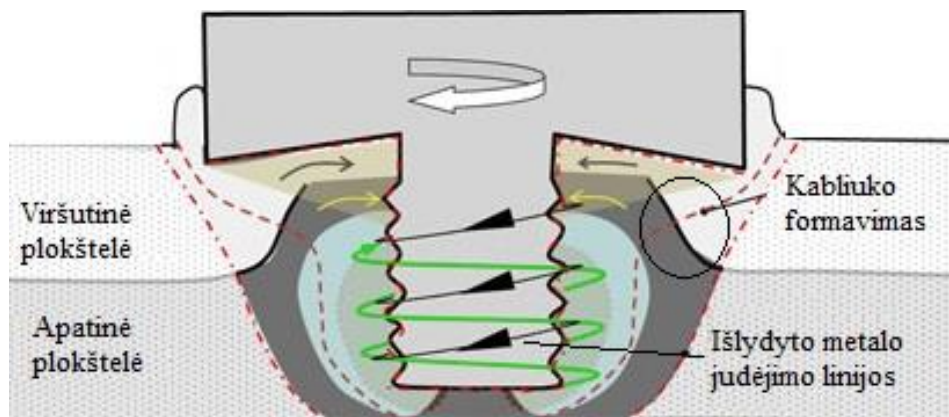
Frikcinis taškinis suvirinimas (angl. FSSW- *friction stir spot welding*) yra išvestinis sujungimo būdas. Praktikoje jau senai naudojamas frikcinis suvirinimas velenams, cilindrams kitokioms tokio pobūdžio detalėms. Ne taip senai (1991 m.) frikcinį suvirinimą pritaikė išilginiam plokščių suvirinimui (angl. FSW- *friction stir welding*) [1]. Tačiau pats naujausias frikcinio suvirinimo pritaikymas yra medžiagos lakštams suvirinti ir vadinamas frikciniu taškiniu suvirinimu.



1.1 pav. Principinė frikcinio taškinio suvirinimo būdo schema

Aiškiausiai metalų FSSW procesas gali būti paaiškinamas išskaidžius į 3 pagrindines fazes (1.1 pav.) t. y. įsigilinimas, maišymas, atitraukimas. Procesas pradedamas nustatant reikalingus parametrus. Įrankiui sukantis nurodytu greičiu, jis yra nuleidžiamas į dvi vieną kitą perdengiančias plokšteles nurodytu įsigilinimo greičiu iki tam tikros ribos. Įsigilinimo riba gali kisti, tačiau turėtų būti didesnė nei pirmos plokštelės storis (t. y. perdurti viršutinę plokštelę), bet negali būti didesnė nei abiejų plokštelių storis (t. y. įrankis negali perdurti antrosios plokštelės). Įsigilinimo fazėje įrankio cilindrinė dalis turi liesti viršutinę plokštelę. Ašinei jėgai atstoti naudojamas standus padas, kad įsigilinimo metu plokštelės neišlinktu suvirinimo taške. Maišymo fazėje metalas nuo plastinės deformacijos ir nuo trinties išsiskiriančios šilumos išsilydo (1.2 pav.). Šioje stadijoje svarbus įrankio profilis. Įrankio ašelė, turinti kairinį sriegį, nukreipia aplink ją susidariusį išlydytos medžiagos srautą gilyn į suvirinimo vietą. Lydyto metalo srautas pasiekęs giliausią tašką teka į šonus ir kylą į viršų. Kildamas į viršų metalas vėsta (tolstant nuo įrankio mažėja šilumos kiekis), taip formuodamas suvirinimo tašką, kuris dar vadinamas kabliuku (angl. „hook“). Maišymo fazė dažniausiai trunka

keltas sekundes, priklausomai nuo suvirinamų medžiagų. Trečioji fazė yra staigus įrankio atitraukimas, kurio metu išlydytas metalas visiškai sustingsta, sudarydamas stiprų dalinį metalurginį ryšį [2].



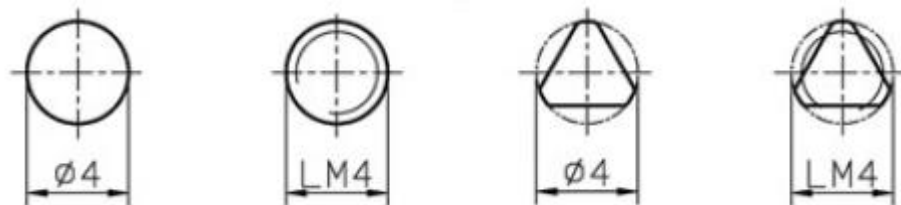
1.2 pav. Principinė friccinio taškinio suvirinimo būdo schema [4]

Metalo suvirinimas turi užtikrinti detalių sujungimo stiprumą. Kaip ir kiti detalių sujungimo būdai FSSW priklauso nuo kelių kintamųjų. Kaip teigia H. Badarinarayan savo tyrime [3], yra manoma, kad friccinio taškinio suvirinimo stiprumas labiausiai priklauso nuo dviejų faktorių – suvirinimo proceso parametrų ir suvirinimo įrankio geometrijos. Suvirinimo procesų parametrų priskiriami įrankio sukimosi greitis, įsigilinimo gylis ir išlaikymo laikas. Dėl įrankio sukimosi greičio priklauso išskiriamos šilumos kiekis, kuris išlydo metalą aplink įrankį. Įsigilinimo gylis įtakoja išlydyto metalo judėjimo kryptį. Kaip minėta anksčiau nuo išlydyto metalo judėjimo priklauso suvirinimo taško „kablyuko“ (angl. *hook*) susiformavimas. Kuo gilesnis suvirinimas, tuo daugiau sumaišomos apatinės ir viršutinės plokštelių medžiagos. Tačiau svarbu atsižvelgti į tai, kad per didelis įrankio įsigilinimas gali įtakoti sumažėjusį suvirinimo vietos stiprumą dėl viršutinės plokštelės suspaudimo. Kuo plonesnė viršutinė plokštelė, tuo mažesnė stiprumo riba. Įrankio išlaikymo laikas nuleistoje padėtyje turi įtaką išskiriamos šilumos kiekiui. Norint suvirinti medžiagas, kurių lydymosi temperatūra yra aukšta, reikia didesnio šilumos kiekio, todėl įrankio išlaikymas turi būti didesnis. Tačiau per ilgas įrankio išlaikymas gali neigiamai įtakoti suvirinimo kokybę. Jeigu medžiaga yra perkaitinama, apatinė plokštelė išsilydo ir prilydoma prie pagrindo. Tokiu atveju suvirintas plokšteles reikia atplėšti nuo pagrindo. Tuo tarpu įrankio geometrijai priskiriama ašelės ir įrankio cilindrinės dalies, kitaip vadinamos įrankio petimi (angl. *tool shoulder*). Įrankiai gali turėti labai daug skirtingų modifikacijų.

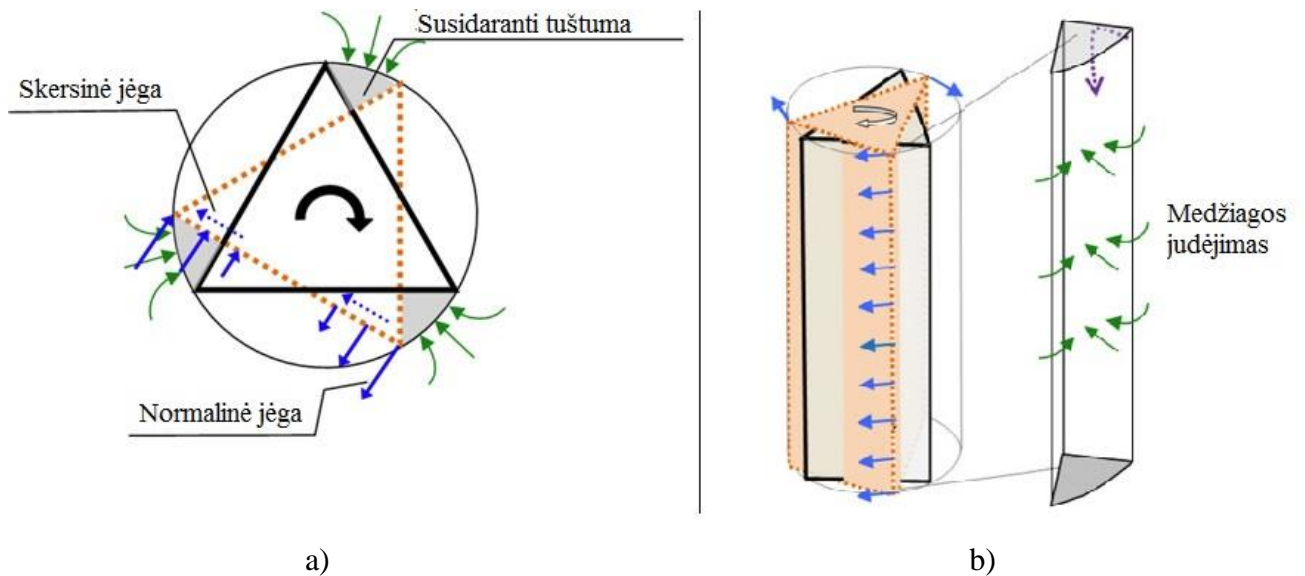
1.2. Frikcinio taškinio suvirinimo įrankis

Norint gauti pakankamai stiprų suvirinimo takšą, reikia parinkti tinkamiausia įrankio geometriją. Įrankio geometrijos parinkimo tyrimai yra vieni iš labiausiai paplitusių frikcinio taškinio suvirinimo publikacijų. Analizuojant įrankio geometriją yra tirta atsižvelgiant į suvirinimo taško „kabiliuko“ susidarymą [3] arba suvirinimo taško medžiagos judėjimo stebėjimu [4]. Pirmuoju atveju stebima kaip įrankis įtakoja „kabiliuko“ susidarymą ir jo formą, antruoju atveju stebima kaip medžiaga juda nuo įrankio geometrijos, iš kokios suvirinimo vietos ir kur medžiaga yra pernešama.

Vienas iš pagrindinių geometrinių įrankio rodiklių yra ašelės forma (1.3 pav.). Ašelės forma turi sukurti pakankamai šilumos, o tuo pačiu tinkamai paskirstyti metalą. Galimi keli ašelių variantai, tačiau pagrindinės formos ypatybės, turinčios įtakos suvirinimo stiprumui, yra skerspjūvio forma (cilindras, trikampis, daugiakampis) ir paviršiaus forma (lygus, sriegtas, kūginis, sriegtas kūginis). Atlikti tyrimai rodo, kad skirtingi profiliai iššaukia skirtingas reakcijos jėgas. Mažiausios jėgos atsiranda esant trikampiui profiliui [3]. Mažesnės ašinės jėgos gaunamos esant trikampiui skerspjūviui, nes paviršiaus plotas yra mažesnis už cilindrinio tipo paviršiaus plotą. Lyginant suvirinimo vietos kabliuko formavimąsi nuo įrankio skerspjūvio, trikampis skerspjūvis taip pat yra geresnis variantas, nes suvirinimo vietos stiprumas gaunamas didesnis [3, 4]. Tai paaiškinama tuo, kad dviejų plokščių medžiagos maišosi, kai trikampis įrankis sukasi, susidaro tuštuma, kurias užpildo išsilydžiusi medžiaga (1.4 pav.), todėl medžiagos yra geriau sumaišomos. Pastebėta, kad sriegtas įrankis taip pat turi privalumų suvirinimo taško kokybei. Norint, kad medžiaga judėtų gilyn į suvirinimo vietą, reikia kairinio sriegio. Įrankis sukdamasis pagal laikrodžio rodyklę, naudoja sriegį kaip transporterį, ir todėl medžiaga stumiama gilyn. Esant neišsilydžiusiai apatinei plokštelės daliai, medžiaga nukreipiama į šonus ir į viršų, taip suformuodama stiprų plokščių susikabinimą.



1.3pav. Ašelės skerspjūvių ir paviršių pavyzdžiai [5]



1.4 pav. Trikampio skerspjūvio suvirinimo įrankis: a – suvirinimo vietos modelio skerspjūvio vaizdas; b – erdvinis suvirinimo vietos modelio vaizdas [4]

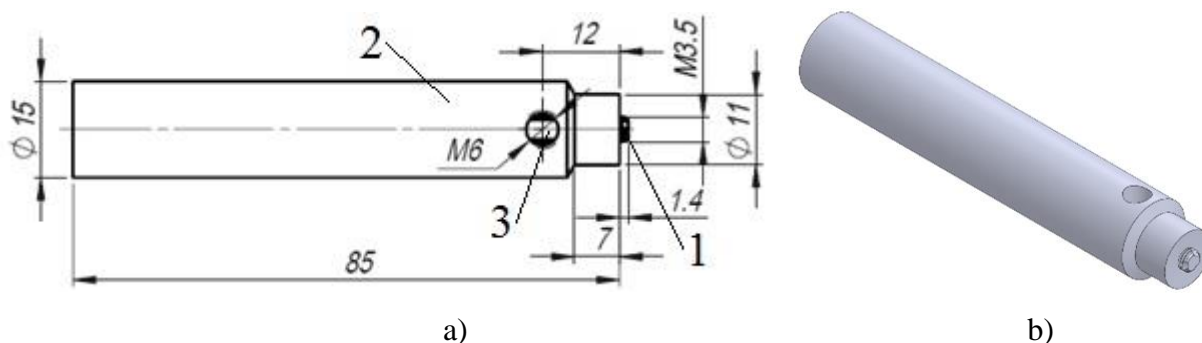
Didelę įtaką suvirinimo kokybei duoda įrankio cilindras. Cilindrinė dalis padeda sukurti tinkamos geometrijos suvirinimo kabliuką, kuris įtakoja suvirinimo stiprumą. Publikuotame tyrime [3] buvo stebima, kaip suvirinant įrankiais, kurie turi 3 skirtingas cilindro modifikacijas - 10° įgilinimą, plokščią paviršių, ir 10° nuožulą, įtakojamas suvirinimo taško stiprumas (1.5 pav.). Gauti rezultatai parodė, kad suvirinant įrankiu, kuris turi 10° įgilinimą gaunamas stipresnis suvirinimo taškas už cilindrą su plokščiu paviršium 3-5% ir lyginant su 10° nuožulą 12-15%. Atsižvelgiant į šį tyrimą, dauguma tyrimu atlikti panaudojant įrankį, kuris turi 10° įgilinimą [5 - 7].



1.5 pav. Įrankio cilindro pavyzdžiai [3]

Dažniausiai FSSW įrankiai yra gaminami klientų užsakymu pagal norimą konfigūraciją. Įrankio medžiagos parinkimas priklauso nuo to, kokio tipo medžiagos bus suvirinamos. Dažniausiai

FSSW pritaikomas lengvųjų metalų lydiniams, tokiems kaip aliuminis ir magnis. Priklausomai nuo medžiagos, įrankis gali atlaikyti skirtingo dydžio šiluminės apkrovas. Proceso metu išsiskirianti šiluma ir ašinės jėgos veikia įrankį, todėl esant lengvai lydiems metalams, įrankiams naudojamos paprastesnės medžiagos, taip juos atpiginant. Šį procesą pritaikant plieno lydiniams, reikia pasirinkti keramikos pagrindu pagamintą įrankį, kuris galėtų atlaikyti didžiulę kaitrą atsirandančią suvirinimo vietoje [8].



1.6 pav. Unikalaus profilio įrankis: a) įrankio matmenys ir dalys: 1- įrankio ašelė; 2- įrankio cilindras; 3- tvirtinimo smeigė; b) įrankio izometrinis vaizdas

Atlikus keleto frikcinio taškinio suvirinimo įrankių analizę, buvo nuspręsta ir priimta naudoti unikalų įrankį – surenkamą iš 3 dalių: ašelės, cilindro ir tvirtinimo varžto (1.6 pav.). Šio įrankio privalumas toks, kad šiuo atveju galima atlikti tyrimus pakeičiant ir svarbų įrankio parametą - įrankio ašelės įsigilinimą. Kaip ir minėta anksčiau, nuo įsigilinimo priklauso suvirinimo stiprumas, todėl ašelės įsigilinimas labai svarbus sukuriant tinkamą suvirinimą, nes kuo gilesnis sluoksnių maišymas, tuo didesnė galimybė gauti tinkamą plokščių sujungimą. Šiuo atveju svarbu surasti tinkamiausią dydį. Jeigu parenkamas ašelės dydis bus per didelis, gali būti pradurta ir antroji plokštelė. Tuo atveju, medžiaga galės ištekėti iš suvirinimo vietos ir susidarys blogas suvirinimo taškas. Unikalaus profilio įrankio privalumas toks, kad galima keisti ašelės įsigilinimo dydį, taip keičiant ir pačių suvirinamų plokštelių storį.

Suvirinimo įrankio medžiagos [8] parinkimas turi didžiulę įtaką proceso naudingumui. Įrankiui suvirinant įvairias medžiagas, svarbu atlaikyti dvi pagrindines apkrovas: ašinę jėgą ir temperatūrą. Ašinė jėga atsiranda medžiagai priešinantės deformacijai, o temperatūra generuojama nuo trinties ir plastinių deformacijų. Priklausomai nuo suvirinamos medžiagos reikalingas skirtingas šilumos kiekis ir spaudimo jėgos.

Geriausiai FSSW metodas pritaikomas lengvųjų metalų lydiniams, t. y. aliuminio ir magnio lydiniams. Šie metalai turi žemą lydymosi temperatūrą, todėl įrankio medžiaga turi mažesnę

temperatūrinę apkrovą. Norint atpiginti įrankį, šiems lengvųjų metalų lydiniams suvirinti dažniausiai naudojamas grūdinti įrankiniai plienai X155CrMoV12-1 (DIN 1.2379) arba H13 (DIN 1.2344) [8]. Po grūdinimo medžiagų kietumas siekia apie 60 vienetų pagal HRC skalę.

Suvirinant anglinius plienus parenkamos įrankių medžiagos, kurios turi atlaikyti didesnes ašinės jėgos ir temperatūrinės apkrovas, todėl dažniausiai naudojami keraminiai įrankiai, nors kai kuriems plienams suvirinti siūloma ir volframo pagrindu pagamintus įrankius. Dažniausiai naudojama keramikinė medžiaga - tai polikristalinis kubinis boro nitridas (pcBN). Medžiaga yra antra pasaulyje pagal kietumą žinoma medžiaga po deimanto. Ši keramikos medžiaga gali atlaikyti temperatūrą iki 1223° C ir nepakeisti savo struktūros [8].

1.3. Frikcinio taškinio suvirinimo mašinos

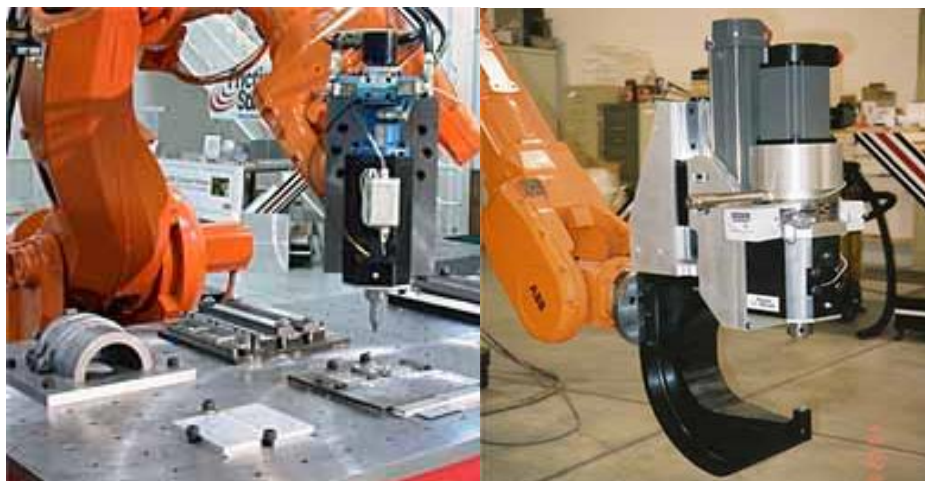
Atsiradus naujam suvirinimo būdai pramonininkai sukūrė naują įrangą, padedančią pritaikyti procesą įvairiems poreikiams. Dažniausiai FSSW procesas naudojamas transporto pramonėje, kurioje stengiamasi sumažinti transporto priemonės svorį. Transporto priemonių surinkimas būna srautinis, todėl dažniausiai frikcinio taškinio suvirinimo procesas pritaikomas prie buvusių taškinio elektrinio suvirinimo robotų (1.7 pav.). Pramoniniai robotai yra pakankamai manevringi, kad galėtų suvirinti detales bendrame sujungime arba atskirai dvi detales įtvirtintas laikikliuose.

