



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Tautvydas Juknevičius

**MARTENSITINIO SENDINAMO PLIENO PAVIRŠIAUS LAZERINIO
APDOROJIMO TYRIMAS**

**INVESTIGATION OF LASER PROCESSING OF MARAGING STEEL
SURFACE**

Baigiamasis magistro darbas

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX054
Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Tautvydas Juknevičius

MARTENSITINIO SENDINAMO PLIENO PAVIRŠIAUS LAZERINIO
APDOROJIMO TYRIMAS

INVESTIGATION OF LASER PROCESSING OF MARAGING STEEL
SURFACE

Baigiamasis magistro darbas

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX054
Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovė

doc. dr. Jelena Škamat
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantė

lekt. Angelika Petrėtienė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Universitetinės antrosios pakopos (magistrantūros) studijų kryptis

Medžiagų ir suvinirimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX054

.....specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.

Vilnius

Studentui Tautvydas Juknevičius.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Martensitinio sendinamo plieno paviršiaus lazerinio apdorojimo tyrimas/Investigation of Laser Processing of Maraging Steel Surface.....
patvirtinta 20...m. d. dekanas potvarkiu Nr.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2024 m. d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Literatūros šaltinių analizė temomis: martensitiniai sendinami (MS) plienai ir jų panaudojimas taikant adityvios gamybos (AG) technologijas; MS plienų savybių ir struktūros susidarymo ypatumai; MS plienų paviršiaus stiprinimo būdai. 2. Bandinių paruošimas tyrimams. 3. Terminio poveikio srities tyrimas. 4. Kietumo bandymai. 5. Lenkiamųjų bandinių su skirtingais įborintais ir susilpnintais sluoksniais modelių sudarymas ir įtempių pasiskirstymo analizė (ANSYS). 6. Lenkimo bandymai. 8. Tempiamųjų bandinių su skirtingais įborintais ir susilpnintais sluoksniais modelių sudarymas ir įtempių pasiskirstymo analizė (ANSYS). 9. Rezultatų apibendrinimas. Išvadų formulavimas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....

.....

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas

.....
(Parašas)

.....doc. dr. Jelena Škamat.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

.....Tautvydas Juknevičius.....
(Vardas, pavardė)

.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Martensitinio sendinamo plieno paviršiaus lazerinio apdorojimo tyrimas**

Autorius **Tautvydas Juknevičius**

Vadovas **doc. dr. Jelena Škamat**

Kalba: lietuvių

Baigiamajame magistro darbe tiriami 1.2709 markės martensitinio sendinamo plieno bandiniai, pagaminti taikant selektyviojo lazerinio lydymo (SLL) technologiją su lazeriu legiruotu paviršiumi naudojant borą. Nagrinėjami skirtingo kietumo lazeriu įborinti paviršiai, lazerinio legiravimo metu susidaranti terminio poveikio sritis (TPS) bei įborintų paviršių ir TPS poveikis viso gaminio mechaninėms savybėms.

Darbe atlikti skirtingą kietumą ir boridinės fazės koncentraciją turinčių legiruotų sluoksnių mikrokietumo bei mikrostruktūros tyrimas. Taikant Knopo indentavimo metodą, nustatytas įborintų sluoksnių tamprumo modulis (E) ir kriterijai, apibūdinantys kietų dangų pasipriešinimą įtrūkių susidarymui (H/E) bei atsparumą plastinei deformacijai (H^3/E^2). Darbe pateikiamos E , H/E ir H^3/E^2 priklausomybės nuo tirtų paviršių kietumo. Tiriant įborintų sluoksnių ir TPS poveikį viso gaminio mechaninėms savybėms, atlikti eksperimentiniai lenkimo bandymai bei įtempių pasiskirstymo lenkimo ir tempimo metu analizė kompiuterinio modeliavimo metodu.

Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, literatūros šaltinių analizė, eksperimentinių tyrimų metodika, tyrimų analizės metodika, rezultatai, išvados ir rekomendacijos, literatūros šaltinių sąrašas.

Magistro darbo apimtis – 62 psl., 35 pav., 11 lentelės, 55 bibliografiniai šaltiniai.

Reikšminiai žodžiai: martensitiniai sendinami plienai, 1.2709 plienas, selektyvusis lazerinis lydymas (SLL), lazerinis paviršiaus legiravimas, terminio poveikio sritis, plastiškumo kriterijai (H/E , H^3/E^2).

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Mechanics Department of Mechanical and Material Engineering	ISBN _____ ISSN _____ Copies No. Date-.....-.....
Master Degree Studies Materials and Welding Engineering study programme Master Graduation Thesis 4 Title Investigation of Laser Processing of Maraging Steel Surface Author Tautvydas Juknevičius Academic supervisor doc. dr. Jelena Škamat	
Thesis language: Lithuanian	
In the final master's thesis, samples of maraging steel grade 1.2709, manufactured using selective laser melting (SLM) technology with laser-alloyed surfaces using boron, are studied. The focus is on laser-boronized surfaces with varying hardness, the Heat Affected Zone (HAZ) formed during laser alloying, and the impact of the boronized surfaces and HAZ on the overall mechanical properties of the product. The study involves the investigation of the microhardness and microstructure of alloyed layers with different hardness levels and concentrations of boride phases. Using the Knoop indentation method, the elastic modulus (E) of the boronized layers and the criteria for crack resistance (H/E) and plastic deformation resistance (H^3/E^2) of hard coatings were determined. The thesis presents the dependencies of E, H/E and H^3/E^2 on the hardness of the examined surfaces. To assess the impact of the boronized layers and HAZ on the mechanical properties of the entire product, experimental bending tests were conducted, and stress distribution during bending and tensile tests was analyzed using computer modeling. The thesis consists of 7 parts: introduction, literature review, experimental research methodology, research analysis methodology, results, conclusions and recommendations, and a list of references. The master's thesis comprises 62 pages, 35 figures, 11 tables, and 55 bibliographic sources.	
Keywords: maraging steels, 1.2709 steel, selective laser melting (SLM), laser surface alloying, heat affected zone (HAZ), plasticity criteria (H/E, H^3/E^2).	

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	7
ŽYMENYS.....	8
SANTRUMPOS	9
ĮVADAS	10
1. LITERATŪROS APŽVALGA	14
1.1 Adityvioji gamyba	14
1.1.1 SLS technologija	14
1.1.2 SLL technologija	15
1.2 Martensitiniai sendinami plienai	16
1.2.1 Martensitinis sendinamas plienas 1.2709	17
1.3 Klasikiniai martensitinio sendinamo plieno paviršiaus kietinimo būdai.....	18
1.3.1 Įazotinimas	18
1.3.2 Lazerinis paviršiaus legiravimas	20
1.4 Kietų dangų mechaninių savybių nustatymo metodai.....	23
1.4.1 Vikerso įspaudos įtrūkių testas	24
1.4.2 Nanoindentavimas	25
1.4.3 Dangų H/E ir H^3/E^2 vertinimo kriterijai	26
1.5 Pirmojo skyriaus išvados.....	26
2. TIRIAMOJO DARBO METODIKA	28
2.1 Tiriamojo objekto (SLL bandinių) gamyba.....	28
2.2 Tiriamojo objekto lazerinio įborinimo metodika.....	29
2.3 Tiriamojo objekto mikrošlifų paruošimo metodika.....	30
2.4 Tiriamojo objekto mikrostruktūros tyrimo metodika	31
2.5 Optinės mikroskopijos tyrimo metodika	31
2.6 Mikrokietumo matavimai	32
2.7 Tamprumo modulio nustatymas	33
2.8 Lenkimo bandymų metodika	34
2.9 Kompiuteriniai skaičiavimai baigtinių elementų (BE) metodu.....	35
2.9.1 Modelių kūrimas kompiuteriniam skaičiavimas BE metodu	35
2.9.2 Kompiuteriniai skaičiavimai baigtinių elementų metodu.....	37
3. TIRIAMOJO DARBO REZULTATAI.....	40