Pramonėje panaudojami ne vien suvirinimo robotai, bet ir staklės. Frikcinis suvirinimas siule panaudojamas gana efektyviai storoms plokštėms ir vamzdžiams sujungti, todėl sukurtos ir stacionarios FSW (angl. *Friction Stir Welding*) frikcinio suvirinimo siule staklės. FSW suvirinimas yra labai panašus į FSSW, todėl šiems suvirinimo būdams naudojamas tos pačios staklės (1.8 pav.).

Atsižvelgiant į tai, kad pagrindiniai suvirinimo staklių reikalavimai yra suvirinimo staklių arba galvutės judėjimas keliomis ašimis, tokiu būdu galima pritaikyti ir naudojamus kelių ašių apdirbimo centrus.

FSSW metodą pritaikant automatizuotoms sistemoms, t. y. pramoniniams robotams, naudojamos tik suvirinimo galvutės konstrukcijos, todėl jos, priklausomai nuo poreikio, gali būti pakeičiamos. Yra naudojamos dviejų tipų suvirinimo galvučių konstrukcijos:

- Rėmas be atramos (1.7 pav. a);
- Rėmas su atrama (1.7 pav b).



a)

b)

1.7 pav. FSSW suvirinimo galimi robotų pritaikymas: a) galvutė be atramos [9]; b) galvutė su atrama [10]

Abu suvirinimo galvučių tipai yra naudojami šiandieninėje pramonėje. Priklausomai nuo to, ką norima suvirinti ir kokio dydžio gaminyje, pasirenkamas tinkamiausias variantas.

Galvutės konstrukcija, kuri turi rėmą su atrama, leidžia sudaryti tikslią jėgų kontrolę, nes yra plokščias pagrindas, kuris yra statmenas įrankio ašiai. Užtikrinus tinkamą jėgų kontrolę, gaunami puikūs suvirinimo taško pavyzdžiai, nes atliekant suvirinimą, dėl žemiau išvardintų faktorių gaunama aukštesnė kokybė:

- Žinomas tikslus įsigilavimo dydis;
- Žinoma tiksli įrankio įsiskverbimo atsitraukimo trukmė;
- Pagal nustatytą ašinę jėgą, galima keisti suvirinimo įsigilavimo greitį.

Galvutės konstrukcija, kuri neturi rėmo, leidžia prieiti prie sudėtingų surinkimo vietų. Galvutė gali laisvai judėti įvairiomis ašimis. Šio tipo konstrukcija naudojama prie esamų junginių prijungti papildomas detales. Šiai konstrukcijai reikalingas suvirinimo stovas, kuriame detalės yra įtvirtinamos, nes galvutė neturi atramos ant kurios laikomos suvirinamos detalės.

Atsižvelgus į tai, kad šis procesas gali būti pilnai automatizuotas, jis turi dideles galimybes pakeisti elektrinį suvirinimą dėl savo paprastumo, lengvo automatizavimo ir siekiant sutaupyti gamybos kaštus.



a)



b)

1.8 pav. FSW staklės : a) su fiksuotu suvirinimo stalu; b) su prijungiamu suvirinimo stalu

FSW staklės nieko nesiskiria nuo naudojamų FSSW suvirinimui. Staklių gamintojai, atsižvelgiant į skirtingas jėgas atsirandančias suvirinant FSW ir FSSW būdu, projektuoja tik vieno tipo stakles, nes staklių standumas tiek FSW, tiek FSSW procesui yra beveik vienodas. Pramonės įmonėms patogiau turėti vieno tipo stakles ir jas panaudoti keliems procesams.

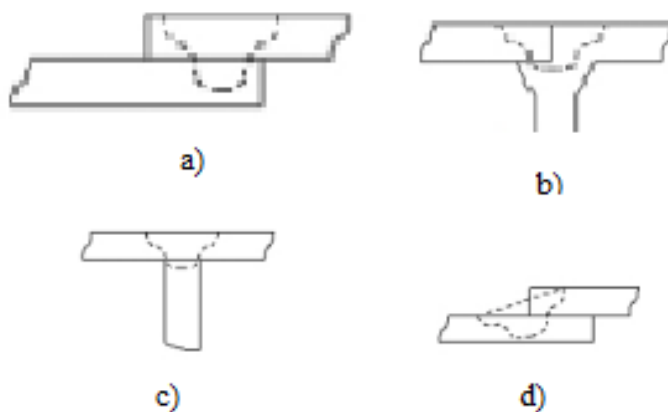
Staklės turi kelis variantus – stalas su fiksuotu pagrindu, sujungtu su pagrindine kolona ir suvirinimo stalas, kuris gali būti keičiamas (1.8 pav.). Stalas su fiksuotu stalu turi galvutę, kuri juda 3 ašimis. Galvutės judėjimas yra patogus, nes galima judėti greičiau dėl mažesnės inercijos palyginti su stalo inercija. Tuo tarpu su staklės su prijungiamu suvirinimo stalu dėl papildomos galvutės ašies leidžia pasukti galvutę kampu, todėl galima judėti 4 ašimis ir taip patogiau suvirinamas medžiagas įtvirtinti.

1.4. Frikciniu taškiniu būdu suvirinamos medžiagos

Frikciniu taškiniu būdu galima suvirinti visas besilydančias medžiagas. Pagrindinis šio metodo privalumas – reikalinga energija panaudojama tik išlydant medžiagas ir jas sumaišant. Kadangi didėja pramonėje naudojamų medžiagų spektras, reikia rasti būdą, kuriuo galima būtų pritaikyti vieną operaciją visoms medžiagoms.

FSSW pritaikomumas žavi lengvųjų metalo lydinių gamintojus. Šis būdas leidžia suvirinti gerus elektros laidininkus tarpusavyje nenaudojant metalo varžinių savybių. Pramonėje reikalinga sujungti ir dvi skirtingas savybes turinčius metalus, pavyzdžiui, virinant plieną su aliuminiu elektros

lanku, išskyla problema tinkamai parinkti suvirinimo parametrus. Per didelė elektros srovė pralydo plieną, o aliuminio paviršiuje esantis oksidas lydosi prie aukšto temperatūros. Frikcinio suvirinimo metu tokios problemos nėra, nes aliuminio oksido plėvelė mechaniškai suardoma. Spalvotieji metalai taip pat gali būti suvirinami frikciniu būdu. Tuo atveju nereikalingas aukštos kvalifikacijos kolektyvas suvirinimui. Plastikai taip pat lengvai lydosi suteikus pakankamai šilumos. FSSW suvirinimo metodas yra lengvai pritaikomas įvairioms lydžioms medžiagoms.



1.9 pav. FSSW suvirinimo konfigūracijos: a) persidengiančių plokščių suvirinimas; b) kampinio sujungimo suvirinimas; c) T tipo sujungimo suvirinimas; d) persidengiančių plokščių kampinis suvirinimas.

Galimybė pritaikyti įvairiems medžiagų profiliams taip pat svarbus pramonės įmonėms. Kaip minėta, pramonei pateikta įvairių tipų FSSW suvirinimo mašinos. Jos lanksčios ir jose galima įtvirtinti įvairius profilius. Kaip teigia C. B. Smith, J. F. Hinrichs, P. C. Ruehl [11], šis suvirinimo būdas gali būti pritaikomas ir skirtingiems profiliams suvirinti (1.9 pav.).

1.4.1. Aliuminio suvirinimas.

Frikcinio taškinio suvirinimo pritaikymas yra svarbus lengvųjų metalų lydinius naudojančioms įmonėms. Aliuminis ir magnis yra pagrindinės medžiagos, kurios gali pakeisti plieną kai kuriose srityse. FSSW tyrimai dažniausiai atliekami aukštesnės klasės aliuminio lyginiams. Aliuminio lydinius priklausančius 6 klasei tyrė tokie mokslininkai kaip Zhikang Shen , Xinqi Yang , Zhaohua Zhang , Lei Cui , Yuhuan Yin (AL6061 T4), Awang Mokhtar, Mucino Victor (AL6061 T6), W. Yuan, R.S. Mishra, S. Webb, Y.L. Chen, B. Carlson, D.R. Herling, G.J. Grant (AL6016), Mohamed Merzoug, Mohamed Mazari, Lahcene Berrahal, Abdellatif Imad (AL6060-T5).

Tiriant aliuminio lydinį AL6061 T4 [1] pasirinkti režimai :1200, 1500, 1800 ir 2100 min⁻¹ , 2, 3, ir 4 s išlaikymo laikai ir įsigilinimo greitis 20 mm/min toks pats visiems bandymams. Eksperimentų išvados rodo, kad esant aukštesniems įrankio sūkiams (2100 min⁻¹) ir ilgesniam išlaikymui, gauti estetiškai gražesni suvirinimo taškai. Ištyrus suvirinimo taško skerspjūvio kietumą nustatyta, kad šilumos paveiktos vietos zonos kietumas nukrito apie 20 vienetų pagal Vikerio skalę. Tiriant suvirinimo vietos stiprumą pastebėta, kad tempimo ir kirpimo bandymuose stipresni pasirodė bandiniai, kurie buvo suvirinti naudojant didžiausius įrankio sūkius. Priklausomybė nuo išlaikymo laiko prie šių sūkių davė nedidelius pokyčius, lyginant su stiprumo ribos kitimu nuo įrankio sūkių .

Smolej, Badarinarayan H, Yang Q, Zhu A[3]; Klobčar, D.; Tušek, J.; Skumavc, A[5]. eksperimentavo su 5 klasės aliuminio lydiniu AL5754. Eksperimentai atlikti su AL5754 , parinkus suvirinimo įrankio sukimosi greitį nuo 988 iki 3511 min⁻¹ , įsigilinimo greitį nuo 24,4 iki 150 mm/min ir išlaikymo laiką nuo 1 iki 3,5 s proceso parametrus parodė, kad stipriausias suvirinimo taškas gautas prie žemesnio įsigilinimo greičio ir aukštesnių sūkių bei išlaikymo laiko. Pastebėta, kad aliuminio oksido plėvelė atsirandanti ant paviršiaus apkrovus sukuria įtrūkimą, kuris vystosi ir mažina suvirinimo taško stiprumą.

1.4.2. Vario suvirinimas

Varis pasižymi ypač geromis elektrinėmis savybėmis. Didžioji dalis vario yra panaudojama elektros energijos generavimui ir jos perdavimui. Atsparumas korozijai leidžia varį pritaikyti šaldytuvuose, šilumokaičiuose, vakuuminiuose prietaisuose, kuriuose reikia perduoti šilumą.

Suvirinti varį reikia daug pastangų, nes kaip ir žalvaris yra geras šilumos laidininkas. Reikia aukštos kvalifikacijos suvirintojo, kad užtikrinti kokybišką suvirinimo siūlę. Varis lydosi esant 1083°C temperatūrai [18], todėl frikcinio suvirinimo metu reikia sukurti pakankamai šilumos, kad metalas taptų plastiškesnis.

Zafer Barlas [17] atliko bandymus suvirinant dvi skirtingas medžiagas - varį su žalvariu. Šio tyrimo metu siekiama išsiaiškinti suvirinimo įrankio sukimosi greičio, išlaikymo laiko ir suvirinimo įsigilinimo įtaką suvirinimo stiprumui. Keičiant suvirinimo greitį nuo 900 iki 1500 min⁻¹ ir išlaikymo laiką nuo 1,5 iki 3 s, buvo atlikti bandymai panaudojant įrankį su Ø15 mm cilindru ir kūgine ašele. Gauti rezultatai rodo, kad stipriausias suvirinimas atliekant tempimo bandymą gautas suvirinus kai sukimosi greitis yra 1500min⁻¹ ir prie maksimalios apkrovos įrankio išlaikymas yra 3s. Suvirinimo metu šalia suvirinimo vietos temperatūra siekia 545°C, todėl pavyko išvengti toksiškos aplinkos. Atlikus kietumo testą paaiškėjo, kas minkščiausia vieta yra termiškai paveiktoje vario plokštelėje.

1.4.3. Žalvario suvirinimas

Žalvario suvirinimas skiriasi nuo aliuminio, nes suvirinanti žalvarį įprastiniu elektros lanku gaunama prasta suvirinimo kokybė dėl aukšto terminio laidumo. Taip pat žalvaryje esantis cinkas pradeda garuoti, taip sukurdamas toksišką darbo vietą. Žalvaris yra standesnė medžiaga ($E_{\text{žal}} \gg E_{\text{Al}}$, kur E – medžiagos standumo modulis). Suvirinant medžiagas frikciniu būdu reikia suminkštinti medžiagą, todėl reikia suvirinimo taške pakelti temperatūrą, kuri yra artima lydymosi temperatūrai. Atsižvelgus į tai, suvirinimo parametrai turi būti keičiami norint išgauti tokią pačią suvirinimo taško kokybę.

Žalvaris plačiai naudojamas elektriniuose įrenginiuose, šilumos perdavime, taip pat padengiant paviršius. Paviršių dengimas žalvariu leidžia sumažinti mechanizmų užsikirtimo tikimybę. Žalvaris panaudojamas mažinti gamybos išlaidas, taip pat elektros gavyboje ir perdavime. Šilumos perdavimui naudojant žalvarį, gaunamos puikios šiluminio laidumo savybės, taip pat užtikrinamas stiprumas. Transporto pramonėje šios savybės gali padėti sutaupyti energetinius kaštus.

1.5. Frikcinio taškinio suvirinimo metodo palyginimas

Metalo apdirbimo pramonėje ieškoma įvairių apdirbimo ir detalių sujungimo būdų, kurie leistų efektyviai ir kokybiškai atlikti detalių apdirbimą. Todėl yra labai svarbu, kad procesas būtų kuo greitesnis, naudotų kuo mažiau medžiagų ir būtų pritaikomas daugeliui apdirbamų medžiagų. Pramonės atstovai ieško būdų kaip sumažinti gamybos išteklius ir padaryti apdirbimo procesus patikimus ir aplinką tausojančius. Frikcinis taškinis suvirinimas turi daugelį reikalingų požymių, kurie leistų pasiekti norimą efektyvumą. Atlikti bandymai [11], kuriais norėta įsitikinti frikcinio taškinio suvirinimo efektyvumu, energijos procese taupymu ir proceso ekologiškumu.

Pagrindiniai rodikliai yra šie:

- ✓ Aukšta suvirinimo kokybė;
- ✓ Sumažėjęs medžiagų išsikraipymas;
- ✓ Maži energetiniai reikalavimai;
- ✓ Nereikia papildomų medžiagų;
- ✓ Nereikia papildomos stiprios ventiliacijos;
- ✓ Lengva pritaikyti daugeliui pozicijų;
- ✓ Didelis ilgaikiškumas;
- ✓ Galima jungti tiek geležies, tiek kitų metalų lydinius, o taip pat kai kuriuos nemetalus;

- ✓ Galima sujungti du skirtingus metalus;
- ✓ Sujungimo stiprumas artimas medžiagos stiprumo ribai;
- ✓ Sujungiamų medžiagų storis nuo 1mm iki 50mm;
- ✓ Sujungiant nesukuriamos aplinkai kenksmingos dujos;
- ✓ Tylus sujungimo procesas
- ✓ Nėra stiprių šviesos šaltinio taškų;
- ✓ Nesusidaro medžiagos purlai;
- ✓ Nereikia cheminio arba mechaninio sujungtų detalių apdirbimo.

Elektrinis taškinis suvirinimas, įvairūs užraktai, varžtiniais sujungimai, kniedijimas – yra pagrindiniai vieno taško detalių sujungimo būdai, naudojami šiandieninėje pramonėje. Palyginus elektrinį taškinį suvirinimą su frikciniu taškiniu sujungimu, galima išvengti problemų, tokių kaip lengvųjų metalų oksidų plėvelės, paviršiaus užteršimo riebalais nuėmimas prieš suvirinimą, elektrodų apaugimas suvirinama medžiaga, proceso pritaikomumas įvairioms suvirinimo sąlygoms.

Lyginant FSSW sujungimą su varžtiniu arba kniediniu sujungimu, procesas tampa pigesnis. Surinkimas yra lengvesnis ir neapkraunamas papildomomis jungiamosiomis detalėmis. Procesas atpinga, nes nereikia naudoti brangių varžtų ar kniedžių, sumažinamas gaminio surinkimo laikas atsižvelgiant, kad sujungimo nereikia suveržti ir gręžti skylių. Nereikia papildomai naudoti paviršiaus apdirbimo metodų ir tai leidžia sumažinti broko tikimybę.

Atsižvelgiant į tai, kad pramonė ieško kaip efektyviau išnaudoti laiką, žmogiškuosius išteklius, optimizuoti procesus, šis būdas leidžia tai pasiekti panaudojant procesų automatizavimą. Lengvųjų lydinių naudojimas pramonėje auga, todėl svarbu pritaikyti procesus, kurie būtų tinkamiausi ir galėtų užtikrinti aukštą patikimumą. FSSW yra neseniai išrastas būdas, todėl procesas gali būti tobulinamas, naudojant ekonomiškесnius sprendimus.

Žvelgiant iš praktinės pusės, frikcinis taškinis suvirinimas skiriasi savo efektyvumu nuo dabar pramonėje naudojamų suvirinimo būdų. Šio suvirinimo metu sujungimas užtikrinamas tik įrankio judėjimu. Šiuo būdu naudojama mažiau elementų, kurie mažina pačio suvirinimo kainą. Šio suvirinimo procesas panašus į taškinį elektrinį suvirinimą (angl. RSW – *Resistance Spot Welding*). Frikcinio taškiniu suvirinimo įrankį galima ilgai naudoti, o taip pat po suvirinimo nereikia atlikti papildomų suvirintos vietos cheminių ar mechaninių paviršiaus valymo darbų.

FSSW suvirinimas, skirtingai nei elektrinio lanko suvirinimo būdas, nereikalauja apsauginių dujų fono, kuriame atliekamas suvirinimas. Šaltiniai teigia, kad suvirinimo taško sudarymui galima sutaupyti net iki 99% energijos[11], lyginant šį būdą su kitais suvirinimo būdais.

1.6. Frikcinio taškinio suvirinimo proceso parametrų tyrimai

Frikcinio taškinio suvirinimo proceso parametrų tyrimo straipsnių pasaulyje pateikta nedaug. Dažniausiai šie tyrimai nagrinėja tik vieno lydinio proceso parametrų įtaką frikciniam suvirinimui.

FSSW suvirinimo metu galima keisti kelis parametrus, kurie įtakoja suvirinimo kokybę. Dažniausiai keičiami parametrai yra įrankio sukimosi greitis n , pastūma F_z ir išlaikymo laikas DT (*angl. dwell time*) [13 - 15]. Rečiau keičiami parametrai yra įrankio įsigilinimo gylis PD (*angl. plunge depth*), ašelės įsigilinimas AP (*angl. axis penetration*) (1.1 lentelė). Kiekvienas proceso parametras įtakoja fizikinį procesą, atsirandantį FSSW suvirinimo metu.

1.1. lentelė. Suvirinimo proceso metu keičiami parametrai

Parametras	Paaškinimas	Kitimo ribos
n	Įrankio sukimosi greitis	400 -5000 min ⁻¹
F_z	Įrankio įsigilinimo pastūma	5-150 mm/min
DT	Įrankio giliausioje vietoje išlaikymo laikas	1-90 s
PD	Įrankio įsiskverbimo į medžiagą gylis	Priklausomai nuo suvirinamų plokščių storio
AP	Įrankio ašelės įsiskverbimo gylis	Priklausomai nuo suvirinamų plokščių storio

Įrankio sukimosi greitis n įtakoja išskiriamos šilumos kiekį Q . Nuo to, kiek išskiriama šiluma, priklauso kiek metalo išsilydys aplink ašelę. Jeigu šilumos kiekis nebus pakankamas, tokios medžiagos, pvz., anglinis plienas negalės susivirinti, nes lydymosi temperatūra yra gan aukšta (virš 1000 °C). Dėl įrankių sūkių taip pat kinta plokštelių medžiagos sumaišymas, tačiau sukimosi greitis neturi būti per didelis [3], nes medžiagos nespėja susimaišyti ir dėl to nukenčia suvirinimo kokybė.