3.1 Mikrostruktūros tyrimo rezultatai.....	40
3.2 Plastiškumo kriterijų nustatymas.....	42
3.3 Mikrokietumo ir TPS tyrimų rezultatai	44
3.4 Įborintų bandinių kietumo analizė.....	45
3.3 Lenkimo bandymų rezultatai	47
3.5 Kompiuterinės analizės rezultatai.....	48
3.5.1 Lenkiamųjų bandinių su skirtingais įborintais ir susilpnintais sluoksniais modelių sudarymas ir įtempių pasiskirstymo analizė (ANSYS).	48
3.5.2 Tempiamųjų bandinių su skirtingais įborintais ir susilpnintais sluoksniais modelių sudarymas ir įtempių pasiskirstymo analizė (ANSYS).	51
3.6 Teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas.....	53
IŠVADOS.....	56
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	57

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Plieno DIN 1.2709 miltelių cheminė sudėtis.....	17
2 lentelė. DIN 1.2709 plieno fizikinės ir mechaninės savybės (Kempen et al., 2011)	18
3 lentelė. Plieno DIN 1.2709 miltelių cheminė sudėtis (pagal gamintojo specifikaciją, mas. %)	28
4 lentelė. <i>Concept Laser M3</i> lazerio ir SLL proceso parametrai	29
5 lentelė. Lazerinio įborinimo be osciliacijos režimai ir bandinių žymenys	30
6 lentelė. Lazerinio įborinimo su lazerio spindulio skersine osciliacija režimai ir bandinių žymenys.....	30
7 lentelė. Knopo mikrokietumo bandymo parametrai.....	32
8 lentelė. Bandiniams priskirtos mechaninės savybės	38
9 lentelė. Lazeriu įborintų sluoksnių charakteringos mikrostruktūros, didėjant boro koncentracijai.....	41
10 lentelė. Kompiuterinės analizės rezultatai – reikalinga jėga (N) norint pasiekti tam tikrą įlinkį (mm)	51
11 lentelė. Reikalinga jėga (N) norint pasiekti 1,5 mm poslinkį tempiant bandinį	53

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Tipinė selektyviojo sukepinimo lazeriu schema (Munir, Li ir Wen 2017)	15
2 pav. Lazerinio paviršiaus legiravimo schema (Majumdar ir Manna, 1999)	22
3 pav. Vickerso įspauda su įtrūkiiais (Quinn ir Bradt, 2007)	25
4 pav. <i>Concept Laser M3</i> selektyviojo lazerinio suludymo įrenginys	28
5 pav. Skaidulinis lazeris FANUCI® PRO 1500.....	29
6 pav. Lazerio spindulio osciliacijos modelis ir gaunama lazerio spindulio trajektorija: (a) – be osciliacijos; (b) – su skersine osciliacija; a_y – osciliacijos amplitudė; X – lazerio spindulio pagrindinė judėjimo kryptis (Pang et al., 2019)	30

7 pav. SEM JOEL JSM-7600F skenuojamosios elektroninės mikroskopijos prietaisas su antrinių elektronų SE detektoriumi	31
8 pav. Universalus automatizuotas kietmatis <i>Zwick Roell ZHμ</i>	32
9 pav. Knopo indentoriaus įspaudo eskizas	33
10 pav. Trijų taškų lenkimo schema (Instron.com).....	35
11 pav. Lenkimo bandymui paruoštų bandinių bendras vaizdas	35
12 pav. B1 serijos bandinio modelio eskizas	36
13 pav. B2 serijos bandinio modelio eskizas	36
14 pav. B3 serijos bandinio modelio eskizas	36
15 pav. Lenkimo įrenginio su B1 serijos bandiniu modelis.....	37
16 pav. Bendro modelio, suskirstyto į baigtinius elementus, bendras vaizdas iš priekio ir šono	38
17 pav. Bandinio, suskirstyto į baigtinius elementus, vaizdas iš šono.....	39
18 pav. Bandinio, suskirstyto į baigtinius elementus, vaizdas iš priekio	39
19 pav. Fe-B fazinė diagrama (ASM handbook, vol. 3)	40
20 pav. Įborintų sluoksnių, turinčių skirtingą kietumą, tamprumo modulis E ir H/E bei H^3/E^2 kriterijai	43
21 pav. Įborinto bandinio sandara skerspjūvyje.....	45
22 pav. Mikrokietumo pasiskirstymas BS1 įborinto bandinio skerspjūvyje.....	46
23 pav. Mikrokietumo pasiskirstymas BS2 įborinto bandinio skerspjūvyje.....	46
24 pav. Mikrokietumo pasiskirstymas BS3 įborinto bandinio skerspjūvyje.....	46
25 pav. Bandinių serijos ir santrumpos	47
26 pav. Tirtų bandinių eksperimentinės lenkimo kreivės	48
27 pav. Lenkimo simuliacijai BE metodu sukurto modelio ir bandinio modelio bendras vaizdas	49
28 pav. Įtempių pasiskirstymas lenkimo metu kontroliniame termiškai apdorotame bandinyje	49
29 pav. Įtempių pasiskirstymas lenkimo metu įborintame bandinyje be pakartotinio sendinimo	50
30 pav. Įtempių pasiskirstymas lenkimo metu įborintame bandinyje po pakartotinio sendinimo	51
31 pav. Įtempių pasiskirstymas tempimo metu kontroliniame bandinyje.....	52
32 pav. Įtempių pasiskirstymas lenkimo metu įborintame bandinyje po pakartotinio sendinimo	52
33 pav. Jėga, kurios prireikė, kad lenkiant tirtus bandinius būtų pasiektas 1,5 mm įlinkis.....	53
34 pav. Liekamasis akytumas kontroliniame bandinyje dėl SLL proceso ypatumų (a) ir kontrolinio bandinio lūžis po lenkimo bandymo (b)	54
35 pav. Įborintų bandinių paviršius.....	55

ŽYMENYS

HRC – kietis pagal Rockvelą.

HV – kietis pagal Vickersą.

HK – kietis pagal Knopą.

E – tamprumo (Jungo) modulis.

SANTRUMPOS

3D – trijų dimensijų.

AG – adityvioji (pridėtinė) gamyba (angl. *additive manufacturing*).

BE – baigtiniai elementai.

LAM – adityvioji gamyba lazeriu (angl. *laser additive manufacturing*).

LSA – lazerinis paviršiaus legiravimas (angl. *laser surface alloying*).

LSM – lazerinis paviršiaus modifikavimas (angl. *laser surface modification*).

MS – martensitiniai sendinami.

SEM – skenuojamoji elektroninė mikroskopija.

SLM – selektyvusis (atrankinis) lazerinis sulydymas (angl. *selective laser melting*).

SLS – selektyvusis lazerinis sukepinimas.

STL – struktūrizuotų šablonų kalba (angl. *structured template language*).

IVADAS

Tiriamoji problema

Martensitiniai sendinami (MS) plienai – tai specialios klasės plienai, kurie pasižymi labai dideliu stiprumu, pvz., 18 % Ni (M300) / 1.2709 (DIN) instrumentinio plieno stiprio riba gali būti nuo 1850 MPa iki 1950 MPa (po terminio apdirbimo). Tačiau šis plienas, kaip ir kiti MS plienai, turi nepakankamą kietumą, kad galėtų priešintis abrazyviniam dilimui. 1.2709 plieno kietumas po terminio apdirbimo sudaro ~50–55 HRC (arba ~500–600 HV). Dėl gausaus legiruojamųjų elementų kiekio MS plienai yra brangūs ir greitas detalių ir gaminių dilimas yra labai neekonomiškas. Todėl nepakankamas atsparumas dilimui yra pagrindinė šio plieno panaudojimo problema.

Sprendžiant šią problemą, gali būti pritaikytas lazerinio paviršiaus legiravimo metodas. Jau paskelbti mokslinių tyrimų rezultatai parodė, kad lazerinis legiravimas naudojant nuolatinės veikos lazerius ir taikant legiruoti amorfinio boro miltelius, leidžia formuoti MS plienų paviršiuose boridus turinčius sluoksnius su kietumu iki ~3 kartų didesniu, negu MS plieno po terminio apdorojimo. Taip apdorotų bandinių atsparumas dilimui padidėja kelis–keliasdešimt kartų. Pagrindinis pasiūlyto metodo trūkumas – tai įtrūkių susidarymas įborintuose sluoksniuose didėjant kietumui, kurie gali bloginti tiek paviršiaus eksploatacines savybes, tiek viso gaminio mechaninį atsparumą. Įtrūkių susidarymas yra nulemtas tiek lazerinio lydymo proceso ypatumais, tiek formuojamų sluoksnių fazinės sudėties, kai paviršiui legiruoti naudojamas boras. Lazerinio apdorojimo parametrų ir legiruotų sluoksnių fazinės sudėties optimizavimas galėtų padėti sumažinti arba pašalinti įtrūkių susidarymo riziką.

Literatūroje, optimizuojant kietų dangų struktūrą ir formavimo parametrus, siūloma taikyti H/E ir H^3/E^2 kriterijus (H – kietumas, E – tamprumo modulis), kurie leidžia įvertinti ir/arba palyginti dangų plastiškumą (arba atsparumą trūkinėjimui) ir atsparumą plastinei deformacijai dilimo metu (H^3/E^2), atitinkamai. Šiame darbe, taikant tokius kriterijus, siekiama palyginti lazeriu įborintų MS plieno paviršiaus sluoksnių su skirtinga boridinės fazės koncentracija ir nustatyti, ar yra tam tikras kietumas, kurį pasiekus legiruotų paviršių polinkis trūkinėjimui staigiai padidėja. Tai leistų apibrėžti didžiausią įborintų paviršių kietumą, kurį viršyti nėra tikslinga.

Kitas MS plieno lazerinio legiravimo ypatumas – tai terminis poveikis pagrindiniam metalui. Yra laikoma, kad, apdorojant metalus lazerio pluoštu, terminis poveikis metalui yra trumpalaikis ir koncentruotas. Tačiau tiriant MS plieno lazerinį apdorojimą su skirtingais parametrais, nustatyta, kad visais atvejais šalia išlydytos vonelės pagrindiniame metale susidaro

terminio poveikio sritis, kurioje fiksuojamas reikšmingas kietumo sumažėjimas. Taip, MS plieno gaminys po lazerinio įborinimo šalia darbinių paviršių turės kelių sluoksnių su skirtingomis savybėmis sandara. Šio darbo tyrimais siekiama įvertinti kokį poveikį tokia sandara gali turėti viso gaminio mechaniniam atsparumui.

Darbo aktualumas

Šiais laikais vis daugiau dėmesio yra skiriama adityviosios gamybos (AG) technologijoms. Taikant AG technologijas, galima gaminti detales su labai sudėtinga išorine ir vidine geometrija, kurių neįmanoma realizuoti tradiciniais apdirbimo metodais, atlikti greitą gaminių prototipavimą (angl. *Rapid Prototyping*), greitai pereiti nuo prototipo prie galutinio gaminio gamybos, gaminti individualius vienetinius gaminius, formuoti gradientines struktūras, taupyti energiją, laiką ir medžiagas, mažinti gamybinių atliekų susidarymą. MS plienai, kurių sudėtyje yra labai mažai anglies, neturi polinkio trūkinėjimui terminių ciklų metu, todėl tinka gamybai taikant AG metodus, tokius, kaip pvz. selektyvus lazerinis lydymas (SLL). Pastaruoju metu sparčiai vystantis AG technologijoms, didėja MS plienų populiarumas. SLL būdu pagaminti MS plieno gaminiai pasižymi puikiais stiprumo, plastiškumo, tūsumo savybėmis, tačiau paviršiai dažnai neatitinka techninių reikalavimų, dėl nepakankamo kietumo ir atsparumo dilimui greitai nusidėvi, nėra atsparūs korozijai. Dėl šių paviršiaus savybių trūkumų platesnis metalo gaminių realizavimas taikant SLL technologiją šiuo metu yra apribotas. Lazerinis paviršiaus modifikavimas, paviršius legiruojant lazeriu, gali būti efektyvus ir perspektyvus būdas šioms problemoms ir trūkumams spręsti. Šio darbo tyrimais siekiama prisidėti tobulinant MS plienų lazerinio įborinimo technologiją.

Tyrimo objektas

Selektyvaus lazerinio lydymo būdu pagaminti 18 % Ni martensitinio sendinamo plieno bandiniai su lazeriu įborintais paviršiais.

Darbo tikslas

Įvertinti 18 % Ni martensitinio sendinamo plieno lazeriu įborintų paviršių su skirtingu boridinės fazės kiekiu plastiškumo rodiklius ir nustatyti paviršiaus lazerinio įborinimo poveikį martensitinio sendinamo plieno viso bandinio mechaniniam atsparumui.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti literatūros šaltinių analizę temomis: MS plienai ir jų panaudojimas taikant adityviosios gamybos (AG) technologijas; MS plienų savybių ir struktūros susidarymo ypatumai; MS plienų paviršiaus stiprinimo būdai.
2. Naudojant lazeriu įborintus bandinius su skirtinga mikrostruktūra ir boridinės fazės kiekiu, nustatyti įborintų sluoksnių tamprumo modulį ir plastiškumo kriterijus H/E ir H^3/E^2 .
3. Paruošti lenkimui bandinius su skirtingo kietumo įborintais sluoksniais bei atlikti legiruoto paviršiaus sluoksnio ir TPS tyrimą.
4. Atlikti lenkimo bandymus.
5. Sudaryti lenkiamųjų bandinių su skirtingais įborintais ir susilpnintais sluoksniais BE modelius ir atlikti įtempių pasiskirstymo analizę lenkiant (ANSYS).
6. Sudaryti tempiamųjų bandinių su skirtingais įborintais ir susilpnintais sluoksniais modelius ir atlikti įtempių pasiskirstymo analizę tempiant (ANSYS).
7. Apibendrinti rezultatus ir suformuluoti išvadas.

Darbo mokslinis naujumas ir praktinė reikšmė

Darbe atliktas įborintų sluoksnių, gautų lazerinio legiravimo būdu ant 18 % Ni MS plieno paviršių, plastiškumo tyrimas ir šių sluoksnių bei TPS poveikio viso gaminio mechaniniam atsparumui analizė. Rengiant tiriamąjį darbą, buvo gautos tokios naujos mokslinės žinios:

1. Nustatytos empirinės tamprumo modulio E reikšmės martensitinio sendinamo plieno lazeriu įborintiems paviršiaus sluoksniams, kurių kietumas nuo ~580 iki ~1820 HK_{0,1} ir gauta E nuo HK priklausomybė. Nustatyta, kad, palyginus su geležies boridais, gautais kitais metodais, lazeriu įborinti sluoksniai pasižymi didesniu tamprumo moduliu. Tai gali būti liekamųjų tempimo įtempių požymis. Šios žinios gali būti naudojamos toliau optimizuojant legiravimo proceso parametrus.
2. Gautos H/E ir H^3/E^2 kriterijų priklausomybės nuo kietumo, kurios leidžia spręsti, kaip keičiasi lazeriu įborintų sluoksnių atsparumas įtrūkių susidarymui bei geba priešintis plastinei deformacijai, didėjant boridinės fazės kiekiui ir, atitinkamai, įborinto sluoksnio kietumui.
3. Tiriant tamprumo modulį, pritaikytas Knopo indentavimo metodas. Pateikti rezultatai leidžia spręsti apie šio metodo ypatumus, taikant jį tokio tipo medžiagoms. Gautos žinios

gali būti taikomos toliau kuriant kietų dangų atsparumo irimui įvertinimo metodus, optimizuojant martensitinių sendinamų plienų paviršiaus lazerinio legiravimo proceso ir terminio apdorojimo parametrus.