Įsigilinimo pastūma F_z leidžia keisti medžiagos plastinę deformaciją. Kuo įrankio įsigilinimo pastūma didesnė, tuo daugiau medžiaga plastiškai deformuojasi. Dėl šios priežasties kenčia aplink suvirinimo vietą esanti medžiaga. Jeigu parenkamas per maža įrankio įsigilinimo pastūma, tada medžiagos mažai deformuojasi ir suvirinimo taškas yra sukuriamas tik dėl šilumos kiekio, kuris taip pat įtakoja suvirinimo vietos stiprumą [3].

Įrankio išlaikymo laikas DT įtakoja išskiriamos šilumos kiekį. Per didelis šilumos kiekis gaunamas ilgo išlaikymo metu termiškai paveikia aplink tašką esančią medžiagą. Termiškai paveikiamos medžiagos praranda kai kurias mechanines savybes.

Įrankio įsiskverbimo gylis PD taip pat svarbus parametras, nes jis turi būti tinkamai parenkamas priklausomai nuo suvirinamo medžiagos storio. Jeigu viršutinė plokštelė dėl

įsiskverbimo gylio bus stipriai suspausta, suvirinimo vieta praras stiprumą. Jeigu viršutinė plokštelė negaus pakankamai suspaudimo, suvirinimo taško įgaus kitokią formą ir taip pat praras stiprumą.

Ašelės įsiskverbimo gylis AP gali pakeisti medžiagos sumaišymo savybes. Tačiau svarbu atsižvelgti, kad suvirinamos medžiagos negali būti pradurtos ašelės, taigi geriausias pasirinkimas būtų nuo 0,3 iki 0,8 apatinės plokštelės storio ribose.

1.7. Literatūros apžvalgos išvados

Pasaulyje frikcinio taškinio suvirinimo tyrimai yra dar mažai žinomi ir šio suvirinimo tipo tyrimus finansuoja didelės organizacijos, kaip Hitachi, valstybinis sektorius. Atliekant šiuo tyrimus didžioji dalis lėšų skiriama skirtingų profilių įrankiams pagaminti ir patikrinti jų tarpusavio ekonomiškumą, norit pasiekti geriausią suvirinimo kokybę.

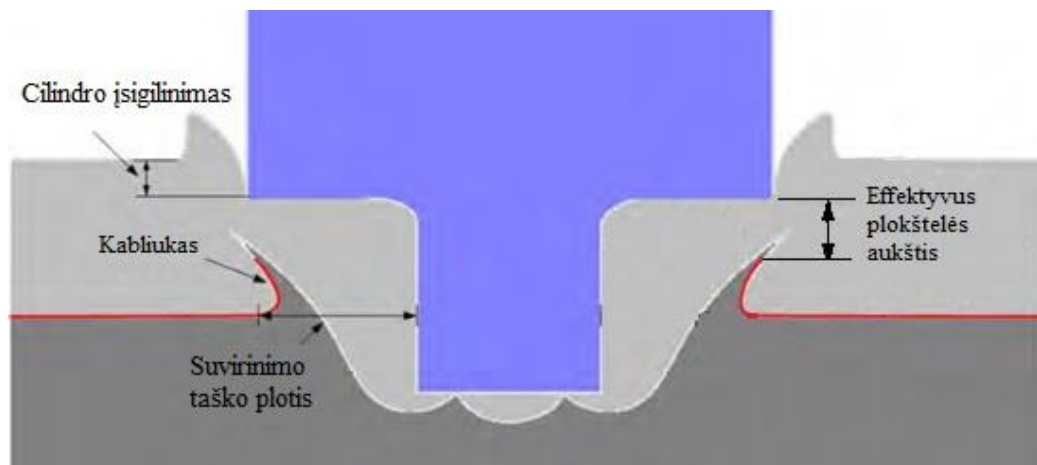
Daugiausia tyrimų atliekami medžiagos tekėjimo savybėms frikcinio taškinio suvirinimo metu nustatyti. Mokslininkai tiria kas sudaro didžiausią ryšį suvirinimo metu. Pačiuose elementariausiuose tekėjimo tyrimuose, kristalų ir grūdelių susidarymo metu sukuriamas taško suvirinimo stiprumas.

Frikcinis taškinis suvirinimas dažniausiai tirtas panaudojant įvairius aliuminio lydinius. Didžioji dalis mokslininkų ieško būtų kaip suvirinimo įrankis įtakoja suvirinimo vietos formavimąsi. Atlikti įrankių tyrimai rodo, kad geriausia suvirinimą atlikti su įrankius, kuris turi 5° - 10° įgilinimą ir ašelė yra su kairiniu sriegiu bei išpjovomis [3, 4, 6, 7]. Pasirinkus šį įrankį, geriausiai susiformuoja „kabiliukas“, kuris užtikrina suvirinimo stiprumą. Žvelgiant į tyrimus atliktus su suvirinimo procesais [1, 5, 14] pastebėta, kad didžiausią įtaką daro 3 pagrindiniai proceso kintamieji: įrankio sukimosi greitis n , vertikali įsigilinimo pastūma Fz ir išlaikymo laikas DT . Keičiant šiuo parametrus, gaunami skirtingi rezultatai – ašinė jėga, momentas, suvirinimo taško plotis. Mokslinės publikacijos, tiriančios suvirinimo procesų įtaką, skelbia, kad aukšti sūkliai kenkia suvirinimo kokybei, nes medžiagos nespėja susimaišyti ir nesusiformuoja suvirinimo vietos „kabiliukas“.

2. Eksperimentinė dalis

2.1. Įvadas

Frikinio taškinio suvirinimo tyrimo eksperimentinė dalis susideda iš dviejų dalių. Pirmoje dalyje matuojamos ašinės jėgos, nustatomos priklausomybės tarp frikinio taškinio suvirinimo proceso parametrų (įrankio sūkių, įsigilinimo pastūmos, išlaikymo laiko) ir išėjimo kintamųjų (ašinės jėgos). Kaip pastebėjo Zhikang Shen [1] suvirinimo proceso parametrai stipriai įtakoja suvirinimo kokybę. Atliktų tyrimų išvados [3,4, 12,17] rodo, kad ašinės jėgos atsirandančios suvirinimo proceso metu turi tiesioginę įtaką suvirinimo taško susiformavimui, kuris lemia suvirinimo stiprumą. Kokybinės suvirinimo taško savybės šio tyrimo metu nustatomos pagal ašinės jėgas. Atsižvelgiant į tai, kad skirtingas proceso parametras turi nevienodą įtaką suvirinimo kokybei, atlikti bandymai keičiant proceso parametrus ir matuojant atsirandančią ašinę jėgą. Maksimalios ašinės jėgos kiekvieno bandymo metu rodo medžiagos reakciją į suvirinimo procesą parametrų kitimą. Lyginant gautas ašinių jėgų vertes galima nustatyti kokius proceso parametrus yra tinkamiausi.



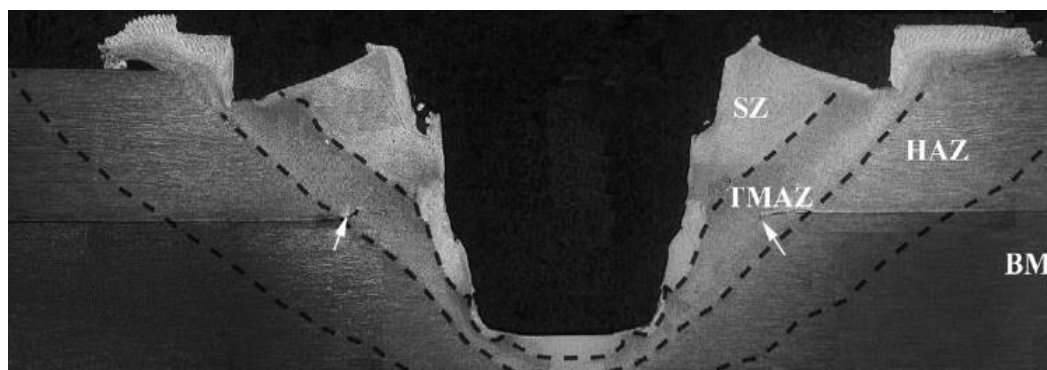
2.1 pav. Suvirinimo taško kabliuko parametrai. [13]

Antrojoje eksperimento dalyje vertinsime suvirintos vietos kokybę pagal suvirinimo taško skerspjūvį. Suvirinimo skerspjūvyje išskiriami keli parametrai turintys didžiausią įtaką suvirinimo taškui [1-3] – tai suvirinimo plotis, efektyvusis plokštelės storis, suvirinimo zonų pasiskirstymas (2.1 ir 2.2 pav.)

Frikinio taškinio suvirinimo metu išskiriama šiluma veikia aplink suvirinimo įrankį esančią medžiagą. Šilumos paveikta medžiaga tampa takesnė, ją lengviau galima sumaišyti ir nukreipti jo judėjimą. Suvirinus frikiniu būdu išsiskyrusi šiluma ir mechaninis maišymas skirtingai paveikia aplink tašką esančią medžiagą. Galima išskirti kelias pagrindines zonas susidariusias dėl skirtingo

terminio ir mechaninio poveikio. Šias zonas galima išskirti suvirinimo skerspjūvyje (2 pav.). Vieta, kurioje judėjo maišomas metalas, vadinama maišymo zona (SZ). Maišymo vieta labiausiai paveikta terminio poveikio, nes tiesioginio lietimosi su įrankiu metu dėl trinties kaito. Šioje vietoje metalo grūdėliai susidaro smulkiausi. Nuo suvirinimo taško ašies judant toliau už maišymo zonos yra terminio-mechaninio poveikio zona (TMAZ). Ši zona yra paveikta tiek mechaninio poveikio (spaudimo), tiek terminio (šilumos perdavimas per medžiagas), tačiau medžiaga nesimaišo. Už termo-mechaninio poveikio zonos yra tik terminio poveikio vadinama termiškai paveiktą zona (HAZ). Termiškai paveiktoji zona dėl šilumos slydimo medžiagoje buvo šildoma, tačiau nepatyrė jokio mechaninio poveikio. Plokštelės, kurios nepaveiktos suvirinimo taško vadinama pagrindinė medžiaga (BM).

Kiekvienas taškas turi susiformavusi kabliuką, kuris parodo, kaip susijungė suvirinamos plokštės[3,13]. Suvirinimo kabliuko parametrai yra suvirinimo plotis ir efektyvus plokštelės storis (1pav.) [13] . Tyrimo metu nustačius suvirinimo plotį mikroskopu ir analizuojant suvirinimo taško zonų pasiskirstymą galima daryti išvadas apie suvirinimo taško kokybiškumą.



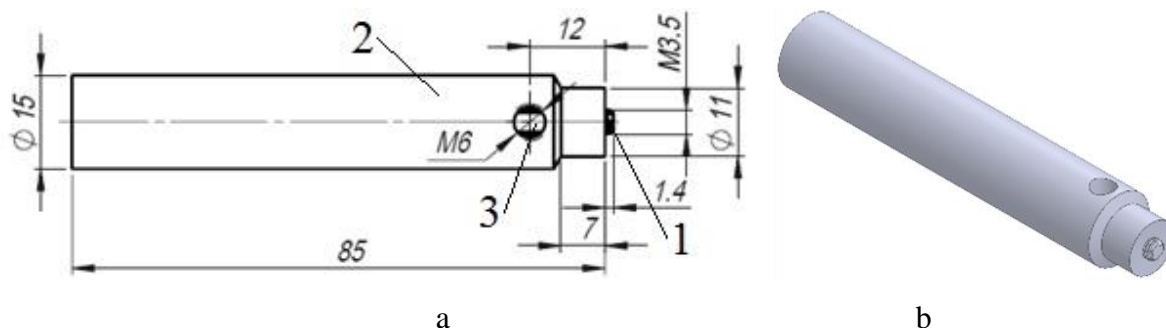
2.2 pav. Suvirinimo metu susidariusios zonos.[1]

2.2 Eksperimento įranga

Ekpermento bandymai buvo atlikti su CNC frezavimo staklėmis DECKEL MAHO DMU-35M ir „Sinumerik 810D/840D“ valdikliu, kuriame įrašyta programa „ShopMill“, su kuria galima sukurti frikcinio taškinio suvirinimo programą.

Eksperimentuose naudojamas įrankis, kuris pagamintas iš greitapjūvio plieno 1.2343 (EN ISO 4957:2000). Įrankio konstrukcija unikali, kurią pasiūlė austrų įmonė „Sitrtec“. Įrankis sudarytas iš 3 dalių – ašelės su M 3,5 sriegiu bei 3 išpjovomis, 11 mm skersmens cilindro su 5° įgilinimu ir tvirtinimo smeigės. Įrankio vaizdas su matmenimis yra pateiktas 2.3 pav. a ir erdvinis vaizdas pateiktas 2 pav. b. Šis įrankis palyginti su monolitiniiais įrankiais gali būti naudojamas ilgesnį laiką. Įrankiui

nusidėvėjus įrankiui nereikia iš naujo gaminti, užtenka tik apdirbti ašelės formą. Ši įrankio savybė įmonėms sutaupo lėšų skirtų įrankių atnaujinimui.



2.3 pav. Frikcinio taškinio suvirinimo įrankis: a) įrankio matmenys ir sudedamosios dalys: 1 – ašelė, 2 – cilindras, 3 – tvirtinimo smeigė; b) erdvinis įrankio vaizdas:

Suvirinimo metu atsirandanti ašinė jėga buvo matuojama pjezoelektriniu dinamometru Kistler 9345B. Šis jutiklis yra standus ir turi aukštą savitąjį dažnį, tai leidžia išvengti aukšto dažnio procesų rezonanso. Jutiklis yra patogus naudoti, nes gali būti pritvirtintas prie įvairių staklių stalo. Kistler dinamometro matavimo ribos jėgai -10...10 kN, jautrumas ~-3.7 pC/N. Dinamometras du išėjimus- ašinės jėgos F_z ir sukimo momento M_z , kuriuo sujungiamas su stiprintuvu. Signalui sustiprinti naudojamas Kistler 5018A laboratorinis stiprintuvas. Ašinės jėgos pokytis fiksuojamas osciloskopo „Picoscope 4024“ pagalba. Gautos vertės buvo įrašomos į kompiuterinę laikmeną naudojant „Picoscope 6“ programą.

Bandymuose buvo suvirinamos dvi tos pačios medžiagos plokštelės. Pasirinkti aliuminio lydiniai AL5457, AL1050, žalvario lydinys CuZn37 ir vario M2. Dvi 1 mm storio vienodų medžiagų plokštelės, kurių matmenys 150 x 60 mm. Plokštelės įtvirtinamos į matavimo įtaisą, kuris parodytas 2.4 pav. b. visu plotu uždengiant viena kitą. Plokštelės įveržiamos laikiklyje, kad būtų išvengta nepageidaujamo plokštelių judėjimo. Suvirinimo stalo padėtis užtikrinama statmena sūkliaus ašiai.



a)



b)

2.4 pav. Eksperimentinė įranga: a – bendras tyrimo stendo vaizdas; b – tvirtinimo ir matavimo įtaisas

2.3 Eksperimento metodika

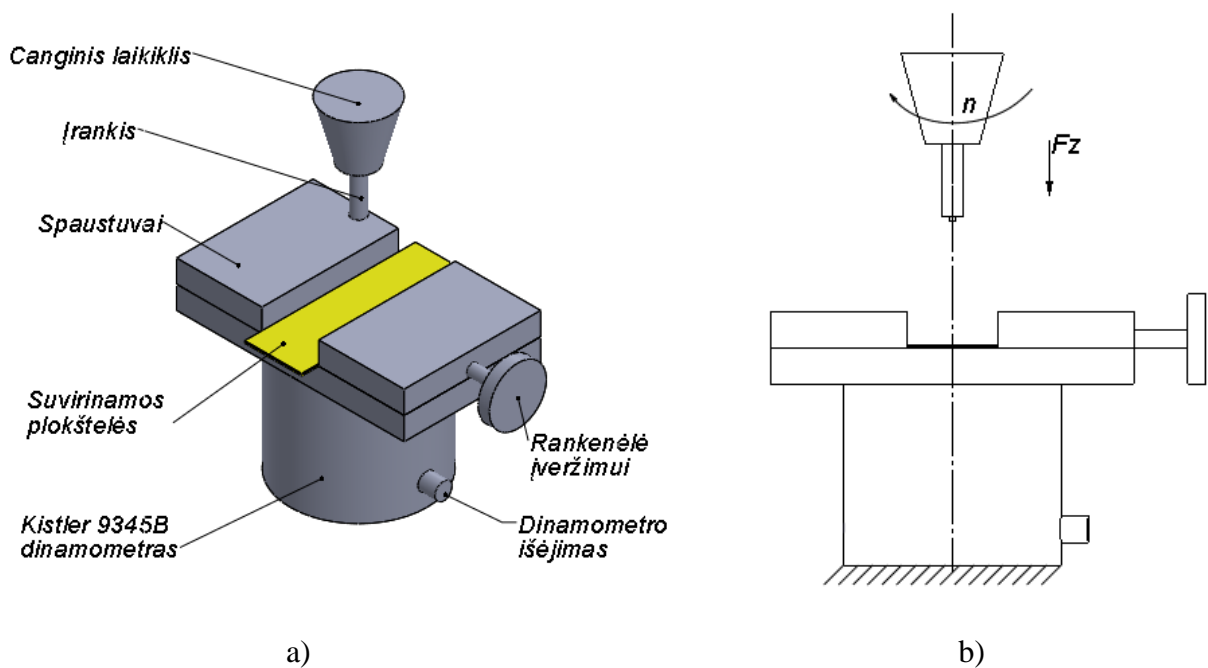
Eksperimentai buvo atlikti atsižvelgiant į mokslinius darbus [3-7]. Kiekvienas eksperimentas buvo atliekamas tokiomis pačiomis sąlygomis. Norint užtikrinti rezultatų kokybę buvo sukurta frikcinio taškinio suvirinimo ašinių jėgų ir momentų eksperimento metodika.

Dinamometras su pritvirtintais spaustuvais yra tvirtinamas prie staklių stalo (2 pav. b). Primontuojamas laikiklis ant staklių stalo. Sūklio ašis sutapatinama su „Kistler 9345B“ dinamometro ašimi. Tai padaroma sutapatinant įrankio cilindrinę dalį su laikiklyje esančia skylė, kuri yra ties jutiklio centru. Tokiu būdu sumažinama tikimybė gauti lenkimo jėgas, kurios atsiranda dėl ašių nesutapimo. Suvirinamos plokštelės turi būti griežtai 150 x 60 mm dydžio, kad įtvirtinus į spaustuvus abi plokštelės nejudėtų (2.5 pav. a).

Dinamometras sujungiamas su stiprintuvo „Kistler 5018A“ A kanalu. Stiprintuvo išėjimas sujungiamas su osciloskopu „Picoscope 4024“ sujungtu su nešiojamu kompiuteriu ir jame esančia „Picoscope 6“ programine įranga.

Įtvirtinus plokštelę nustatomas staklių nulinis staklių taškas. Po kiekvieno bandymo staklių „nulis“ nustatomas iš naujo, kad išvengtų nenumatytų „nulio“ pokyčių. Stiprintuvas „Kistler 5018A“ automatiškai sukalibruojamas.

Pasiruošus eksperimentams atliekamas neįskaitinis bandymas. Pirmojo bandymo rezultatais nustatomas programinė įrangos įėjimo diapazonas ir taškų įrašymo dažnis. Neįskaitinis bandymas kartojamas norint įsitikinti, kad įvedimo reikšmės parinktos teisingai.