4. Darbe atliktas SLL būdu pagamintų MS plieno bandinių su skirtingo kietumo įborintais sluoksniais ir TPS mechaninio atsparumo eksperimentinis ir analitinis (kompiuterinio modeliavimo BE metodu) įvertinimas lenkimo ir tempimo metu. Gauti rezultatai leidžia prognozuoti kokio gaminių mechaninių savybių pokyčio galima laukti pritaikius jiems paviršiaus lazerinio įborinimo metodą.

Darbo rezultatų aprobavimas

Darbo rezultatai pristatyti dviejose konferencijose Lietuvoje:

1. Lietuvos mokslo tarybos (LMT) organizuojama konferencija „Studentų tyrimai semestrų metu 23/24 m.“, 2024 m. gegužės 16–17 d., viešbutis „Panorama“, Seinų g. 4, Vilnius.
2. 27-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“ sekcija „Medžiagų inžinerija“, 2024 m. balandžio 26 d., VILNIUS TECH, Plytinės g. 25, Vilnius.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Adityvioji gamyba

Adityvioji gamyba (AG) – tai gamybos procesas, kurio metu detalė yra gaminama sluoksnis po sluoksnio valdant šį procesą skaitmeniniu būdu. AG gamyba dar kitaip gali būti vadinama 3D spausdinimas (gamyba 3D spausdintuvu) arba greitasis prototipų kūrimas (Karayel ir Bozkurt, 2020).

Nors ši gamyba egzistuoja jau pakankamai ilgai, tačiau tik neseniai ji tapo tokia populiari, nes išsivysčius AG gamybos technologijoms atpigo gamybos kaina. Lyginant klasikinius gamybos būdus, kurie kelia didelę žalą gamtai išskirdami daug nuodingų medžiagų į aplinką bei sukuria didelį medžiagos atliekų kiekį, AG gamyba sutaupo gamybos žaliavos ir sutrumpina gamybos laiką, taip saugodama gamtą (Javaid et al., 2021).

AG gamyba susideda iš kelių etapų. Pirmiausia yra sukuriamas 3D modelis naudojant kompiuterinę įrangą. Vėliau šis modelis yra padalijamas į sluoksnius, kurie vėliau gamybos metu yra spausdinami vienas ant kito ir taip yra pagaminamas gaminys (Karayel ir Bozkurt, 2020).

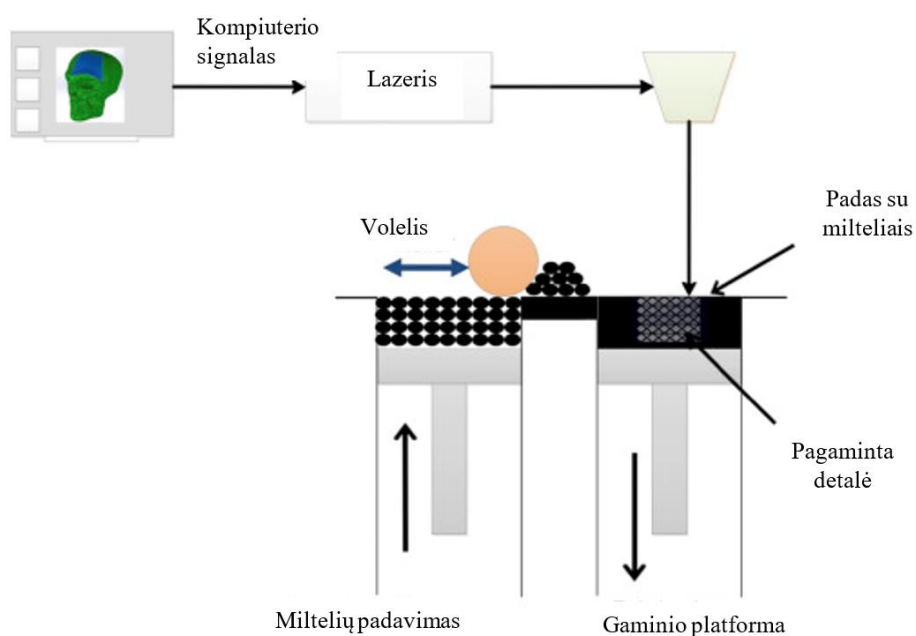
AG technologijoje taikomi skirtingi gamybos metodai, kurie yra klasifikuojami pagal sluoksnių sujungimo (sukepinimo) technologiją ir tai, kokioms medžiagoms yra naudojamos. AG gamyba skirstoma (Karayel ir Bozkurt, 2020):

- selektyvusis sukepinimas lazeriu (SLS);
- selektyvusis sulydymas lazeriu (SLM);
- stereolitografija (SLA);
- medžiagos purškimas (angl. *material jetting*);
- rišiklio purškimas (angl. *binder jetting*);
- medžiagos ekstruzija ir kt.

1.1.1 SLS technologija

Selektyvusis lazerinis sukepinimas (SLS) yra adityviosios gamybos technologija, kuri buvo sukurta ir užpatentuota Deckard et al. 1988 metais (Kenzari et al., 2012). Proceso esmę sudaro miltelių sukepinimas lazeriu. Medžiagos miltelių paviršius yra iš dalies išlydomas ir taip yra sukepinama detalė sluoksnis po sluoksnio. Šios rūšies gamyba yra laikoma tinkama serijinei gamybai, nes pagamintos detalės turi geras mechanines savybes, gali spausdinti didelių gabaritų detales bei užtikrina sąlyginai aukštą tikslumą (Gan et al., 2020).

Tipinė SLS proceso schema pavaizduota 1.1 paveiksle. Didelės galios lazerio spindulys yra valdomas per nukreipimo sistemą ir kiekvieną sluoksnį sulydo į vientisą detalę pagal iš anksto sukurtą CAD modelį. Ant pado su voleliu yra paskirstomas tam tikro storio medžiagos miltelių sluoksnis, kuris sulydomas su lazeriu. Tada, nusodinus ir paskleidus miltelius ant jau sulydyto sluoksnio, yra sukuriamas naujas sluoksnis, ir taip yra formuojama visa detalė pagal iš anksto sukurtą 3D modelį. Visų sluoksnių rinkinys yra sujungiamas per SLS procesą, kad būtų sukurtas pageidaujamos formos objektas. SLS miltelių nusodinimo sistema paprastai susideda iš volelio arba grandiklio, kuris užtikrina lygaus miltelių sluoksnio, kurio storis yra nuo 20 iki 150 μm , formavimą. Procesas paprastai atliekamas inertinėje atmosferoje, užpildytoje argonu ar azotu, siekiant išvengti aplinkos užteršimo ir nepageidaujamos miltelių oksidacijos sukepinimo proceso metu.



1 pav. Tipinė selektyviojo sukepinimo lazeriu schema (Munir, Li ir Wen 2017)

1.1.2 SLL technologija

Selektyvusis lazerinis lydymas (SLL) yra pažangi adityviosios gamybos technologija, taip pat žinoma kaip metalo 3D spausdinimo technologija. Naudojant aukštos energijos lazerio spindulį, metalo milteliai lydomi sluoksnis po sluoksnio, kad būtų sukurti trimačiai objektai. Sudėtingos trimatės struktūros, įskaitant vidines ertmes, sriegius ir tinklinius darinius, gali būti gaminamos be tradicinių apdirbimo technologijų. Iš gamybos perspektyvos, SLL suteikia neribotą dizaino laisvę ir mažą įrankių nusidėvėjimą lyginant su tradiciniais gamybos metodais (Huang et al., 2024).

SLL technologija leidžia kurti aukštos kokybės detales. Pasiekama vientisa detales sandara be vidinių ertmių ir defektų ir mechaninės savybės, panašios į tradiciškai apdirbtų dalių. Šis savybių derinys daro SLL technologiją galingu įrankiu sudėtingų aukštos kokybės komponentų gamybai. Gaminant SLL metodu naudojamos įvairios žaliavos, tokios kaip 316L nerūdijantis plienas, 17-4 PH nerūdijantis plienas, sendinami plienai, superlydiniai, aliuminio lydiniai, magnio lydiniai ir Ti-6Al-4V lydiniai (Zadeh et al. 2024).