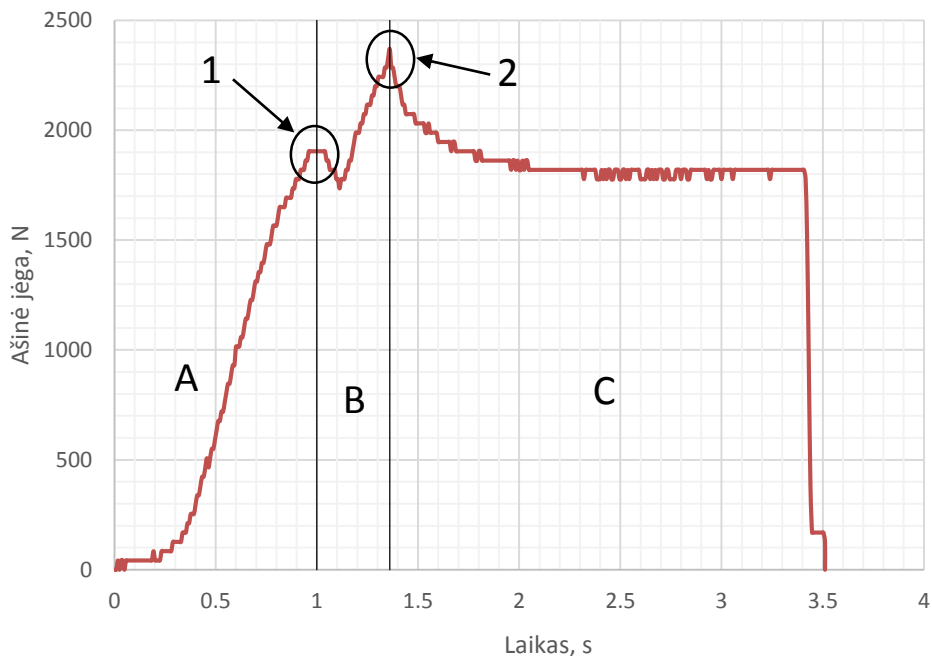
2.5 pav. Suvirinimo eksperimentinė įranga: a) įrangos dalys; b) bandymo schema.

2.4 Eksperimento rezultatai

2.4.1 Eksperimentinės jėgos kitimo kreivė

Norint suprasti eksperimento metu atsirandančias jėgas reikia išskirti kelias zonas ašinės jėgos kitimo grafike. Suvirinimo procese dalinamas 3 pagrindines zonas ir 2 kritinius taškus (2.6 pav.). Pradedant suvirinimą ašinė jėga kinta tiesiškai neįvertinant plastinių deformacijų. Tiesinį jėgos kitimą grafiko pradžioje paaiškina tolygus įrankio įsigilinimas į suvirinamas medžiagas. Šis procesas trunka iki tol, kol įrankis pasiekia viršutinės plokštelės apatinę dalį, t. y. ją praduria pirmąją plokštelę. Ši zoną 4 paveikslėlyje pažymėta A raide. A zonos pabaigoje yra fiksuojamas pirmasis kritinis taškas, kuris rodo plokštelės pradūrimą. Įrankiui judant įsigilinimo pastūmos greičiu gilyn pasiekia tuštumą tarp dviejų plokštelių ir ašinė jėga nesmarkiai krenta. Įrankio ašelės plokštumai pasiekus antrosios suvirinamos plokštelės paviršių jėga ima kilti. B zoną galime išskirti tuo, kad jėga yra žymiai aukštesnė nei reikalinga pirmajai plokštei pradurti. Jėgos kylimas paaiškinamas didesniu medžiagos kiekiu po suvirinimo įrankio cilindrine dalimi. B zonos pabaigoje yra antrasis kritinis taškas, kuris rodo, kad įrankio cilindrinė dalis yra įsigilinusį į medžiagą. Šioje pozicijos įrankis yra žemiausioje padėtyje – nustatytame įsigilinimo gylyje. Antrasis kritinis taškas yra svarbus šiame tyrime, nes tai yra maksimali ašinė jėga atsirandanti suvirinant plokšteles. Suvirinimo metu nustatytos maksimalios

jėgos įtakoja suvirinimo taško kokybę. Kritinio taško jėga kinta priklausomai nuo suvirinimo proceso, kurių metų išskiriama šiluma skirtingai veikia medžiagą aplink suvirinimo tašką.



2.6 pav. Frikcinio taškinio suvirinimo jėgos kitimo grafiko zonos

Nuo kritinio taško iki suvirinimo pabaigos ašinės jėgos grafike matomas jėgos nusistovėjimas vykstant medžiagos maišymui. Vykstant maišymo procesui išskiriamas daugiausiai šilumos. Metalui lydantis, ašinė jėga mažėja iki to momento, kai atsiranda temperatūrinė pusiausvyra – šilumos kiekis suteikiamas yra lygus į aplinkai atiduodamam kiekiui. Po nustatyto išlaikymo laiko įrankis staigiai atitraukiamas. Tai rodo ašinės jėgos staigus kritimas C zonos pabaigoje.

2.4.2 Aliuminio lydinio 5754 bandymų rezultatai

Aliuminio lydinys 5754 yra vienas iš dažniausiai naudojamų lydinių. Šis lydinys naudojamas laivų statyboje, automobilių korpusuose, žvejybos įrangai, kniedėms, maisto pramonėje, slėginiuose induose, cheminio panaudojimo įrangoje[30].

Aliuminio lydinio AL 5754 mechaninės savybės. Apibendrintas metalų mechanines charakteristikas galima sužinoti prekeivių puslapiuose, tačiau norint tiksliai nustatyti geriausia atlikti tempimo bandymus. Kiekvienos partijos metu aliuminio savybės kinta, todėl buvo atliktas tempimo bandymas mechaninėms charakteristikoms nustatyti.

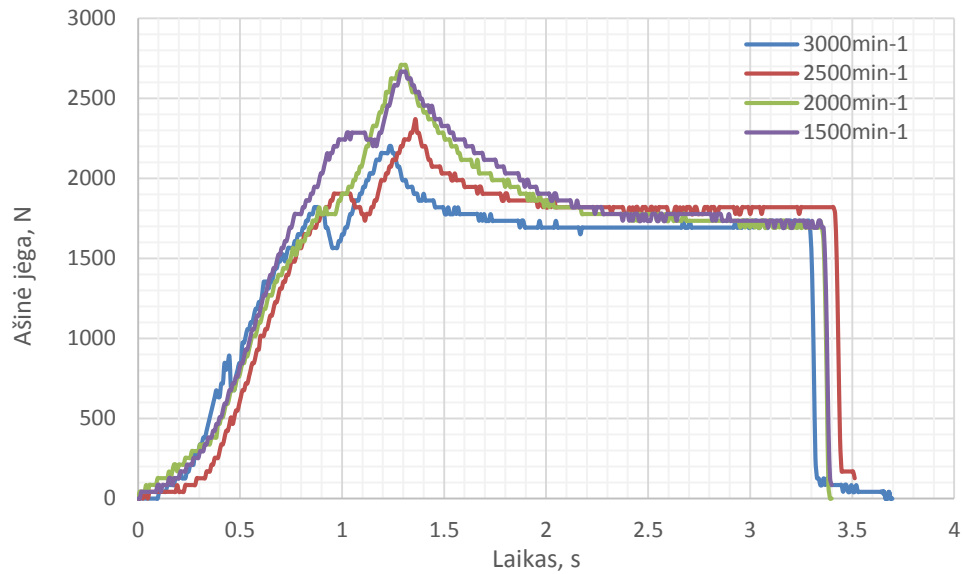
2.1 lentelė. Aliuminio lydinio AL 5754 ištirtos mechaninės charakteristikos.

Medžiaga	$R_{p0.2}$, MPa	R_m , MPa	A_5 , %
Aliuminio lydinys AL 5754	114.7	222.4	26.75

Frikinio taškinio suvirinimo bandymai. Bandymų metu buvo pasirinkta keisti 2 proceso parametrus – įrankio sukčius ir įsigilinimo greitį. Pagal H. Badarinarayan [2] geriausias suvirinimo gylis yra iki 50% antrosios apatinės plokštės. Todėl pasirinktas įsigilinimo gylis 1,5mm, kuris skaičiuojamas nuo viršutinės plokštelės plokštumos iki ašelės pagrindinės plokštumos. Įrankio cilindrinė dalis į medžiagą įsiskverbėdavo iki 0,1 mm. Išlaikymas parinktas eksperimentiniais bandymais, kuriuos atliko H. Badarinarayan. Atlikus literatūros apžvalgą pastebėta, kad dauguma atliktų bandymų yra su mažais sukimosi greičiais, todėl pasirinkti įrankio sukčiai keičiami nuo 1500...3000 min⁻¹ kas 500 min⁻¹. Įsigilinimo greitis nuo 60...140 mm/min kas 40 mm/min. Eksperimento bandymai ir maksimalios jėgos rezultatai parodyti 1 lentelėje.

2.2 lentelė. Al 5754 bandymų parametrai ir maksimalios jėgos rezultatai

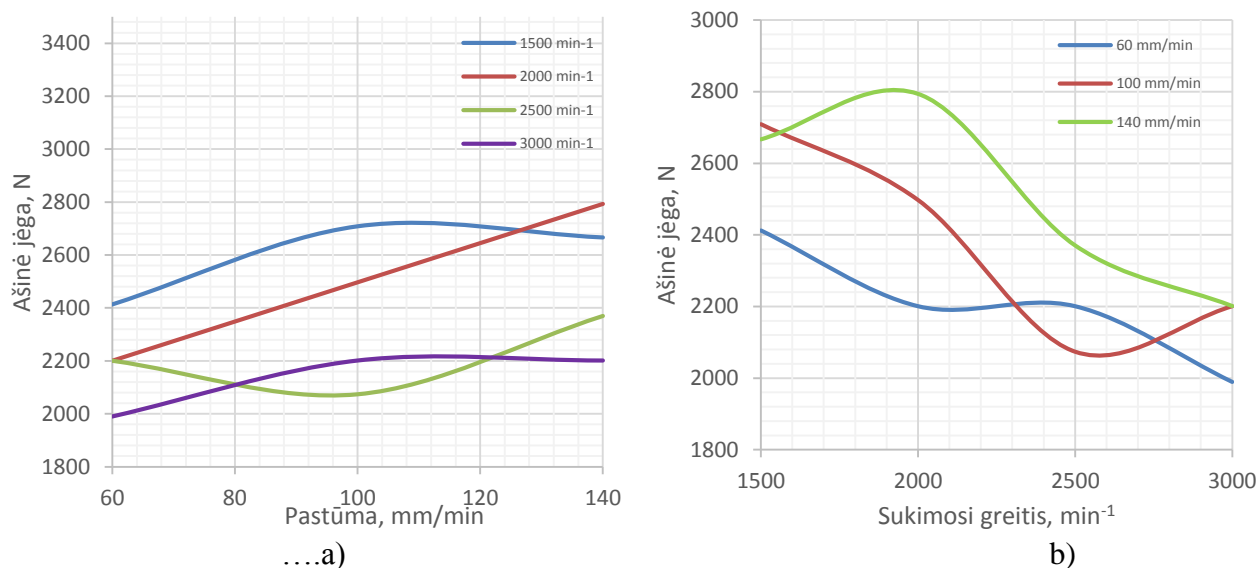
Eil. nr.	Medžiaga	Įrankio sukčiai, min ⁻¹	Įsigilinimo greitis, mm/min	Išlaikymas, s	Įsigilinimo gylis, mm	Maksimali jėga, N
1	Aliuminio lydinys AL5754	1500	60	2	1.5	2413
2		1500	100	2	1.5	2709
3		1500	140	2	1.5	2667
4		2000	60	2	1.5	2201
5		2000	100	2	1.5	2497
6		2000	140	2	1.5	2794
7		2500	60	2	1.5	2201
8		2500	100	2	1.5	2074
9		2500	140	2	1.5	2370
10		3000	60	2	1.5	1989
11		3000	100	2	1.5	2201
12		3000	140	2	1.5	2201



2.7 pav. Al 5754 jėgos kitimas laike, kai įsigilinimo greitis 140 mm/min.

Gauti suvirinimo jėgos kitimo grafikai (2.7 pav.) rodo, kad suvirinimo procese ašinės jėgos kinta pagal numatytą grafiką. Al 5754 priklausomybės grafike galima matyti visas būdingas priklausomybės zonas ir taškus. Grafike pavaizduotame 2.7 pav. galime pastebėti, kad maišymo fazėje nepriklausomai nuo sukimosi greičio jėgos yra labai panašios. Tai galima paaiškinti, kad išskiriamas kiekis suvirinimo procese yra pakankamas ir procese įsivyrėja šiluminė pusiausvyra.

Analizuojant duomenis sukurti priklausomybės grafikai, kurie parodo suvirinimo jėgos priklausomybę nuo įrankio sukimosi ir įsigilinimo greičio. Priklausomybės grafikai pateikti 6 pav. leidžia pastebėti, kad sukimosi greitis turi didesnę įtaką ašinei jėgai esant mažiems sukimosi greičiams, o įrankio įsigilinimo greitis ašinę jėgą stipriau įtakoja esant didesniems įsigilinimo greičiams. Pavyzdžiui, esant $F_z=60$ mm/min įsigilinimo greičiui maksimali ašinė jėga kinta iki 200 N, o įsigilinimo greičiui pasiekus $F_z=140$ mm/min greitį gaunamas net apytiksliai 650 N skirtumas. Sukimosi greitis turi šiek tiek mažesnę skirtumą. Pasirinkus $n=1500$ min⁻¹ sukimosi greitį jėgų skirtumas yra apie 350 N, o 3000 min⁻¹ ašinė jėga kinta tik apytiksliai 200 N. Išanalizavus gautus rezultatus galima teigti, kad ašinei jėgai įsigilinimo greitis turi didesnę įtaką.



2.8 pav. Al 5754 priklausomybių grafikai: a) ašinės jėgos priklausomybė nuo įsigilinimo greičio; b) ašinės jėgos priklausomybė nuo sukimosi greičio.

Suvirinimo bandymų metu pastebėta ir analizuojant gautus duomenis buvo priimta prielaida, kad suvirinimo metu atsirandanti maksimali ašinė jėga koreliuoja su įrankio sukimosi greičiu n ir įrankio įsigilinimo pastūma F_z ir gali būti tiriama sukuriant kelių kintamųjų regresijos modelį.

Parametrų sklaidos analizė ANOVA leidžia sukurti bandymų modelį iš mažo skaičiaus bandymo rezultatų. ANOVA statistinis metodas galima įvertinti didelio parametrų skaičiaus (FSSW atveju proceso parametrų – įrankio sukimosi greitį, įrankio įsigilinimo pastūmos) ir jų tarpusavio sąveikos įtaką. Kiekvienas proceso parametras, kuris keičiamas bandymo metu, vadinamas faktoriumi. Bandymo metu suteikiamos reikšmės šiems parametrams vadinamos lygiais. Įvairios kombinacijos tarp šių lygių suteikia bandymų skaičių.

Eksperimentų metu atsirandančios ašinės jėgos kitimo priklausomybė nuo įrankio sukimosi greičio ir įrankio įsigilinimo pastūmos galima pavadinti dviejų faktorių trijų lygių ANOVA analize. Pagal 2 faktorių ANOVA, regresijos modelį galima aprašyti tokia lygtimi:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2, \quad (1)$$

kur X_1 ir X_2 – nepriklausomi kintamieji, a_0 , a_1 ir a_2 – regresijos lygties koeficientai.

2.3 lentelė. ANOVA parametrų sklaidos analizė

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i> - kriterijus	Įtaka <i>F</i>
Kintamieji	2	375854.2	187927.1	10.85412	0.010154
Sąveika	6	103883.4	17313.9		
Viso	8	479737.6			

2.4 lentelė. Regresijos koeficientų įvertinimai

	Koeficientai	Standartinis nuokrypis	T stat	Įtaka	Apatinė riba 95%	Viršutinė riba 95%
Riba	2822.889	303.4803	9.301719	8.74E-05	2080.299	3565.479
Kintamasis x_1 (n)	-0.381	0.107436	-3.54628	0.012126	-0.64389	-0.11811
Kintamasis x_2 (F_z)	4.058333	1.342956	3.02194	0.023339	0.772238	7.344429

ANOVA analizė parodo, kad galime teigti su 95% tikimybe, kad pasirinkti kintamieji n ir F_z daro įtaką ašinės jėgos kitimui suvirinimo proceso metu, nes gautas sklaidos palyginimo koeficientas F kriterijus yra didesnis už nustatyta i -tojo faktoriaus įtakos vertinimą $F_{0.05} = 5.14$ [32].

Pasinaudojus regresijos koeficientų įvertinimais, galima teigti, kad įsigilinimo greitis (kintamasis F_z) turi didesnę įtaką ašinei jėgai, nei sukimosi greitis n . Tiesinės regresijos modelis pagal nustatytus faktorių koeficientus gali būti išreikštas formule:

$$F_a = 2823 - 0.381 \cdot n + 4.058 \cdot F_z, \quad (2)$$

kur F_a – ašinė suvirinimo jėga, n – įrankio sukimosi greitis; F_z – įsigilinimo pastūma.

Ašinės jėgos formulė 2 leidžia apskaičiuoti ašinės jėgas, atsirandančias suvirinimo metu. Tokiu būdu galima sumažinti eksperimentu kiekį norint tiksliai nustatyti kokie parametrai yra geriausi suvirinant aliuminio lydinį AL 5754. Gautos priklausomybės skaičiavimo rezultatai parodyti 2.5 lentelėje. Kaip galima pastebėti apskaičiuotos maksimalios ašinės jėgos (2.5 lentelė) nuo eksperimentinių rezultatų skiriasi daugiausia 100 N. Vertinant tokį aukštą regresijos modelio tikslumą galime teigti, kad ašinės jėgos formulė 2 yra tinkama skaičiuoti maksimalias ašinės jėgas.

2.5 lentelė. Eksperimentinės ir apskaičiuotos jėgos prie nurodytų suvirinimo parametrų

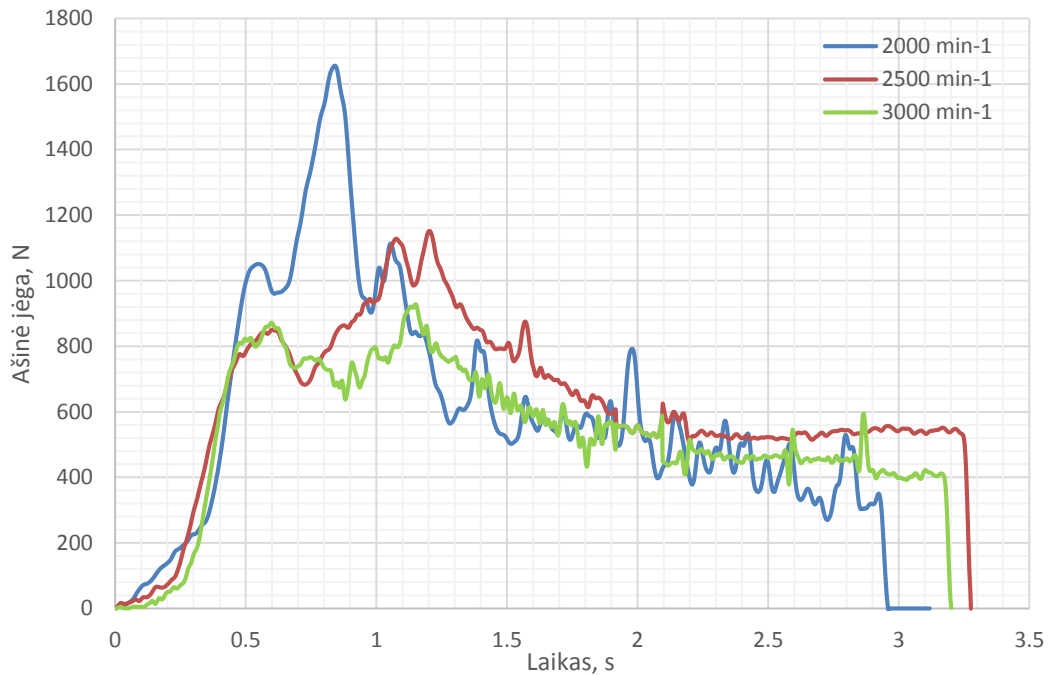
Įrankio sūkiai, min ⁻¹ ($X_1 = n$)	Įsigilinimo greitis, mm/min ($X_2 = F_2$)	Eksperimento metu gauta jėga F_a , N (Y)	Apskaičiuota jėga F_{calc} , N
1500	60	2413	2495
1500	100	2709	2657
1500	140	2667	2820
2000	60	2201	2304
2000	100	2497	2467
2000	140	2794	2629
2500	60	2201	2114
2500	100	2074	2276
2500	140	2370	2439
3000	60	1989	1923
3000	100	2159	2086
3000	140	2201	2248

2.4.3 Aliuminio lydinio 1050 bandymų rezultatai

Aliuminio lydinys 1050 taip pat vienas dažniausiai naudojamu metalų. Aukštas aliuminio kiekis lydinyje leidžia detales padaryti plastiškesnes ir aukšto atsparumo korozijai. Šis lydinys naudojamas chemijos pramonės įrengimuose, maisto pramonėje, taip pat įvairiuose namuose naudojamuose įrengimuose [31].