Selektyvaus lazerinio lydymo technologija yra labai panaši į SLS technologiją. Skirtumą sudaro tai, kad SLL metu medžiagos milteliai yra sulydomi, o SLS metu milteliai yra dalinai išlydomi, tik jų išorinis sluoksnis yra aplydomas, kad galėtų susijungti su kitais miltelių grūdeliais. Gaminio platforma yra padengiama plonu miltelių sluoksniu su ritinėliu ar kitu įtaisu. Sulydžius pirmą sluoksnį, platforma yra nuleidžiama žemyn per sulydyto sluoksnio storį. Jau sulydytas paviršius padengiamas nauju miltelių sluoksniu. Jis yra sulydomas ir, kartojant šiuos žingsnius, toliau yra sulydoma visa detalė.

Dauguma komercinių SLM sistemų paprastai naudoja miltelius su dalelių dydžiu nuo 20 iki 50 μm ir tipinį sluoksnio storį nuo 20 iki 100 μm . Tyrimai ir plėtra, siekiant pagerinti SLL gaminių savybes, daugiausiai sutelkti į tris veiksnius: miltelių dalelių dydį, lazerio spindulio skersmenį ir sluoksnio storį.

1.2 Martensitiniai sendinami plienai

Martensitiniai sendinami (MS) plienai yra vieni iš patvariausių konstrukcinių plienų. Jų pagrindą sudaro geležies ir nikelio (8–25 %) lydinys, kuris gali būti legiruotas aliuminiu, molibdenu, titanu, kobaltu ir chromu. Šie plienai yra itin stiprūs ir tšūs, bet jautrūs cheminių sudedamųjų dalių pokyčiams. Anglies koncentracija pliene paprastai neviršija 0,03 %, o mangano ir silicio – 0,10 %. Fosforo ir sieros koncentracija yra mažesnė nei 0,01 %. Kai geležies legiravimo elementų tirpumas sumažėja žemose temperatūrose, susidaro martensito dispersinės fazės – intermetaliniai junginiai. Jie stiprina ir padidina plieno tvirtumą. Šis reiškinys vadinamas dispersiniu kietėjimu, o plienas, kuriame jis vyksta, vadinamas dispersiškai sendintuoju plienu (Valiulis, 2007).

Šie plienai yra grūdinami įkaitinus juos iki 800–860 °C ir tada aušinant juos ore. Grūdinant, austenitas virsta beangliu, legiruotu martensitu. Tokio martensito stiprumas yra 900–1100 MPa, o plastiškumo rodikliai $A = 18\text{--}20\%$, $Z = 75\text{--}85\%$. Kai užgrūdinamas plienas sendinamas 480–520 °C temperatūroje, prasideda dispersinio kietėjimo procesas – martensite susidaro sustiprinančios fazės Ni_3Ti , Ni_3Al , Fe_2Mo , Ni_2Mo ir kt. Dėl to plieno stiprumas padidėja iki 1800–2000 MPa bei jis išlieka pakankamai plastiškas ($A = 8\text{--}12\%$, $Z = 40\text{--}60\%$).

Martensitinių sendinamų plienų eksploatacinis temperatūrų diapazonas yra labai platus – nuo kriogeninių iki 500 °C. Be to, jie yra labai technologiški, jų įgrūdinamumas neribotas, ir gerai suvirinami. Užgrūdinti (prieš sendinimą) jie lengvai apdorojami pjovimu ir deformavimu (Juodelis, Bendikas ir Valiulis, 2004).

Martensitiniai sendinami plienai yra plačiai naudojami aviacijoje, raketų korpusų gamyboje, guolių gamyboje ir kt. Be to, jie taip pat yra naudojami įrankių ir presavimo formų gamyboje. Martensitinio sendinamo plieno milteliai yra labai tinkami gaminti produktus selektyviu sulydymu lazeriu (SLL) dėl aukšto atsparumo terminiams ciklams ir gero suvirinamumo (Vishwakarma, Chattopadhyay ir Srinivas 2020).

Martensitinio sendinamo plieno atsparumas įtrūkiams ir smūginis tūsumas yra apie du kartus didesni už grūdintojo ir atleistojo didelio atsparumo plieno. Šio plieno smūginis tūsumas labai priklauso nuo priemaišų kiekio (Valiulis, 2007).

1.2.1 Martensitinis sendinamas plienas 1.2709

Martensitinis sendinamas plienas 1.2709 yra vienas iš prieinamiausių ir populiariausių martensitinių sendinamų plienų pramonėje. Šios markės plienas pagal cheminę sudėtį atitinka Jungtinių Amerikos Valstijų klasifikacijos (18 % Ni) žymėjimą 300 (18Ni300 arba M300), pagal Europos standartų žymėjimą DIN 1.2709 ir pagal Vokietijos žymėjimą X3NiCoMoTi 18-9-5. Plieną DIN 1.2709 cheminė sudėtis pateikta 1-oje lentelėje. Šio plieno fizikinės ir mechaninės savybės pateiktos 2-oje lentelėje.

1 lentelė. Plieną DIN 1.2709 miltelių cheminė sudėtis

Fe	C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti	Co	Al
Balansas	0,03	iki 0,1	iki 0,1	17–19	4,8	iki 0,8	8,5–9,5	iki 0,1

Terminiškai apdorojant 1.2709 markės plieną, iš pradžių atliekamas homogenizacinis plieno atkaitinimas 820–830 °C temperatūroje. Aušinamas ore austenitas virsta martensitu, turinčiu kubinę erdvę centruotą (KEC) gardelę. Įkaitinus plieną iki 480–490 °C ir išlaikius šioje temperatūroje 2–12 h (dirbtinai sendinant), iš martensito kietojo tirpalo skiriasi naujos fazės – metališkieji junginiai. Po sendinimo plienas aušinamas ore (Valiulis, 2007).

18Ni 300 MS plienas yra mažanglis, dėl didelio stiprumo ir plastiškumo turi plačią taikymo sritį aviacijos įrangos srityje (Zhang et al., 2024). Taip pat šis plienas naudojamas įrankių gamyboje. Šio plieno mechaninės savybės nulemia žemas anglies kiekis ir susidarantys intermetalidai (pvz.: Ni₃Mo, Ni₃Ti, Fe₂Mo, FeMo, FeTi, Fe₂Ti ir kt.) (Tekin et al., 2023).

2 lentelė. DIN 1.2709 plieno fizikinės ir mechaninės savybės (Kempen et al., 2011)

Savybės	Plienas DIN 1.2709	
	Nesendintas	Sendintas
Tankis, ρ (kg/m ³)	8100	8100
Šiluminis laidumas (Wm ⁻¹)	15	15
Savitoji šiluminė talpa (J/kg)	450	450
Šiluminio plėtimosi koeficientas (W/m°C)	10,3·10 ⁻⁶	11,2·10 ⁻⁶
Tamprumo modulis, E (GPa)	160–190	190–210
Takumo riba, $R_{0,2}$ (MPa)	960	2013
Stiprumo riba, R_m (MPa)	1176	2094
Kietumas (HV0,5)	385	600
Puasono koeficientas	0,3	0,3

1.3 Klasikiniai martensitinio sendinamo plieno paviršiaus kietinimo būdai

1.3.1 Įazotinimas

Plienų įazotinimas yra detalių paviršiaus sluoksnių įsotinimas azotu. Įazotinimas padidina detalių paviršiaus kietumą, pasipriešinimą dilimui, patvarumo ribą sukant ir lenkiant bei korozinį atsparumą ore, vandenyje, vandens garuose ir pan. (Juodelis et al. 2004). Įazotinimas yra procesas, kurio metu plienai yra kaitinami nuo 450 °C iki 520 °C išlaikant nuo 1 iki 4 valandų. Paviršiuje formuojasi nitridai. Jų susidarymas sukelia tūrio padidėjimą. Pagrindinė medžiaga priešinas tūrio padidėjimui (varžo laisvą plėtimąsi dėl tūrio padidėjimo) ir dėl to susidaro gniuždomieji liekamieji itempiai (Hearn 1997).

Pagrindiniai įazotavimo metodai:

- Dujinis įazotinimas.

Tai procesas, kurio metu azoto atomai prasiskverbia į išorinį metalo sluoksnį, didindami paviršiaus kietumą, atsparumą dilimui ir korozijai. Tai ekonomiškėnis metodas palyginti su kitais įazotavimo procesais. Įazotinto sluoksnio storis didėja kartu su išlaikymo laiku ir temperatūros padidėjimu.

- Įazotinimas druskų voniose.

Šis procesas yra panašus į dujinį įazotinimą amoniako mišiniuose, tik šiame procese aktyvus azotas atsiranda iš skystų druskos tirpalo vonių, kuriuose ištirpdytos druskos, turinčios reaktyviojo azoto (cianidai, cianatai) (Schaaf et al., 2014). Šis procesas turi kelis privalumus

lyginant su kitais įazotavimo metodais, tokius kaip operacijos paprastumas, geresnė kokybė ir mažesnės energijos ir laiko sąnaudos (Peng et al. 2019).

- Įazotavimas plazma.

Šioje technologijoje naudojami intensyvūs elektriniai laukai, kad būtų sukuriamos jonizuotos dujų molekulės aplink paviršių, kuris bus įazotinamas. Dažniausiai plazmai naudojamos grynos azoto dujos.

Tradiciškai, martensitinių sendinamų plienų įazotavimas buvo taikomas siekiant pagerinti atsparumą dilimui. MS plienų dujinis įazotavimas paprastai atliekamas esant santykinai žemoms temperatūroms (žemiau 455 °C), palyginti su kitais įrankiniais plienais, dėl jo polinkio formuoti reversinį (antrinį) austenitą. Paprastai, įazotavimo temperatūra palaikoma apie ~50 °C žemiau plieno senėjimo temperatūros, siekiant išvengti poveikio MS plieno sendinimo procesui. Dujinis įazotavimas atliekamas amoniako (NH₃) arba amoniako:vandenilio (NH₃:H₂) aplinkoje. Keičiant dujų sudėtis ir temperatūros proceso parametrus, galima sureguliuoti proceso įazotavimo potencialą ir taip slopinti ar skatinti geležies nitridų, pvz., ϵ -Fe₂N_{1-z} arba γ' -Fe₄N_{1-x}, formavimąsi (Somers 2015). Kadangi bendra įazotavimo kinetika kontroliuojama difuzijos, įazotavimo laikas ir temperatūra labai nulemia dangos gylį, kurį galima pasiekti tam tikrame pliene. Pagrindinis MS plienų stiprinimo mechanizmas įazotavimo metu yra nano-dydžio nitridų susidarymas, kurie taip pat sukelia gniuždomuosius liekamuosius įtempius medžiagoje. Pagrindiniai elementai, formuojantys nitridus 18Ni M300 pliene, yra molibdenas ir titanas. Gniuždomieji įtempiai, kurie susidaro paviršiniuose įazotintuose sluoksniuose, turi teigiamo poveikio gaminio nuovargio savybėmis, tuo tarpu stiprinantis efektas, gautas dėl dispersinių nitridų susidarymo, didina takumo ribą, kas taip pat prisideda prie atsparumo nuovargiui pagerėjimo. Dauguma tyrimų dėl MS plienų įazotavimo buvo atlikti temperatūroje nuo 450 iki 520 °C (Funch 2022).

Pagrindiniai azotavimo taikymo, kietinant martensitinių sendinamų plienų paviršius, privalumai ir trūkumai

Privalumai:

- Procesas atliekamas sąlyginai žemoje temperatūroje, todėl išvengiama terminių medžiagos struktūros pokyčių.
- Įazotintas sluoksnis išlaiko kietumą net esant aukštoms temperatūroms (450–550 °C).
- Įazotintas sluoksnis taip pat suteikia atsparumą korozijai.
- Įazotavimas plazma yra efektyvus būdas pasiekti gerus paviršiaus kietumo rezultatus.

Trūkumai:

- Įzotintas sluoksnis yra plonesnis ir trapesnis nei cementuotas, todėl mažiau atsparus kontaktiniams įtempimams.
- Padengimo procesas yra labai ilgas.
- Įzotinimas druskų voniose yra brangus, nes naudojamos medžiagos (druskos su CN grupėmis) yra brangios, o jų šalinimas ir utilizavimas yra neekologiškas ir kenksmingas aplinkai.
- Paviršiaus įzotinimui plazma reikia brangios įrangos ir įgudusių specialistų.

1.3.2 Lazerinis paviršiaus legiravimas

Pastaraisiais metais lazerinis paviršiaus legiravimas (LPL), kaip lazeriu paremtas paviršiaus modifikavimo metodas, įgijo didelį populiarumą metalurgijos ir transporto pramonėse. Kadangi lazerio spindulį galima sutelkti į konkrečias apdorojamo paviršiaus sritis, legiravimo procesą galima tiksliai kontroliuoti, apdorojant tam tikras paviršiaus dalis, kai kitos dalys lieka nepaveiktos. Todėl LPL naudojamas aukštos kokybės plieno atsparumui dilimui, kietumui ir korozijai gerinti. Šis procesas yra efektyvus ir paprastas. Taikant LPL metodą galima formuoti detales su sudėtingomis mechaninėmis savybėmis, atitinkančiomis skirtingus poreikius (Chen et al. 2024).

Lazerinis paviršiaus legiravimas yra medžiagų apdorojimo technologija, kuri naudoja didelės galios lazerio pluoštą, kuris išlydo legiravimo komponento sluoksnį ir legiruojamos medžiagos paviršių. Lazeriu legiruoto gaminio savybės priklauso nuo legiravimo medžiagos pasirinkimo, jos sudėties ir pasiskirstymo paviršiaus sluoksnyje. Šie veiksniai veikia mikrostruktūrą legiruotame paviršiuje. Keraminiai lydiniai, karbidai, oksidai ir boridai (SiC, WC, TiO₂, TiB₂, TiC ir pan.) plačiai naudojami kaip legiravimo medžiaga dėl mažo tankio, didelio kietumo, gero atsparumo dilimui, aukštos lydymosi temperatūros ir atsparumo korozijai (Jeyaprakash, Yang, ir Kumar 2020).

Tai paprastas ir universalus būdas, skirtas kurti naujus aukštos kokybės lydinius su unikaliomis paviršiaus savybėmis. Šis procesas naudojamas formuoti lydiniams su kontroliuojama chemine sudėtimi, mikrostruktūra, legiruotojo sluoksnio gyliu ir smulkiais grūdelių dydžiais, kad šios savybės atitiktų iškeltus inžinerinius reikalavimus (Hussain et al., 2010).

Lazerinis paviršiaus legiravimas buvo nagrinėjamas Vilniaus Gedimino technikos universiteto mokslininkų (Bučelis 2024). Kaip legiravimo medžiaga buvo naudojama amorfinių boro miltelių pasta. Šių tyrimų metu buvo nustatyta, kad lazeriu legiruojant specialios klasės martensitinį sendinamą plieną 18Ni300 boru yra padidinamas šios plieno paviršiaus kietumas.

Dėl didesnio paviršiaus kietumo kelis-keliasdešimt kartų padidėja atsparumas abrazyviniam dilimui. Pagrindinis pasiūlyto metodo trūkumas – tai įtrūkių susidarymas lazeriu įborintuose sluoksniuose didėjant kietumui. Įtrūkiai gali bloginti tiek paviršiaus eksploatacines savybes, tiek viso gaminio mechaninį atsparumą. Įtrūkių susidarymas yra nulemtas tiek lazerinio lydymo proceso ypatumais, tiek formuojamų sluoksnių fazinės sudėties, kai paviršiui legiruoti naudojamas boras.