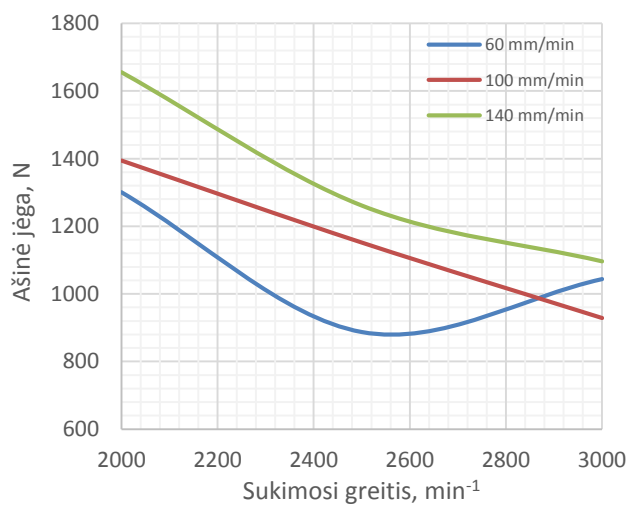
2.6 lentelė. Al 1050 bandymų parametrai ir maksimalios jėgos rezultatai

Eil. nr.	Medžiaga	Įrankio sūkiai, min ⁻¹	Įsigilinimo greitis, mm/min	Išlaikymas, s	Įsigilinimo gylis, mm	Maksimali jėga, N
1	Aliuminio lydinys AL1050	2000	60	2	1.5	1300
2		2000	100	2	1.5	1395
3		2000	140	2	1.5	1656
4		2500	60	2	1.5	887
5		2500	100	2	1.5	1152
6		2500	140	2	1.5	1262
7		3000	60	2	1.5	1044
8		3000	100	2	1.5	928
9		3000	140	2	1.5	1097

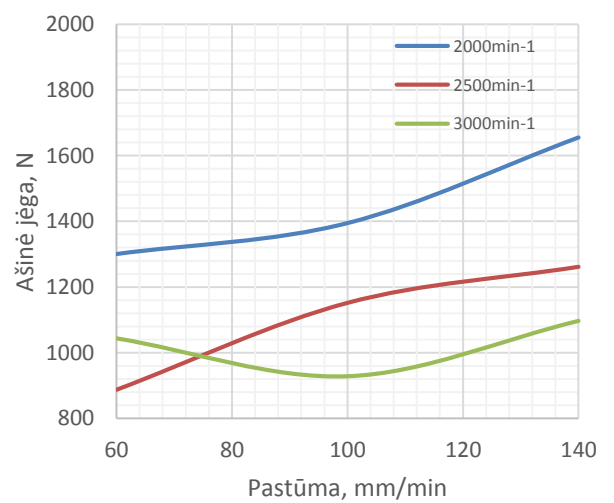


2.9 pav. Al 1050 suvirinimo jėgų kitimo grafikai esant 100mm/min įsigilinimo greičiui.

Tiriant Al 1050 pasirinkti tokie patys proceso parametrų kitimo diapazonai kaip ir AL 5754. Gauti suvirinimo rezultatai leidžia teigti, kad suvirinti Al 1050 yra sudėtingiau, nes pats lydinys yra tasesnis už Al 5754. Eksperimento kreivės (2.9 pav.) rodo, kad suvirinimo metu labai sudėtinga išskirti skirtingas suvirinimo proceso ašinės jėgos kitimo grafiko zonas. Al 5754 turint aukštesnę takumo ribą už Al 1050, aliuminio lydinio AL 5751 suvirinimo metu gautos jėgos yra didesnės.



a)



b)

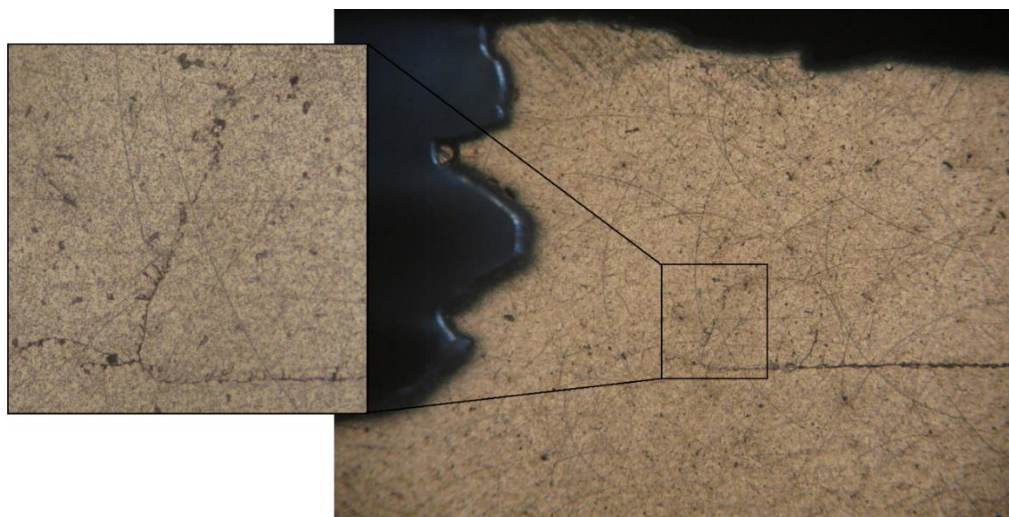
2.10 pav. Al 1050 priklausomybių grafikai: a) ašinės jėgos priklausomybė nuo įsigilinimo greičio; b) ašinės jėgos priklausomybė nuo sukimosi greičio.

Suvirinimo metu išsiskirianti šiluma lydinį AL1050 veikia panašiai kaip ir Al 5754. Pasirinkus aukštus sūkius suvirinimo proceso metu išsiskiria didelis šilumos kiekis. Jeigu skirtingu sukimosi greičių metu generuojamas šilumos kiekis yra pakankamas didelis ir medžiaga pasiekia aukštą temperatūrą, išsilydęs metalas mažai keičia savo medžiagos savybės ir ašinė įrankio jėga kis mažai. Bandymai su $n=3000 \text{ min}^{-1}$ įrankio sukimosi greičiu rodo, kad ašinė jėga kinta tik 170 N (2.10 pav.) tarp įvairių įsigilinimo greičių. Galime teigti, kad nepriklausomai nuo medžiagos suvirinimo metu pasirinkti aukšti sūčiai n nuo 2800 min^{-1} leidžia sumažinti jėgų skirtumą nuo įsigilinimo greičio. Galima pastebėti, kad pasirinkus aukštus įrankio sukimosi greičius ir aukščiausią įsigilinimo greitį ($F_z=140\text{mm/min}$) galima sumažinti suvirinimo laiką.

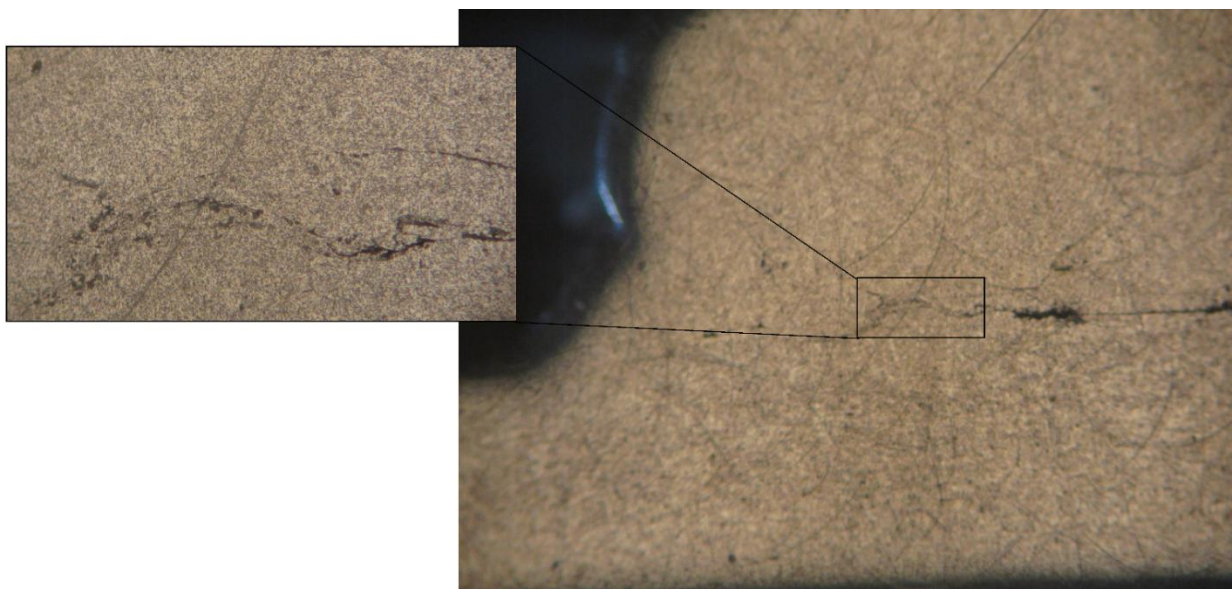
2.7 lentelė. Al 1050 suvirinimo pločio rezultatai.

Įrankio sukimosi greitis, min^{-1}	Įsigilinimo greitis, mm/min	Išlaikymas, s	Suvirinimo taško plotis iš kairės, μm	Suvirinimo taško plotis iš dešinės, μm
2500	60	2	2224.5	2294
2500	100	2	2500.5	2375
2500	140	2	1003.5	908
3000	60	2	2059.6	2118.5
3000	100	2	1134.3	768.7
3000	140	2	1448.8	1238.8

Matuojant suvirinimo plotį buvo registruojami rezultatai iš abiejų suvirinimo taško skerspjūvio pusių. Tokiu būdu galime teigti, kad apylygės reikšmės, gautos matuojant suvirinimo ploti iš abiejų suvirinimo taško skerspjūvio pusių, rodo vienodą medžiagos tekėjimą aplink suvirinimo įrankį. Rezultatai rodo (2.7 lentelė) , kad plačiausi suvirinimo taškai yra gauti prie mažų įsigilinimo greičių $F_z=60 \text{ mm/min}$. Gautus rezultatu galima paaiškinti, kad esant dideliame įsigilinimo greičiui $F_z > 60 \text{ mm/min}$ suvirinimo kabliukas užsiverčia į viršų (2.11 pav.). Toks kabliukas trukdo suvirinimo taškui plisti ir sudaryti platesnį suvirinimo tašką[1]. Tuo tarpu įsigilinimo greičiui esant $F_z < 60 \text{ mm/min}$, suvirinimo taško kabliukas gaunamas plokščias ir suvirinimo taškas gali plisti netrukdomai, tuo užtikrindamas geresnį plokščių suvirinimą(2.12 pav.).



2.11 pav. Al 1050 suvirinimo taško esant $n=2500 \text{ min}^{-1}$ ir $F_z=140 \text{ mm/min}$ mikrostruktūra



2.12 pav. Al 1050 suvirinimo taško esant $n=2500 \text{ min}^{-1}$ ir $F_z=60 \text{ mm/min}$ mikrostruktūra

. Suvirinimo vietoje atsirandantis kabliukas turi skirtingas formas, kurios dažniausiai priklauso nuo sukimosi greičio n ir įsigilinimo greičio F_z . Suvirinimo bandymo metu aliuminio lydinyje Al 1050 parodė, kad kabliuko formavimasis stipriai skiriasi nuo įsigilinimo greičio (2.11 ir 2.12 pav.). Kai įrankio sukimosi greitis yra $n=2500 \text{ min}^{-1}$ ir $n=3000 \text{ min}^{-1}$ suvirinimo taško plotis didžiausias, kai įsigilinimo greitis yra $F_z=60 \text{ mm/min}$.

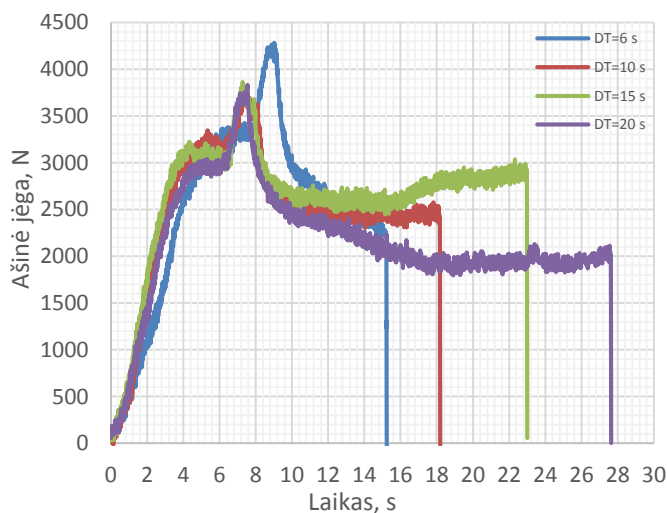
2.4.4 Žalvario CuZn37 bandymų rezultatai

Norint įsitikinti kokią įtaką suvirinant žalvarį ZuCn37 turi įrankio išlaikymo laikas DT suvirinamame metale buvo atlikti eksperimentiniai bandymai. Pasirinktos keturios išlaikymo laiko vertės 6, 10, 15 ir 20 sekundžių. Sudarytas eksperimentinis ašinės jėgos kitimo laike priklausomybių nuo išlaikymo laiko grafikas, kai pastovi minutinė pastūma $F_z=10$ mm/min ir įrankio sukimosi greitis $n=2000$ min⁻¹ (2.13 pav.).

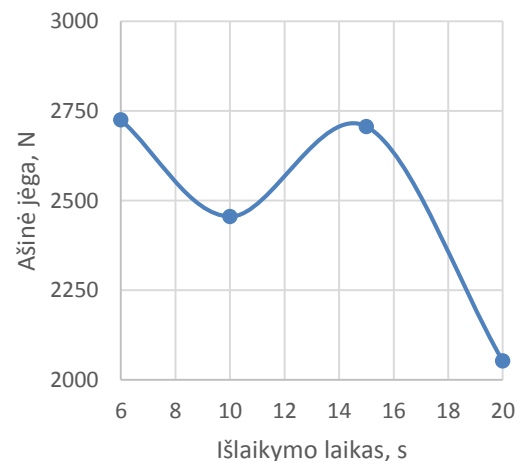
2.8 lentelė. Žalvario CuZn37 bandymų parametrai

Eil. nr.	Medžiaga	Įrankio sūkiai, min ⁻¹	Įsigilinimo greitis, mm/min	Išlaikymas, s	Įsigilinimo gylis, mm	Ašinė jėga, N
1	Žalvaris CuZn37	2000	10	6	1.5	2725
2		2000	10	10	1.5	2456
3		2000	10	15	1.5	2706
4		2000	10	20	1.5	2052

Suvirinant žalvarį pastebėta, kad suvirinimo metu išsiskiriantis kiekis veikia aplink esančią medžiagą, todėl ji keičia spalvą, ką pastebėjo ir Zafer [17] tirdamas vario ir žalvario frikcinį taškinį suvirinimą.



a)



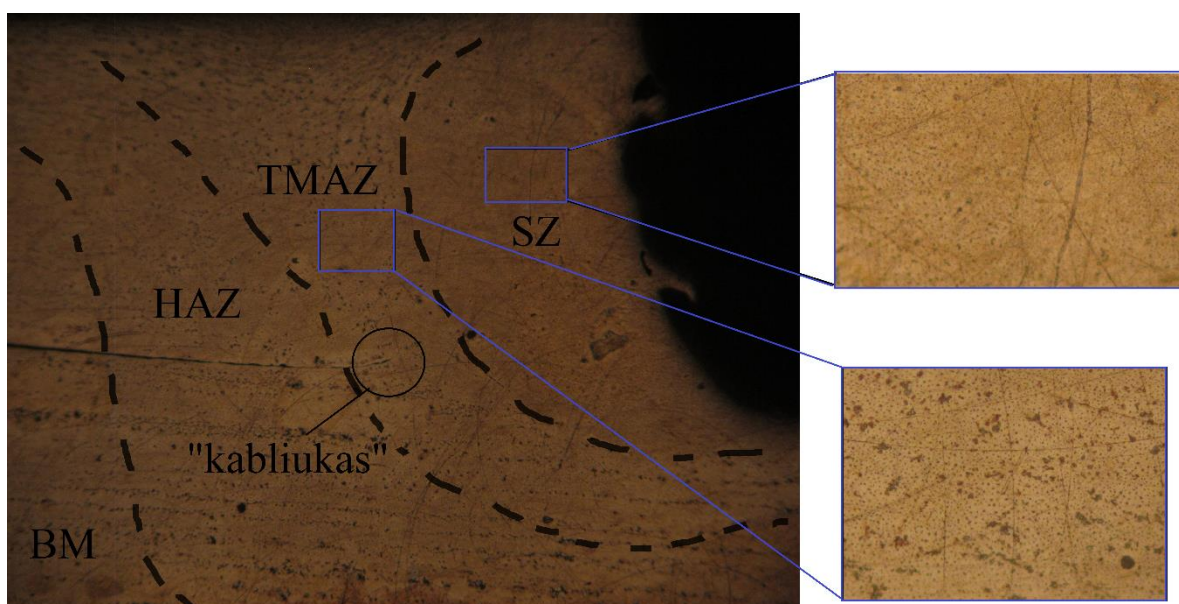
b)

2.13 pav. Žalvario CuZn37 ašinės jėgos priklausomybė.

Spalvotųjų metalų tyrimai daugiausia atliekami suvirinat frikciniu išilginiu suvirinimo būdu (FSW) [22-24]. Tiriant žalvario suvirinimo metu atsirandančias ašines apkrovas pastebėta, kad nusistovinti jėga, kuri veikia įrankį medžiagos maišymo procese, kinta atitinkamai nuo suvirinimo įrankio išlaikymo laiko DT (2.13 pav. b). Įrankio išlaikymo laikas didžiausią įtaką turi, kai išlaikymo laikas yra $DT=20$ s. Palyginti su 20 s išlaikymo metu nusistovintiems jėgoms, ašinės jėgos tarp 6, 10, 15 s yra apie 500 N didesnės. Pasinaudojus priklausomybės kitimo grafiku (2.13 pav. b) galima daryti išvadą, kad suvirinant žalvarį CuZn37 ilgesnio įrankio išlaikymo laikas nėra tinkamas nusistovėjusios jėgos mažinimui.

2.9 lentelė Žalvario CuZn37 suvirinimo pločio rezultatai.

Įrankio sūkiai, min-1	Įsigilinimo greitis, mm/min	Išlaikymas, s	Suvirinimo taško plotis iš kairės, μm	Suvirinimo taško plotis iš dešinės, μm
2000	10	6	594.7	573.9
2000	10	10	821.5	666.3
2000	10	15	1045.5	913.4
2000	10	20	455	600



2.14 pav. Žalvario CuZn37 frikcinio taškinio suvirinimo taško esant $DT=15$ s skerspjūvio zonos ir mikrostruktūros.

Analizuojant suvirinimo taškų pločius pastebėta, kad keičiant išlaikymo laiką didesnių pločio pakitimų neužfiksuota. Ištirta suvirinimo taško skerspjūvio struktūra parodė, kad susiformavusi maišymo zona SZ (2.14 pav.) yra labai plati palyginus su termo-mechaninio poveikio zona TMAZ.