Pasiūlytas metodas galėtų tapti efektyvia alternatyva termocheminiam įžotinimui, jei būtų išspręsta įtrūkių susidarymo problema. Lazerinio apdorojimo parametrų ir legiruotų sluoksnių fazinės sudėties optimizavimas galėtų padėti sumažinti arba pašalinti įtrūkių susidarymo riziką.

Lazeriu pagamintos dangos turi įvairių tipų įtrūkių, kurie gali atsirasti dėl skirtingų pasirinktų medžiagų ir neteisingų proceso parametrų parinkimo. Siekiant efektyviai spręsti lazeriu padengtų dangų įtrūkių problemą, būtina suprasti dangos įtrūkių tipus ir jų atsiradimo priežastis. Kalbant apie lazeriu padengtų dangų įtrūkių tipus, jie gali būti klasifikuojami kaip karštieji ir šaltieji įtrūkiai pagal dangos įtrūkių atsiradimo laiką, temperatūrą ir lūžio charakteristikas (Li, Huang, ir Yi 2023).

Karštųjų įtrūkių atsiradimo priežastys dažniausiai yra įvardijamos kaip: žemos lydymosi temperatūros elementų, tokių kaip Si ir C, pasiskirstymas lydytame sluoksnyje (Eo et al. 2022), nevienalytis stambių ir trapių junginių bei priemaišų fazių pasiskirstymas (Shankar et al. 2000) ir netvarkingas grūdelių augimas (Chen et al. 2016).

Šaltieji įtrūkiai dažnai susiję su antrinių įtrūkių atsiradimu, atspindintys trapųjį lūžio pobūdį. Pavyzdžiui, nikelio pagrindo lydinio miltelių dangos dažnai pasižymi šaltais įtrūkiais (Zenitani et al., 2007). Netinkamas lydymo proceso parametrų parinkimas ir per dideli terminiai gradientai išlydytoje vonelėje yra pagrindiniai veiksniai, lemiantys šaltų įtrūkių susidarymą. Tai atsitinka dėl polinkio į martensitinę fazės transformaciją kristalizavimosi temperatūrų intervale (Hu, Huang ir Wu 2011), dėl kurios danga tampa kietesnė. Termofizinių savybių skirtumai tarp dangos medžiagos ir pagrindo medžiagos, kartu su aušinimo ir kietėjimo procesu, sukelia didelių liekamųjų terminių įtempių atsiradimą. Kai šie liekamieji terminiai įtempiai viršija medžiagos tempimo stiprumo ribą, atsiranda šalti įtrūkiai (Li et al., 2023). Todėl šalti įtrūkiai dažniausiai pasižymi įtrūkio plitimu per kristalinę struktūrą (Sadhu et al., 2020).

Taip pat įtrūkiai dar yra skirstomi pagal atsiradimo vietą:

- Įtrūkiai dangos paviršiuje. Šie įtrūkiai susidaro dėl greito aušimo kristalizacijos (greito aušinimo kietėjimo metu) metu. Taip pat jie gali susidaryti dėl netolygaus medžiagų

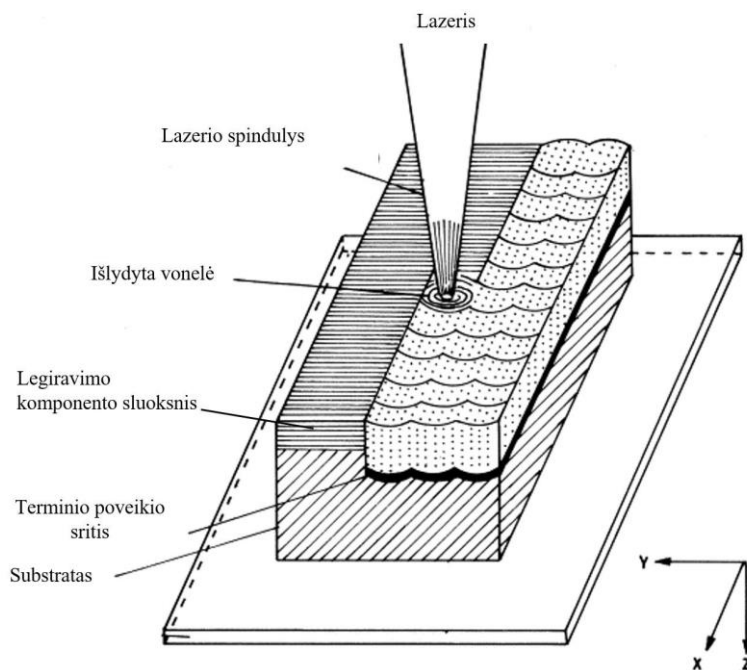
susimaišymo. Šie įtrūkiai vyksta vertikaliai žemyn link pagrindinio metalo ir kartais jį pasiekia (Zhang 2021).

- Įtrūkiai dangos pagrinde (centre). Šie įtrūkiai susidaro dėl pagrindinio metalo ir dangos medžiagos skirtingų šiluminių plėtimosi koeficientų ir Jungo modulių, kas lemia liekamųjų įtempių susidarymą. Pirmiausia šie įtrūkiai susidaro prie pagrindinio metalo ir vėliau vertikaliai aukštyn kyla link dangos išorės (Zhang 2021).

- Persidengimo zonos įtrūkiai („Overlap zone cracks“). Šie įtrūkiai susidaro persidengimo zonoje dėl netinkamo persidengimo koeficiento pasirinkimo. Dėl šios priežasties atsiranda didelis šilumos kaupimasis, temperatūros gradiento padidėjimas ir padidėję terminiai įtempiai. Dėl to padidėja grūdo augimo laikas ir susidaro didesni grūdai. Persidengimo zonos įtrūkiai linkę plisti per visą sulydomą dangos sluoksnį (Wang 2022).

Lazerinio apdorojimo proceso parametrų optimizavimas, mažinant liekamuosius tempimo įtempius, padėtų sumažinti įtrūkių susidarymą.

Legiruojant plieno paviršių boru, sustiprinimo efektas pasiekiamas susidarant kietoms boridinėms fazėms. Žemas boridų plastiškumas padidina lazeriu įborintų sluoksnių jautrumą makro- ir mikroįtrūkių susidarymui. Keičiant boro ir pagrindinio metalo susimaišymo santykį, reguliuojamas boridinių fazių kiekis legiruotame paviršiuje ir paviršiaus kietumas. Parodyta (Bučelis 2024), kad gausėjant boridinių fazių kiekiui, paviršiaus polinkis įtrūkiams didėja. Įborintų sluoksnių su skirtinga boridų koncentracija trapumo savybių tyrimas ir palyginimas galėtų padėti optimizuoti fazinę sudėtį ir sumažinti lazeriu įborintų paviršių trūkinėjimo.



2 pav. Lazerinio paviršiaus legiravimo schema (Majumdar ir Manna, 1999)

Kitas MS plieno lazerinio legiravimo ypatumas – tai terminis poveikis pagrindiniam metalui. Yra laikoma, kad, apdorojant metalus lazerio pluoštu, terminis poveikis metalui yra trumpalaikis ir koncentruotas. Tačiau tiriant MS plieno lazerinį apdorojimą su skirtingais parametrais, nustatyta, kad visais atvejais šalia išlydytos vonelės pagrindiniame metale susidaro terminio poveikio sritis, kurioje fiksuojamas reikšmingas kietumo sumažėjimas. Taip, MS plieno gaminys po lazerinio įborinimo šalia darbinių paviršių turės kelių sluoksnių su skirtingomis savybėmis sandara. Šio darbo tyrimais siekiama įvertinti kokį poveikį tokia sandara gali turėti viso gaminio mechaniniam atsparumui.

1.4 Kietų dangų mechaninių savybių nustatymo metodai

Dangų mechaninių savybių nustatymo metodai:

- Vickerso arba Knopo kietumo testas:

Spaudžiant deimantinį įrankį į dangos paviršių ir matuojant įspaudimo dydį, galima nustatyti medžiagos kietumą ir atsparumą įtrūkiams.