Tai galima paaiškinti, kad per ilgą laiko tarpą išsiskiriantis šilumos kiekis plečia medžiagos maišymosi zoną, o termo-mechaninio poveikio zona tampa siauresnė. Toks suvirinimo zonų pasiskirstymas yra gerai, nes atsiranda didelis plotas sumaišytos medžiagos, tačiau nukenčia suvirinimo taško plotis. Analizuojant gautus rezultatus galima teigti, kad suvirinimo metu pasirenkant įrankio išlaikymo laiką nuo 6 s iki 15 s gaunamas suvirinimo taškas yra toks pats platus kaip ir išlaikant 20 s, nors maišymo metu atsirandančios jėgos prie 20 s išlaikymo yra mažesnės. FSSW suvirinti būdu žalvarį galima pasirinkti mažą išlaikymo laiką ir gauti panašaus pločio suvirinimo tašką.

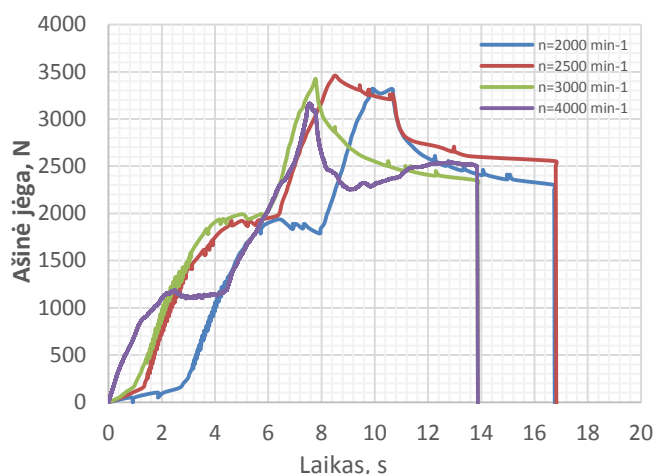
2.4.5 Vario M2 bandymų rezultatai

Eksperimento metu suvirinant varį M2 buvo keičiamas įrankio sukimosi greitis n . Pasirinktos keturios įrankio sukimosi greičių vertės 2000, 2500, 3000 ir 4000 min^{-1} . Sudarytas eksperimentinis ašinės jėgos kitimo laike priklausomybių nuo įrankio sukimosi greičio grafikas, kai pastovi minutinė pastūma $F_z=10 \text{ mm/min}$ ir išlaikymo laikas $DT=6 \text{ s}$ (2.15 pav.).

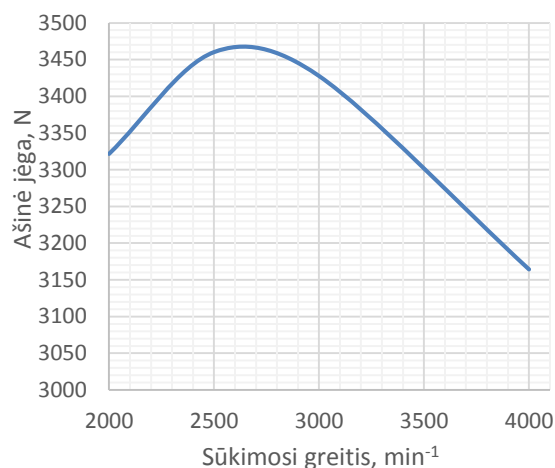
2.10 lentelė. Vario M2 bandymų parametrai ir maksimalios jėgos rezultatai

Eil. nr.	Medžiaga	Įrankio sūkiai, min^{-1}	Įsigilinimo greitis, mm/min	Išlaikymas, s	Įsigilinimo gylis, mm	Maksimali jėga, N
1	Varis M2	2000	10	6	1.6	3321
2		2500	10	6	1.6	3460
3		3000	10	6	1.6	3428
4		4000	10	6	1.6	3164

Ašinės jėgos kitimo laike priklausomybė nuo įrankio sukimosi greičio (2.15 pav.) rodo, kad suvirinant vario M2 plokšteles, ašinės jėgos vertė kinta tik aukštesnėse įrankio sukimosi greičių ribose kai $n>3000 \text{ min}^{-1}$ ir yra mažiausia įrankiui sukantis $n=4000 \text{ min}^{-1}$ greičiu. Tuo tarpu įrankiui sukantis 2000-3000 min^{-1} ribose, ašinės jėgos pokytis yra nežymus.



a)



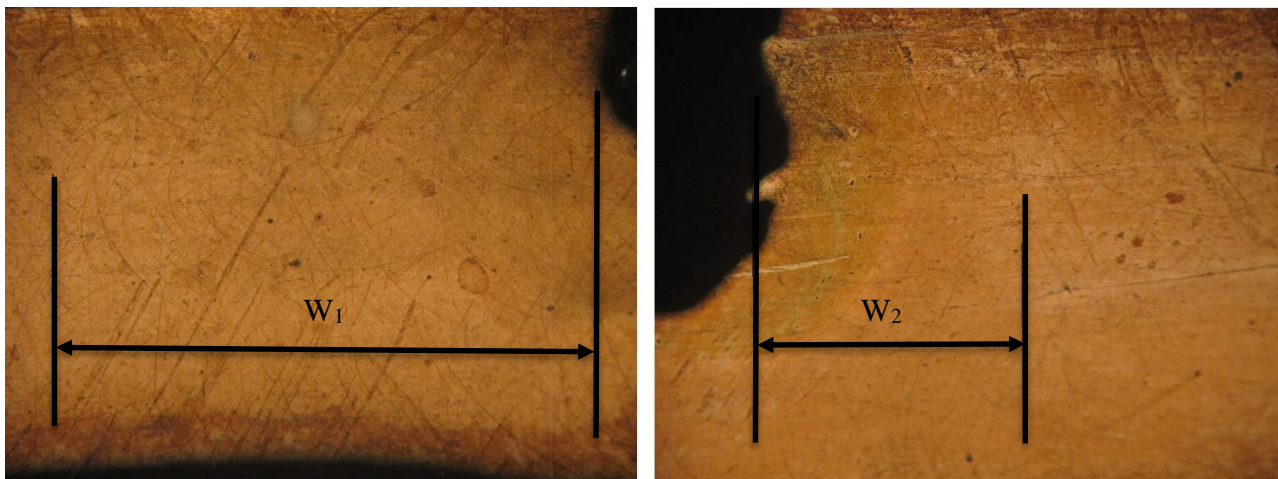
b)

2.15 pav. Vario M2 ašinės jēgas priklausomybēs: a) nuo laiko; b) nuo sūkimosi greiĉio.

2.11 lentelē. Vario M2 suvirinimo ploĉio rezultatai.

Įrankio sukimosi greitis, min ⁻¹	Įsigilinimo greitis, mm/min	Išlaikymas, s	Suvirinimo taško plotis iš kairės, μm	Suvirinimo taško plotis iš dešinės, μm
2000	10	6	507.4	548.7
2500	10	6	1555.3	1416.7
3000	10	6	2212	2462.6
4000	10	6	4458.6	3207.7

Suvirinimo skerspjūvio tyrimai parodo, kad keičiantis įrankio sukimosi greičiui stipriai keičiasi suvirinimo taško plotis. Gautuose rezultatuose (2.11 lentelė) pastebima, kad suvirinimo įrankio sukimosi greičiui didėjant gaunamas didesnis suvirinimo taško plotis. Maksimalus plotis pasiekiamas įrankiui sukantis $n=4000 \text{ min}^{-1}$ greičiu ir yra apie 8 kartus platesnis, nei suvirinant dvigubai mažesniu greičiu $n=2000 \text{ min}^{-1}$. Suvirinimo metu pasirenkant sukimosi greičius nuo 2500 min^{-1} iki 3000 min^{-1} suvirinimo taško plotis lyginant su gautu prie $n=4000 \text{ min}^{-1}$ yra apie 1,5-2 kartus mažesnis (2.16 pav.).



2.16 pav. Vario suvirinimo pločio pavyzdžiai esant : a) $n=4000 \text{ min}^{-1}$; b) $n=2500 \text{ min}^{-1}$;

Taigi suvirinant gryną varį M2 klasės gauti suvirinimo taško pavyzdžiai rodo, kad suvirinimo įrankio sukimosi greitis turi didžiulę įtaką suvirinimo taško pločiui. Gautais suvirinimo rezultatais žalvariui CuZn37 ir vario M2 galime sakyti, kad suvirinimo pločiui didesnę įtaką daro medžiagos maišymasis suvirinimo proceso metu, kai įrankis sukasi aukštais sukimosi greičiais $n=3000 \text{ min}^{-1}$ negu tuo metu, kai įrankis išlaikymo metu maišo medžiagą ilgesnį laiką. Todėl suvirinant medžiagas geriau pasirinkti aukštesnius sukimosi greičius, negu ilgą išlaikymo laiką, tuo pačiu sumažinant suvirinimo laiką.

2.5 Eksperimentinės dalies išvados

Atlikti eksperimentai, kuriuose matuojamos ašinės jėgos ir tiriama suvirinimo taškai panaudojant skerspjuvių mikrostruktūros vaizdais ir nustatius suvirinimo taško plotį.

Atliekant bandymus su aliuminio lydiniu AL5754, atlikti tempimo bandymai, kuriais nustatytos mechaninės charakteristikos – takumo riba, stiprumo riba, santykinis pailgėjimas. Atlikus suvirinimo bandymus, sudaryti ašinės jėgos priklausomybės nuo proceso parametrų grafikai. Nustatyta, kad sukimosi greitis turi mažesnę įtaką susidarančioms jėgoms, nesu įsigilinimo pastūma. Panaudojus dviejų faktorių ANOVA metodą, galima patvirtinti, kad ašinės jėgos pokyčiui pastūma turi didesnę įtaką.

Bandymai su aliuminio lydiniu AL1050 parodė, kad esant AL1050 esant plastiškesnei už AL5754 gaunami grafikai nėra tokie sklandūs. Ašinės jėgos yra gerokai mažesnes. Lyginant suvirinimo procesų įtaką pastebėta, kad proceso parametrai turi tokią pačią įtaką kaip ir AL 5754. Esant dideliems įsigilinimo greičiams gaunamos didesnių jėgų skirtumai tarp skirtingų sūkių. Suvirinimo taško skerspjuvio tyrimai rodo, kad suvirinimo taško plotis taip pat stipriai priklauso nuo

įsigilinimo pastūmos. Kai įrankio įsigilinimo pastūma yra 100 mm/min ir daugiau, sukuriamas suvirinimo taško kabliukas, kuris savo forma trukdo suvirinimo taško plėtimuisi. Norint gauti stiprų ir platų suvirinimo tašką reikėtų sumažinti įrankio įsigilinimo greitį.

Frikcinio taškinio suvirinimo rezultatai suvirinant žalvarį CuZn37 parodė suvirinimo jėgos ir suvirinimo taško priklausomybę nuo išlaikymo laiko. Nustatyta, kad išlaikymo laikas, ašinės jėgas maišymo periodu veikia labai nestipriai iki 15 s išlaikymo laiko ribos. Pasirinkus 20 s išlaikymo laiką, ašinė jėga stipriai krenta, nes išskiriamas šilumos kiekis išlydo medžiagą didesniu spinduliu nuo suvirinimo įrankio. Temperatūros paveikta medžiaga plastiškai deformuojasi ir jėga nukrenta. Suvirinimo taško skerspjuvio tyrimas parodė išsiskiriančias suvirinimo taško zonas, kurias galima išskaidyti ir pagal jas spręsti kaip formuojasi suvirinimo taškas.

Tyrimai su variu atlikti, nustatant sukimosi greičio įtaką suvirinimo jėgai ir taško pločiui. Vario M2 suvirinimo metu nustatyta mažiausia ašinė jėga kai suvirinimo įrankio sukimosi greitis buvo 4000 min^{-1} . Nors ašinė jėga, atliekant bandymą su skirtingais sukimosi greičiais, kito gana nedaug iki 300 N, tačiau suvirinimo plotis skyrėsi keliais kartais. Lyginant suvirinimo taškų plotį pastebėta, kad tarp 2000 min^{-1} ir 4000 min^{-1} suvirinimo taško plotis skiriasi net 8 kartus. Remiantis tyrimų rezultatais galima teigti, kad sukimosi greičio didinimas mažina ir ašinę jėgą ir suvirinimo taško plotį.

3. Frikcinio taškinio suvirinimo modeliavimas

3.1. Įvadas

Frikcinio taškinio suvirinimo metu nuo tarpusavyje kontaktuojančių kūnų dėl trinties atsiranda šiluma, kuri perduodama kūnams. Baigtinių elementų modelio sudarymui naudojama baigtinių elementų programa, kurioje įvertinami šilumos susidarymas ir kontaktuojantys kūnų paviršiai. Modeliui sudaryti svarbu pasirinkti metodas, kuris geriausiai įvertintų kūnų kontaktavimą ir juose atsirandančias vidines reakcijas - įtempius. Šio tyrimo metu pasirenkama ABAQUS programinė įranga, kurioje galima sumodeliuoti laike kintančius procesus, aplinkos įtaką ir kūnų tarpusavio ryšius. Modeliui apibrėžti naudojamos tiksliai ir aiškiai apibrėžtos formuluotės – kitaip vadinamas „explicit“ skaičiavimo metodas. Pasirinkus šį metodą sprendžiamos lygtys skiriasi nuo standartinio „implicit“ metodo. Metodai skiriasi vienas nuo kito naudojamais kompiuterio resursais ir skaičiavimo laiku.

Sudarant adaptyvų tinklę dinaminėje analizėje galima išlaikyti aukštą modelio tinklės tikslumą, net esant ir didelioms deformacijoms. Tuo pačiu užtikrinamas tinkamas medžiagos tekėjimo ir temperatūros pasiskirstymas frikcinio taškinio suvirinimo proceso metu.

Abaqus/explicit programinė įranga yra sudaryta remiantis baigtinių elementų metodu apskaičiuoti pereinamuosius dinامينius procesus, įvairioms fizikinėms savybėms tirti. Šis metodas patraukus įvairiems kvazistatiniams reiškiniams tirti. Ši programa tinkamai apibrėžia pereinamuosius procesus, kuriose yra netiesinės priklausomybės, tačiau pačios priklausomybės turi būti sklandžios. Šio metodo patrauklumas prieš standartinį (Abaqus/implicit) metodą apima tai, kad sutaupoma kompiuterio resursų, o taip pat kai kuriuose kontaktiniuose uždaviniuose standartinis modelis turi sunkumų sprendimo metu teisingai pasirinkti priartėjimo tikslumą. Taigi sprendžiant dinامينius uždavinius teisingiausia naudoti „explicit“ metodą – taip sutaupant laiko resursų ir tikimybės suklysti įvertinant kontaktus.

Abaqus programinė įranga pasižymi draugiška vartotojui aplinka. Abaqus/Explicit palyginus su Ansys priedu LS-DYN, kuria sprendžiami dinaminiai uždaviniai turi aišku uždavinio aprašymo medį. Abaqus programa galima sukurti skaičiavimo modelį, jį aprašyti ir išspręsti norimą uždavinį. Abaqus programoje baigtiniai elementai aiškiai aprašomi. Modelio suskaidymas į elementus yra labai paprastas. Didžiausias privalumas Abaqus skaičiavimo programos tai paprastai prieinamas ir lengvai suprantamas darbo vadovėlis. Atsižvelgiant į šiuos privalumus, frikcinis taškinis suvirinimas modeliuojamas Abaqus/explicit programine įranga.

3.2 Modeliavimo metodika

3.2.1 Skaičiavimo modeliai ir formulės

Frikinio taškinio suvirinimo modeliavimo metu įvertinami kietųjų kūnų ryšiai, terminės medžiagos savybės, kontakto taškai. Suvirinant frikcinio būdu šiluma generuojama dėl dviejų priežasčių – plastinių deformacijų ir suvirinimo įrankio bei medžiagos kontakto vietoje atsirandančios trinties. Didžioji dalis atrandančios šilumos yra dėl trinties tarp įrankio ir suvirinamos medžiagos ir sudaro apie 98 – 99 % išsiskiriančios šilumos. Šilumos sklidimas medžiagoje gali būti aprašomas formule [25]:

$$\rho c \frac{\delta T}{\delta t} = \left[k_x \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + k_y \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + k_z \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right] + \dot{q}_f, \quad (1)$$

kur ρ – medžiagos tankis, c – specifinė šiluma, T – temperatūra, t - laikas, k – šilumos laidumo koeficientas x , y , z kryptimis, \dot{q}_f – šilumos kiekis išsiskiriantis dėl trinties.

Išsiskiriantis šilumos kiekis dėl trinties gali būti apskaičiuojamas taip:

$$\dot{q}_f = \int_0^{T_f} \omega dT_f, \quad (2)$$

kur ω – įrankio kampinis sukimosi greitis ir T_f – trinties momentas suvirinimo metu.

Suvirinimo metu atsirandant šiluminiam poveikiui medžiagos mechaninės charakteristikos kinta. Modeliuojant suvirinimo procesą būtina įtraukti šilumos poveikį medžiagai, todėl medžiagos atsaką į šiluminį poveikį galima aprašyti Johnson Cook modeliu. Johnson Cook modelis leidžia nustatyti medžiagos atsaką ne tik į temperatūrą, bet ir į deformacijas bei deformacijos kitimo greitį.

Empirinė Johnson Cook modelio lygtis yra užrašoma [26]:

$$\sigma_y = (A + B[\bar{\varepsilon}^{pl}]^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}}\right)^m\right), \quad (3)$$

Kur σ_y – takumo riba, $\bar{\varepsilon}^{pl}$ – ekvivalentinės plastinės deformacijos, $\dot{\varepsilon}^{pl}$ – ekvivalentinių plastinių deformacijų greitis, $\dot{\varepsilon}_0$ – normalizuotas deformacijų greitis (priimtas $1,0 \text{ s}^{-1}$), $A, B, C, n, m, T_{ref}, T_{melt}$ – medžiagos konstantos.

Suvirinimo modelyje pasirenkama AL 5754 medžiaga, kuris turi nustatyta Johnson Cook modelį [27]. Aliuminio lydinio 5754 medžiagos Johnsono Cook medžiagos konstantos pateiktos lentelėje.

3.1 lentelė. Aliuminio lydinio AL 5754 Johnson Cook parametrai

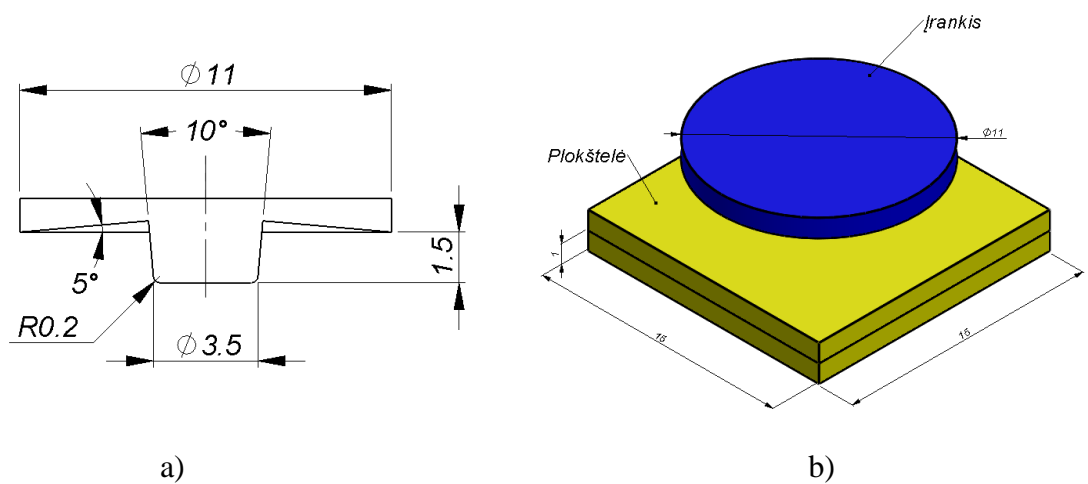
A	B	n	C	m
67,456	471,242	0,424	0,003	2,519

3.2 lentelė Aliuminio lydinio AL 5754 medžiagos parametrai [28]

<i>Parametras</i>	<i>Vienetai</i>	<i>Reikšmė</i>
Jungo modulis	GPa	70,5
Poisono koeficientas	-	0,33
Tankis	Kg/m ³	2680
Lydimosi temperatūra	K	918
Perėjimo temperatūra	K	303
Specifinė šiluma	J/kgK	897
Šiluminio laidumo koeficientas	W/(mK)	132

3.2.2 Skaičiavimo modelis

Frikinio taškinio proceso modelis aprašomas pasinaudojant medžiagos savybėmis, kurios nurodytos 3.1 ir 3.2 lentelėse. Įrankiui medžiaga pasirinkimas įtakos, nes darome prielaidą, jog frikinio taškinio suvirinimo metu įrankis nesideformuoja ir per jį šiluma nenuteką į aplinką. Šią prielaidą daroma norint sutaupyti skaičiavimo resursų [25, 26, 29].

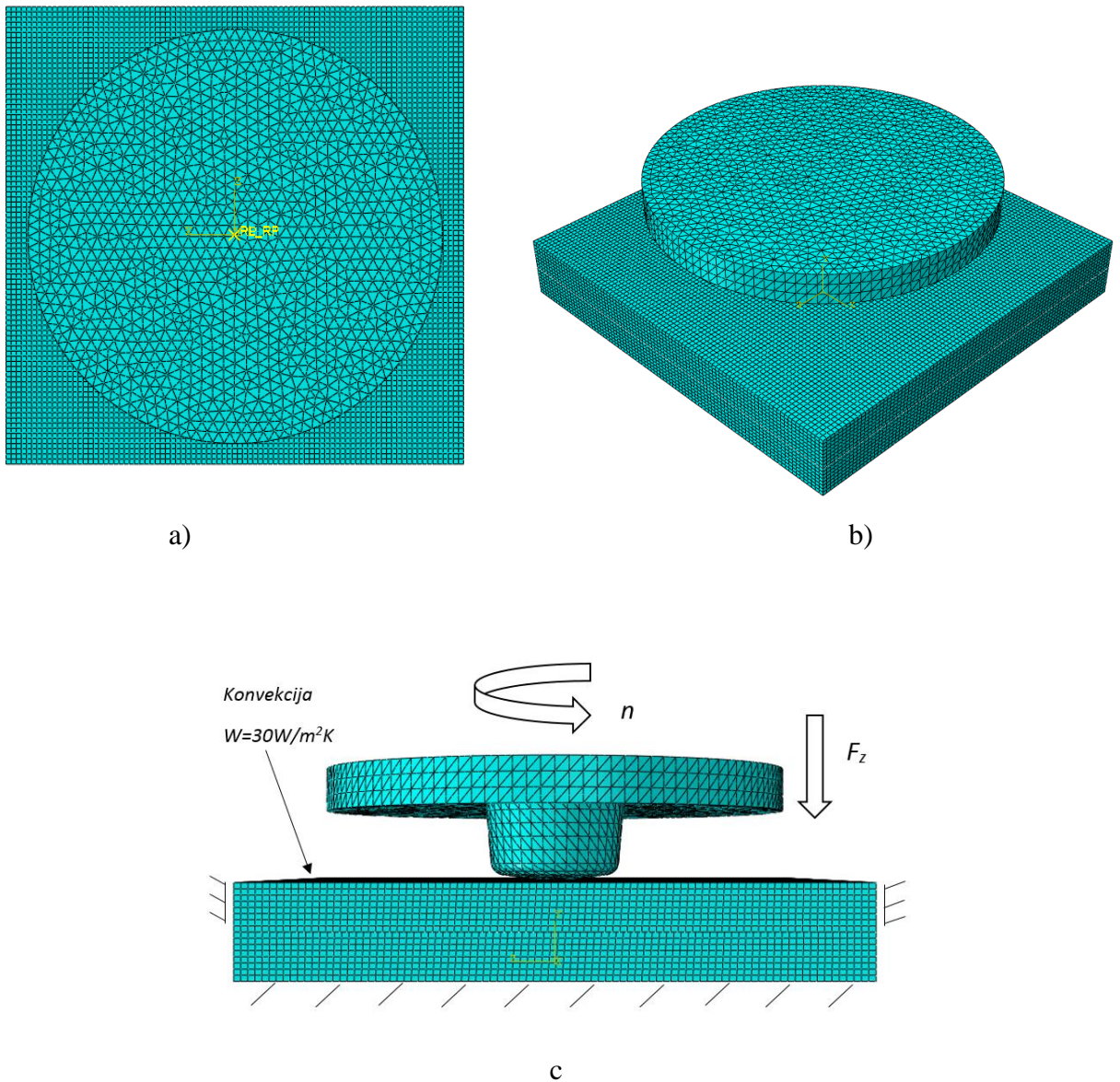


3.1 pav. Modelio sudarymas: a – įrankio geometrija ir matmenys; b – modelio erdvinis vaizdas

Suvirinimo modelio įrankis yra sumažinamas taip sutaupant skaičiavimo resursus. Kadangi modeliavimo metu daroma prielaida, kad įrankis viso proceso metu yra standus, parinktas įrankis yra viso įrankio nupjauta dalis. Taip pat vietoje sriegtos ašelės profilio, buvo pasirinkta kūginė ašelės forma (3.1 pav.). Sumažinant netikslumus dėl stačių kampų, ašelė jos gale turi $R=0.2\text{mm}$ užapvalinimą. Visi kiti įrankio parametrai parinkti tokie patys kaip ir naudoto įrankio eksperimento metu.

Frikinio taškinio suvirinimo modelyje parinktos plokštelės vaizduoja tik dalį visos suvirinamos plokštelės. Parinkti plokštelės matmenys $15 \times 15 \times 1$ mm sumažina skaičiavimui skirtą resursų ir laiką. Plokštelės kraštai yra sutapatinami, o įrankio ašis nustatoma per plokštelių centrą.

Modelio dalys – suvirinimo įrankis ir plokštelės sukuriamos *Solidworks* programa. Suvirinimo modelis įkeliamas į *Abaqus/Explicit* darbo lauką.



3.2pav. Frikcinio taškinio suvirinimo modelis: a – vaizdas iš viršaus, b – erdvinis vaizdas; c – modelio kraštinės sąlygos.

Suvirinimo modelis Abaqus programoje (3.2 pav.) suskaidomas į skirtingus elementus. Įrankis turintis nepaprastą formą, turi būti skaidomas tik į tetraedrinius baigtinius elementus (BE), kurie daug geriau gali atkartoti įrankio formą. Plokštelė yra suskaidoma į heksaedrinius formos baigtinius elementus. Šis modelis turi geresnes savybes modeliuojant nei tetraedro forma, o rezultatai gaunami tikslesni. Modeliai suskaidomi pasirinktais BE dydžiais. Sukurtų BE skaičius, forma ir kraštinių santykis nurodytas 3.3 lentelėje. Modelis suskaidytas ieškant optimalaus elemento dydžio, kurio kraštinės turėtų kuo artimesnį vienetui santykį.

3.3lentelė. Modelio suskaidymas baigtiniais elementais.

Modelio dalis	BE tipas	Elementų kiekis	Vidutinis kraštinių santykis
Įrankis	Tetraedras	32417	1,62
Viršutinė plokštelė	Heksaedras	63368	1,17
Apatinė plokštelė	Heksaedras	63368	1,17

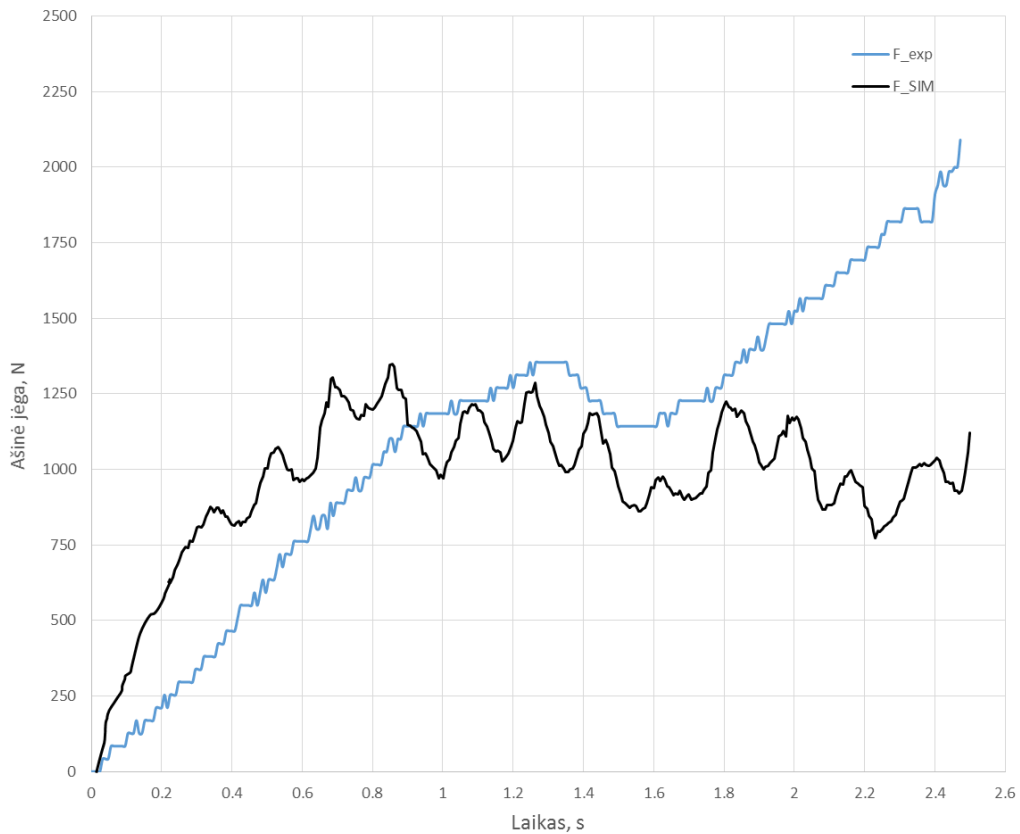
Frikinio taškinio suvirinimo modelis buvo sukurtas panaudojant Abaqus programoje esančiu temperatūriniu poslinkio elementu (angl. *coupled temperature-displacement*). Skaičiuojant, šio elementu įvertinama temperatūra ir poslinkiai. Frikinio taškinio suvirinimo metu svarbu įvertinti temperatūros įtaką elementams. Elementai turi ir poslinkių ir temperatūros laisvės laipsnius. Pasirenkamas C3D8RT elemento tipas, kuris turi vieną interpoliavimo tašką.

Norint sumažinti skaičiavimo laiką deformacijoms, atsirandančioms įrankyje suvirinimo metu, buvo padaryta prielaida, kad įrankis nesideformuoja, todėl modeliavime įrankis padarytas „kietu“ kūnu (angl. *rigid body*). Plokštelių paviršiams nustatyta pradinė 293 K temperatūra ir 30W/m²K konvekcija, trinties koeficientas 0,62 [25,26]. Viršutinė plokštelė įtvirtinamos visomis keturiomis kraštinėmis paliekant vieną laisvės laipsnį Y kryptimi. Apatinė plokštelė kraštinėse įtvirtinama visomis kryptimis – taip priimant, kad plokštelė suvirinimo metu nejudėjo. Taip pat įvertinant eksperimento metu po plokštelėmis esantį kietą paviršių, apatinės plokštelės paviršius įtvirtinamas standžiai, suvaržant visu 6 laisvės laipsnius. Įrankiui užduodama pastūma ir sukimosi greitis, kurie lygūs eksperimento metu naudotai įsigilino pastūmai Fz ir įrankio sukimosi greičiui aplink ašį n . Visais kitais laisvės laipsniai įrankis yra įtvirtinamas.

3.3 Modeliavimo rezultatai ir jų palyginimas su eksperimentiniais rezultatais

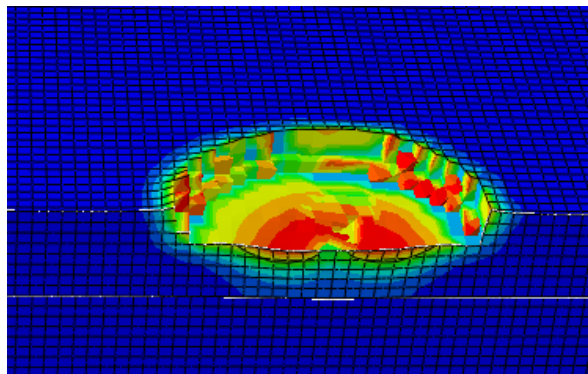
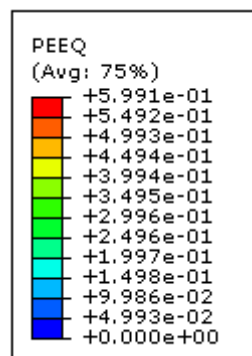
Frikinio taškinio suvirinimo modeliavimo metu sukurtas modelis, kurio ašinių jėgų rezultatai atitiktų eksperimento metu gautoms ašinėms jėgoms. Kaip parodė G. D’Urso tyrimas [29], ašinės jėgos kitimą tiksliai sumodeliuoti yra pakankamai sudėtinga, nes reikia įvertinti daugelį kontakto ryšių, medžiagos ir BE tipo savybių. Modeliavimo metu gautos ašinės jėgos skiriasi nuo eksperimento metu gauto jėgų kitimo, nors patį kitimo pobūdį galima pastebėti (3.3 pav.). Ašinės jėgos kitimas nuo 0 s iki 0,8 s yra labai artimas eksperimentiškai gautam rezultatui. Taip pat pastebimas ir plokštelės pradūrimo vietos sutapimas tiek eksperimento metu, tiek modeliuojant (grafike 1,8 s). Toliau sumodeliuotos jėgos grafikas stipriai kinta nuo eksperimento metu gautosios. Tai galima paaiškinti tuo, kad dėl aukštos temperatūros susidarymo suvirinimo modeliavimo metu ir elementai, kuriuose

įtempiai ir deformacijos viršija Johnson Cook modelio reikšmes yra ištrinami. Eksperimentų metu dėl medžiagos išlydytos medžiagos judėjimo atsiranda didesnis slėgis, kuris ir didina atsirandančią ašinę jėgą. Modeliuojant gautos pastovios ašinės jėgos „bangavimas“ paaiškinamas tuo, kad didelės apkrovas gaunantys elementai yra ištrinami. Ši elementų automatinio ištrynimo funkcija yra būtina, nes kitu atveju programa negalės sumodeliuoti viso proceso.

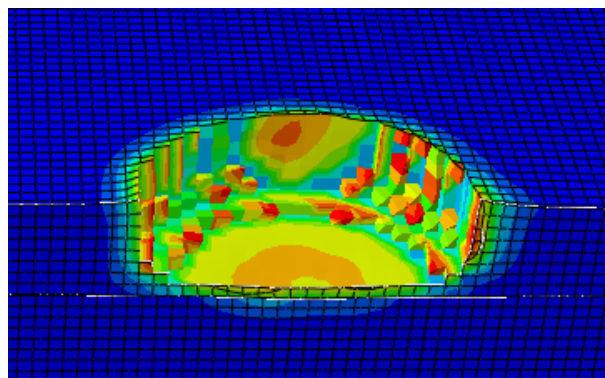
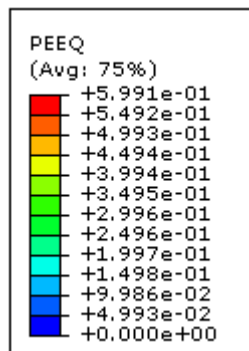


3.3pav. Suvirinimo jėgos kitimo kreivė, kai $n=2500 \text{ min}^{-1}$ ir $F_z=100 \text{ mm/min}$.

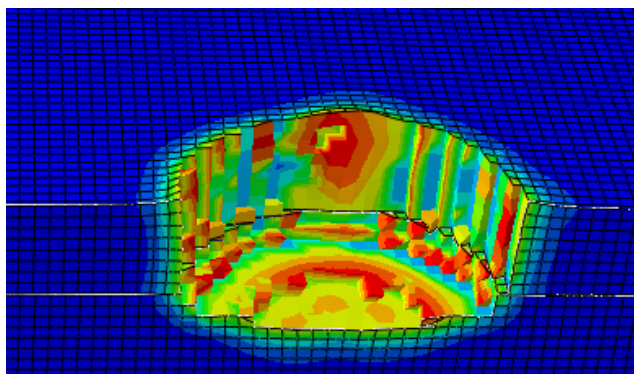
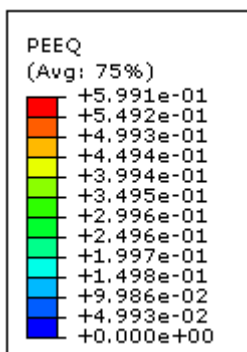
Frikinio taškinio suvirinimo modeliu nustatytas deformacijų lauko reikšmių kitimas laike (3.4 pav.) ekvivalentinių Von Mises įtempių pasiskirstymo laukas (3.5 pav.) suvirinimo metu pasiskirstanti temperatūra (3.6 pav.) Ekvivalentinių deformacijų laukas laikui einant keičiasi labai nesmarkiai, nes baigtiniuose elementuose atsirandančios deformacijos viršija nustatytą ribą ir automatiškai elementai ištrinami. Jeigu skaičiavimo metu šios funkcijos nebūtų procesas būtų nesuskaičiuojamas dėl begalinių elemento deformacijų.



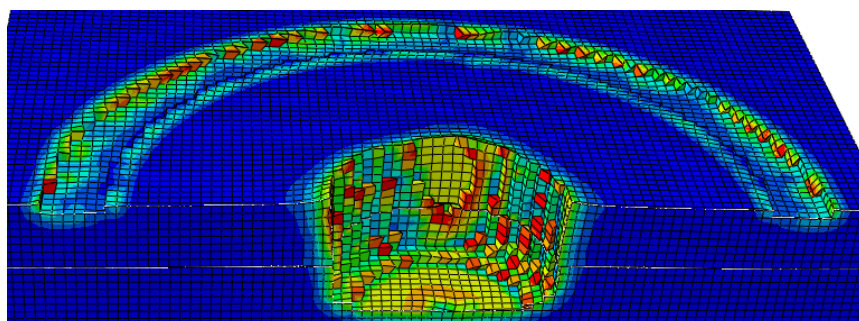
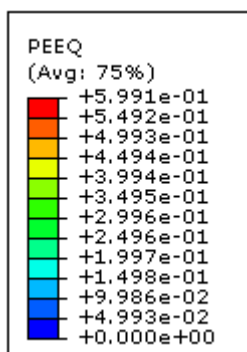
a)



b)

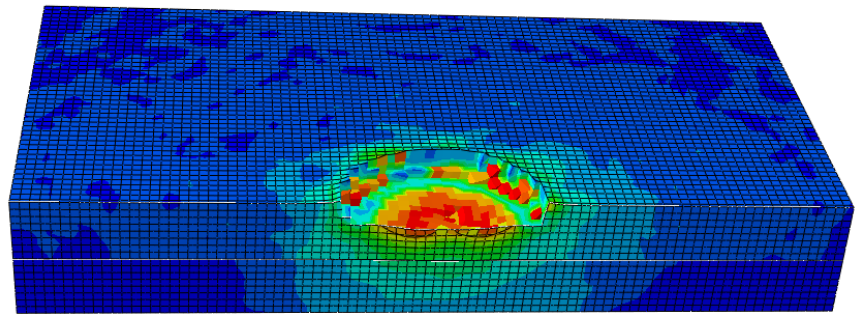
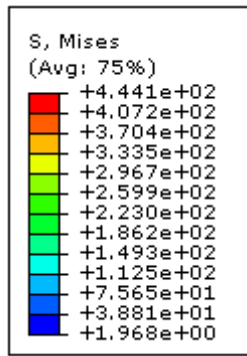


c)

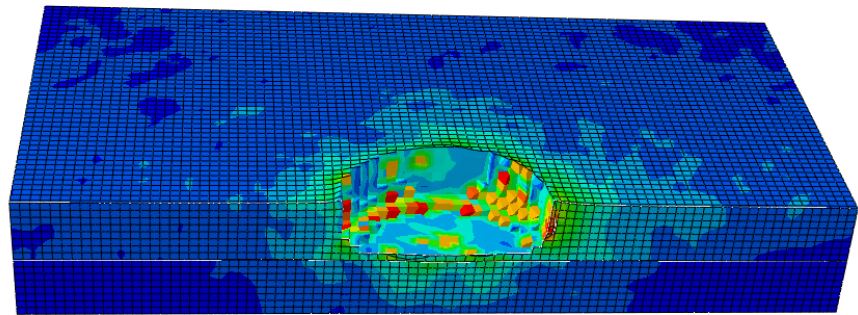
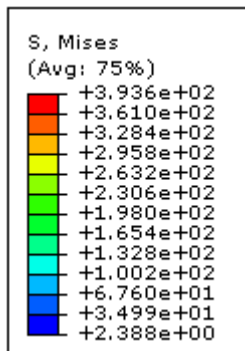


d)

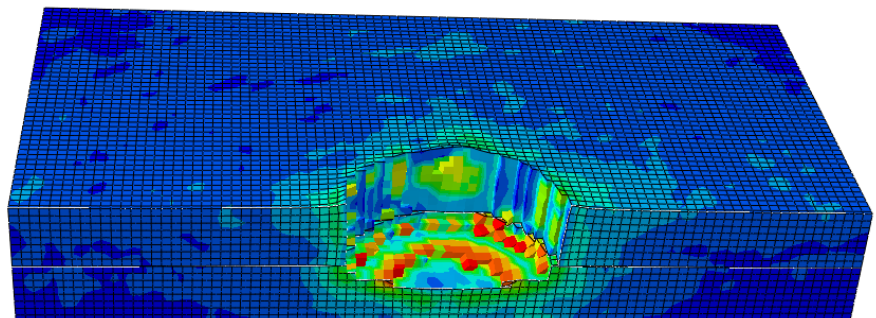
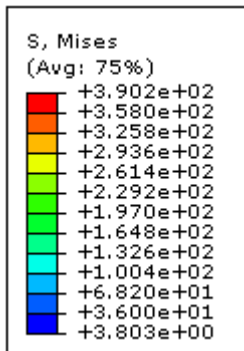
3.4 pav. Ekvivalentinių deformacijų lauko laike: a) $t=0.65s$, b) $t=1,3s$; c) $t=1,9$; d) $t=2,5s$



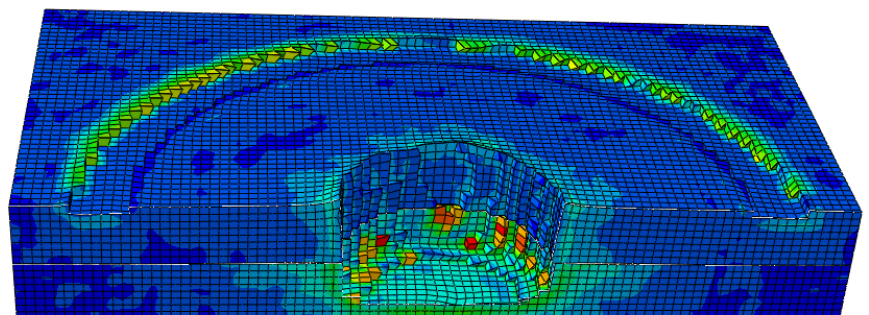
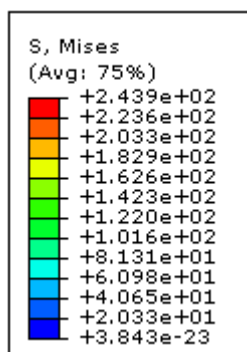
a)



b)

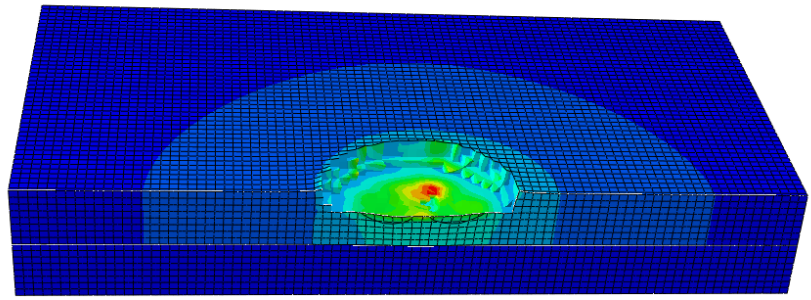
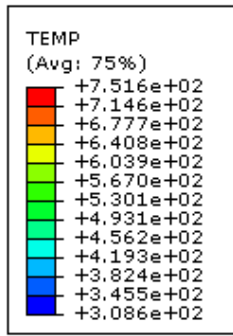


c)

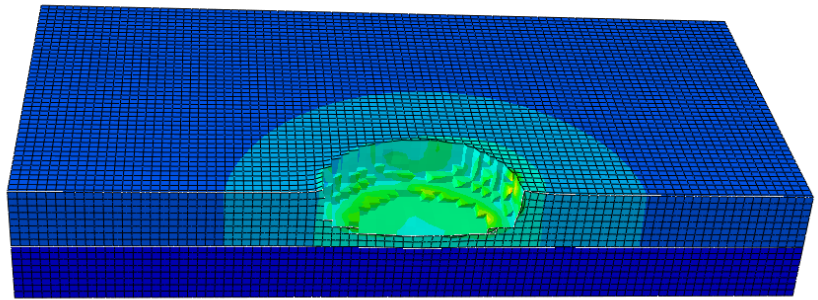
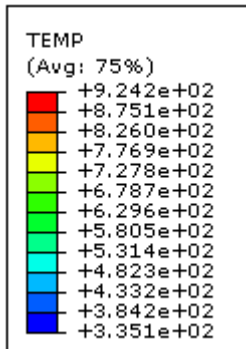


d)

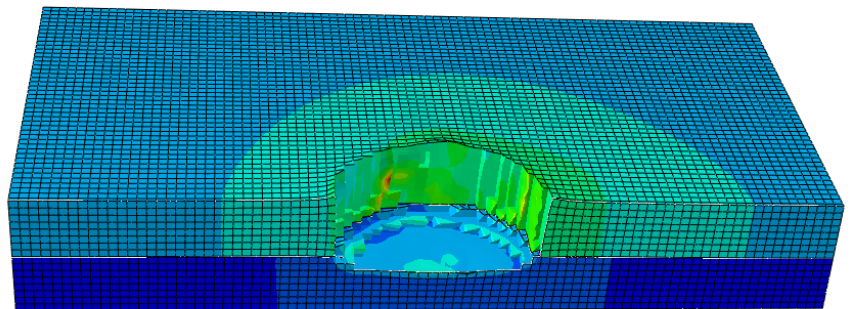
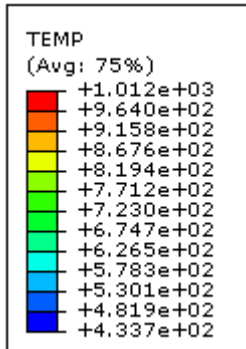
3.5 pav. Ekvivalentinių Von Mises įtempimų lauko kitimas laike: a) $t=0.65s$, b) $t=1,3s$;
c) $t=1,9s$; d) $t=2,5s$



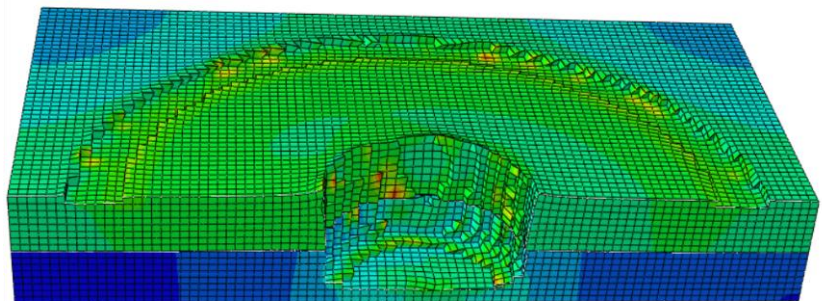
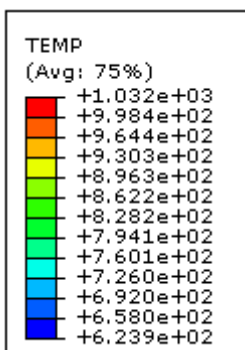
a)



b)



c)



d)

3.6 pav. Temperatūros kitimas laike : a) $t=0.65s$, b) $t=1,3s$; c) $t=1,9$; d) $t=2,5s$

Įtempiu lauko kitimas suvirinimo proceso metu rodo, kad maksimalūs ekvivalentiniai įtempiai kinta laike (3.5 pav.). Taip atsitinta todėl, kad suvirinimo proceso metu išsiskirianti šiluma (3.6 pav.), sukuria naują medžiagos takumo ribos modelį, kuris paskaičiuojamas pagal Johnson Cook modelio priklausomybę 3 formule. Temperatūrai kylant takumo riba mažėja, todėl maksimalūs ekvivalentiniai įtempiai skirtingo laiko momentais kinta. Esant aukščiausiai suvirinimo proceso temperatūrai 1032 K, suvirinimo taško maksimalūs ekvivalentiniai įtempiai yra lygūs 244 MPa ir yra mažiausi viso sumodeliuoto proceso metu. Modelio rezultatai rodo, kad proceso metu temperatūra viršija medžiagos lydymose temperatūra, todėl suvirinimo metu gaunama išlydyto metalo judėjimas.

3.4 Frikcinio taškinio suvirinimo modeliavimo išvados

Frikcinio taškinio suvirinimo modelis sukurtas *Abaqus/Explicit* programoje. Modeliavimo metu gautos ašinės jėgos su eksperimento metu gautomis reikšmėmis geriausiai sutampa iki 1,8s proceso modeliavimo, tačiau nuo 1,8 s iki 2,5 s rezultatų paklaida padidėja. Tai galima paaiškinti tuo, kad temperatūrai pakilus virš 1000°K, susidaro didelės temperatūrinės apkrovos ir elementai praranda skaičiavimo tikslumą. Siekiant suvirinimo proceso modeliavimo metu padidinti skaičiavimo tikslumą, turėtų būti žinomos eksperimentinės temperatūrinės AL 5754 medžiagos charakteristikos. Trinties koeficiento, tankio, specifinės šilumos, šilumos laidumo charakteristikos, aprašančios esamą modelį yra nekintamos. Kadangi frikcinio taškinio suvirinimo metu atsirandančios temperatūrinės vertės yra gana didelės, galimi rezultatų skirtumai ypatingai proceso pabaigoje, kai generuojamas šilumos kiekis tik didėja.

4. Išvados

Atlikus frikcinio taškinio suvirinimo tyrimą galima suformuluoti tokias išvadas:

- Moksliniai straipsniai, aprašantys frikcinį taškinį suvirinimą, daugiau skiria dėmesio įrankio geometrijai. Dažniausiai pasitaikantys tyrimai atliekami aliuminio AL 6061 lydiniui; rečiau - mažaanglio plieno, aliuminio AL 5754 lydinio ir skirtingų medžiagų plokštelėms. Todėl pasirinktos tirti AL 1050, AL 5754, žalvario CuZn37 ir vario M2 plokštelių medžiagos.

- Atlikti eksperimentiniai tyrimai su pasirinktomis 4 medžiagų plokštelėmis Sudaryti eksperimentinių ašinių jėgų priklausomybių nuo laiko grafikai.

- Nustatyta, kad daugiausia suvirinimo metu gautą maksimalią jėgą įtakoja įrankio įsigilinimo greitis. Panaudojus AL5754 bandymo rezultatus, atlikta dviejų kintamųjų ANOVA analizė, kuri patvirtino pastebėtą ryšį. Norint sumažinti atsirandančią maksimalią ašinę jėgą, reikia sumažinti įsigilinimo greitį $F_z > 60 \text{ mm/min}$ ir padidinti įrankio sukimosi greitį $n = 2500 \text{ min}^{-1}$. Įrankio išlaikymo laikas maišymo fazėje ašinę jėgą įtakoja mažai - iki 300 N (nuo 2000 min^{-1} iki 4000 min^{-1}).

- Suvirinimo skerspjuvio tyrimai parodė, kad dėl greito įrankio įsigilinimo (100 - 140 mm/min) suvirinimo taško „kabliukas“ keičia formą. Atliktoje literatūros analizėje nurodyta, kad suvirinimo taško stiprumas priklauso nuo kabliuko formos. Kai įsigilinimo greitis lygus 60 mm/min, gaunamas plokščias suvirinimo kabliukas.

- Panaudojus *Abaqus/Explicit* programą, sukurtas *BE* modelis. Modeliavimo rezultatai parodė, kad gauta ašinės jėgos priklausomybė nuo laiko geriausiai atitinka eksperimento metu gautas reikšmes iki dalį iki 1,8 s.

- Norint pasiekti geresnį modeliuotos ašinės jėgos rezultatų sutapimą su eksperimentine dalimi, reikėtų įvertinti AL 5754 medžiagos charakteristikų (trinties koeficiento, tankio, specifinės šilumos, šilumos laidumo) priklausomybę nuo temperatūros.

5. Literatūra

- 1. Zhikang Shen , Xinqi Yang , Zhaohua Zhang , Lei Cui , Yuhuan Yin** Mechanical properties and failure mechanisms of friction stir spot welds of AA 6061-T4 sheets *Materials and Design* 49, 2013, p. 181–191
- 2. Awang Mokhtar, Mucino VictorH.** Energy generation during friction stir spot welding (FSSW) of Al 6061-T6 plates. *Mater Manuf Processes* 25(1) 2010, p.167–74. [
- 3. Badarinarayan H, Yang Q, Zhu S.** Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy. *Int JMach Tools Manuf* 49, 2009:, p. 142–148.
- 4. Yuan-Ching Lin, Ju-Jen Liu, and Jiun-Nan Chen .** Material Flow Tracking for Various Tool Geometries During the Friction Stir Spot Welding Process. *Journal of Material Engineering and Performance* 22, 2013, p 3676-3683.
- 5. Klobčar, D.; Tušek, J.; Skumavc, A.; Smolej, A.** Parametric study of friction Stir spot welding of aluminum alloy 5754, –*Metalurgija* 53, 2014, p 21-24.
- 6. Q. Yang, S. Mironov, Y.S. Sato, K. Okamoto.** Material flow during friction stir spot welding *Materials Science and Engineering: A*(527), 2010, p 4389-4398
- 7. W. Yuan, R.S. Mishra, S. Webb, Y.L. Chen, B. Carlson, D.R. Herling, G.J Grant** Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds. *Journal of Materials Processing Technology* 211, 2011, p 972-977
- 8. R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia³ and T. DebRoy** Review: friction stir welding tools *Science and Technology of Welding and Joining* 16(4) 2011: p 325-342
- 9. The Welding Institute.** [interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-01-26]. Prieiga per interneto: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/nz-fabricators-begin-to-use-friction-stir-welding-to-produce-aluminium-components-and-panels-august-2006/>
- 10. The Welding Institute.** [interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-01-26]. Prieiga per interneto: <http://www.twi-global.com/news-events/connect/2006/march-april-2006/causing-a-stir-in-the-welding-world/>
- 11. C. B. Smith, J. F. Hinrichs, P. C. Ruehl.** Friction Stir and Friction Stir Spot Welding - Lean, Mean and Green. Friction Stir Link, Inc. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-01-26]. Prieiga per internetą : <http://frictionstirlink.com/publications/Pub14AWSSMCLeanMeanGreenpdf.pdf>
- 12. Chase D. Cox, Brian T. Gibson, Alvin M. Strauss, George E. Cook.** Energy input during friction stir spot welding. *Journal of Manufacturing Processes* 16, 2014, p479-484.

13. Y.H. Yina,, N. Sunb, T.H. Northc, S.S. Hua Hook formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds. *Journal of Materials Processing Technology* 210 ,2010, p2062–2070.

14. Mohamed Merzoug, Mohamed Mazari, Lahcene Berrahal, Abdellatif Imad. Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys. *Materials & Design* 31, 2010, Pages 3023-3028.

15. A.K. Lakshminarayanan, V.E. Annamalai, K. Elangovan. Identification of optimum friction stir spot welding process parameters controlling the properties of low carbon automotive steel joints. *Journal of Materials Research and Technology*, [interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-04-26]. Prieiga per internetą : http://ac.els-cdn.com/S2238785415000034/1-s2.0-S2238785415000034-main.pdf?_tid=982570bc-fdae-11e4-9d7d-00000aab0f01&acdnat=1431988884_7c48429a23788a5805e144a18d7b0b16

16. Mustafa Kemal Bilici, Ahmet Irfan Yukler Effects of welding parameters on friction stir spot welding of high density polyethylene sheets. *Materials & Design* 33 2012, p 545-550.

17. Zafer Barlas. Effect of friction stir spot weld parameters on Cu/CuZn30 bimetal joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015.

18. Vario M2 medžiagos savybės. Copper M2 [interaktyvus] [Žiūrėta 2015-04-26]. Prieiga per internetą: http://www.splav-kharkov.com/en/e_mat_start.php?name_id=1122

19. Chase D. Cox a , Brian T. Gibson a , Alvin M. Strauss a & George E. Cook Effect of Pin Length and Rotation Rate on the Tensile Strength of a Friction Stir Spot-Welded Al Alloy. *Materials and Manufacturing Processes* 27;2012 p.472–478.

20. Klobčar, D.; Tušek, J.; Skumavc, A.; Smolej, A. Parametric study of friction Stir spot welding of aluminum alloy 5754, –*Metalurgija* 53, 2014, p 21-24.

21. Cox, C. D.; Gibson, B. T.; Straus, A. M.; Cook, G. E. Effect of pin length and rotation rate on the tensile strength of a friction stir spot-welded Al alloy: A contribution to automated production. *Materials and Manufacturing Processes* 27, 2012, p 472-478.

22. Barlas Z, Uzun H. Micro structure and mechanical properties of friction stir butt welded dissimilar pure copper/brass alloy plates. *Int J Mat Res* 101, 2010, p 801-807.

23. Shen JJ, Liu HJ, Cui F. Effect of welding speed on mikrostruktura and mechanical properties of friction stir welded copper. *Mater Des* 31, 2010, p. 3937-3942.

24. Esmaeili A, Zareje Rajani HR, Sharbati M, Besharati Givi MK, Shamaniam M. The role of rotation speed on intermetallic compounds formation and mechanical behavior of friction stir welded brass/ aluminum 1050 couple. *Intermetallics* 19, 2011, p. 1711-1719.

- 25. P. Krasauskas, S. Kilikevičius, R. Česnavičius, D. Pačenga.** Experimental analysis and numerical simulation of the stainless AISI 304 steel friction drilling process. *MECHANIKA*. Volume 20(6), 2014, p. 590-595
- 26. P. Sathiya, N. Siva Shanmugam, T. Ramesh and R. Murugavel.** Temperature distribution modeling of friction stir spot welding of aa 6061-t6 using finite element technique. *Multidiscipline Modeling in Mat. and Str.*4, 2008, p.1-14
- 27. R. Smerda,, S. Winklera, C. Salisbury, M. Worswicka, D. Lloyd, M. Finn.** High strain rate tensile testing of automotive aluminum alloy sheet. *International Journal of Impact Engineering* 32, 2005, p 541–560
- 28. Al 5754 mechaninės savybės.** Ruuki [interaktyvus] [Žiūrėta 2015-04-26]. Prieiga per internetą: <http://www.ruukki.com/Steel/Stainless-steel-and-aluminium-products/Aluminium-flat-products/Aluminium-EN-AW-5754>
- 29. G. D’Urso.** Thermo-mechanical characterization of friction stir spot welded AA6060 sheets: Experimental and FEM analysis. *Journal of Manufacturing Processes* 17 , 2015,p 108–119.
- 30. Aliuminio 5754 medžiagos savybės ir panaudojimas.** Azon materials. [interaktyvus]. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2806>
- 31. Aliuminio 1050 medžiagos savybės ir panaudojimas.** Azon materials. [interaktyvus]. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2798>
- 32. H. Medekšas .**Gaminių kokybė ir patikimumas. *Technologija*, Kaunas, 2003, p 264.

PRIEDAI

**1 priedas. Publikacija 19-tosios tarptautinės konferencijos „Mechanika 2014“
pranešimų medžiagoje.**

2 Priedas Publikacija „Pramonės inžinerija 2014: jaunųjų mokslininkų konferencijos“ pranešimų medžiagoje

3 Priedas Publikacija „Pramonės inžinerija 2015: jaunųjų mokslininkų konferencijos“ pranešimų medžiagoje