- Instrumentuota indentacija (nanoindentacija):

Šis metodas suteikia išsamią informaciją apie dangos mechanines savybes, įskaitant kietumą, tamprumo modulį ir atsparumą įtrūkiams, nuolat matuojant jėgą ir poslinkį indentacijos metu.

- Įbrėžimo metodas:

Kritinės apkrovos matavimas: šis bandymas apima kieto indikatoriaus traukimą per dangos paviršių, palaipsniui didinant apkrovą, kol atsiranda įtrūkių ar atsisluoksniavimų. Apkrova, kuriai esant atsiranda šie gedimai, užfiksuojama kaip kritinė apkrova.

Po braukimo atliekama analizė: tokie mikroskopijos metodai, kaip skenuojamoji elektroninė mikroskopija (SEM), gali būti naudojami įtrūkio vaizdai ir atsisluoksniavimo pobūdžiui analizuoti, siekiant geriau suprasti įtrūkių susidarymo mechanizmą.

- Lenkimo bandymai:

Keturių taškų arba trijų taškų lenkimas: danga ant substrato veikiama lenkimu ir matuojamas įlinkis, kuriam esant atsiranda įtrūkių ar jie plinta. Tai padeda nustatyti dangos atsparumą įtrūkiams. Dangą stebint mikroskopu lenkimo metu galima gauti realiojo laiko įžvalgų apie įtrūkių atsiradimą ir plitimą.

- Liekamųjų įtempių matavimas:

Rentgeno difrakcija (XRD): šis neardomasis metodas matuoja liekamuosius įtempius dangos viduje, kurie gali turėti įtakos įtrūkių elgsenai.

Stoney lygtis: naudojama plonų plėvelių liekamiesiems įtempiams apskaičiuoti remiantis substrato kreivumo matavimais.

- Baigtinių elementų analizė (BEA):

Įtempių pasiskirstymo modeliavimas: BEA gali modeliuoti įtempių pasiskirstymą dangos viduje esant skirtingoms apkrovos sąlygoms, siekiant numatyti galimus įtrūkių taškus ir jų plitimo kelius. Taip pat gali įtraukti specifinius įtrūkių plitimo modelius, siekiant modeliuoti, kaip įtrūkliai plinta esant įvairioms apkrovos jėgoms.

- Mikrostruktūrinė analizė:

SEM ir TEM: skenuojamoji elektroninė mikroskopija (SEM) ir transmisinė elektroninė mikroskopija (TEM) gali būti naudojamos dangų mikrostruktūriniams ypatumams, tokiems kaip grūdų ribos, fazės ir defektai, turintys įtakos įtrūkių elgsenai, tyrinėti.

Fraktografija: suardytų dangų lūžio paviršiaus analizė, siekiant suprasti lūžio būdą ir mechanizmą.

- Atsparumo įtrūkiams bandymai:

Chevron įpjovos testas: dangoje suformuojama įpjova, o bandinys apkraunamas iki lūžio. Apskaičiuojamas kritinis įtempių intensyvumo koeficientas (K_{IC}).

Mikro- arba makromastelio bandymai: priklausomai nuo dangos storio ir taikymo, gali būti naudojami įvairūs mastelio bandymai atsparumui įtrūkiams nustatyti.

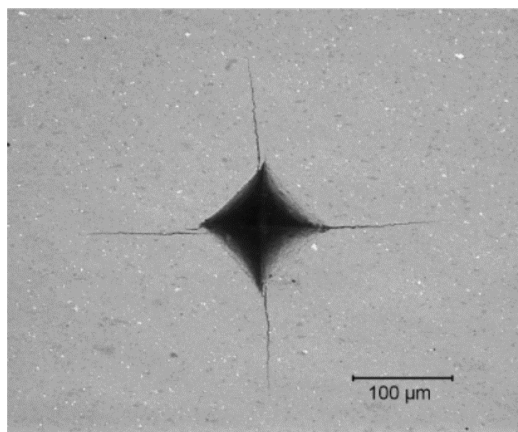
- Akustinės emisijos stebėjimas: realiojo laiko įtrūkių aptikimas: stebint akustinius signalus, skleidžiamus įtrūkių formavimosi ir plitimo metu, galima gauti realiojo laiko duomenis apie lūžio procesus.
- Terminio ciklavimo bandymai: vertinimas esant temperatūros svyravimams: dangos veikiamos pakartotiniais šildymo ir aušinimo ciklais (terminiais ciklais), kad būtų sukeltas terminis stresas ir stebimas įtrūkių elgesys.

1.4.1 Vickerso įspaudos įtrūkių testas

Vickerso įspaudų įtrūkių (angl. *Vickers indentation fracture* (VIF)) testas skirtas trapios keramikos irimo atsparumui įvertinti. Idėja stebėti kietumo įspaudų sukeltus įtrūkius atsirado Palmqvist 1950-aisiais, tačiau pirmą kartą kaip lūžio tūsumo testą šią koncepciją pristatė Evans ir Charles 1970-ųjų viduryje. Evans ir Charles taikė VIF metodą įvairioms medžiagoms, nuo monokristalių oksidų iki cementuotų karbidų, kurios visos atrodė tinkamos šiam testui. Technika greitai išpopuliarėjo dėl savo veiksmingumo. Tai atrodė patogus būdas nustatyti irimo tūsumo rodiklį K_{IC} . Reikalingas tik nedidelis medžiagos kiekis, o matavimus galima greitai atlikti, skiriant nedaug laiko bandinių paruošimui ir minimalias finansines išlaidas. Beveik

visais atžvilgiais VIF metodas atrodė praktiškai idealus, nors pripažįstama, kad tai gana netradicinis būdas nustatyti irimo tįsumą (Quinn ir Bradt, 2007).

Įtrūkių tįsumo nustatymas naudojant VIF techniką prasideda nuo aukštos kokybės, tolygiai nupoliruoto bandomojo mėginio paviršiaus paruošimo. Mėginys nėra iš anksto įtrūkęs. Nupoliruotas mėginio paviršius tada įspaudžiamas Vikerso piramidiniu mikrokietumo įspaudikliu. Paprastai naudojama įprasta kietumo bandymo mašina, kuri palaipsniui padidina apkrovą įspaudikliui iki didžiausios apkrovos, laiko apkrovą pastoviai nustatytą laiką ir tada atlaisvina įspaudiklį. Mėginys įspaudžiamas naudojant didelę bandymo apkrovą, kad po įspaudimu ir jo aplinkoje susidarytų deformuota sritis, kuri sukelia keturis įtrūkius, sklindančius iš kvadratinės įspaudos kampų. 3 pav. iliustruoja Vikerso įspaudą su keturiais tokiais įtrūkiais, sklindančiais iš įspaudos kampų (Quinn ir Bradt, 2007).



3 pav. Vikerso įspauda su įtrūkiais (Quinn ir Bradt, 2007)

1.4.2 Nanoindentavimas

Nanoindentavimas dabar plačiai pripažįstamas kaip pagrindinis metodas plonų dangų ir paviršiaus mechaninėms savybėms tyrinėti. Kadangi paviršiaus ir gaminio savybės yra labai svarbios biologijoje, ypač biomedžiagose, didėja susidomėjimas nanoindentavimo naudojimu biologinių medžiagų ir sistemų tyrimams. Dabartiniai tyrimai dažniausiai koncentruojasi į kietus audinius ir biomedžiagas, tačiau daugiau dėmesio skiriama minkštiems audiniams ir viskoelastinėms biomedžiagoms. Artimiausiais metais nanoindentavimo svarba biologijos ir biomedžiagų tyrimuose greičiausiai sparčiai didės (Vadgama, 2005).

Pagrindiniai instrumentai, naudojami paviršių ir plonų plėvelių nanomechaninėms savybėms tirti, yra pagrįsti taškiniais zondais. Jie išsivystė iš dviejų skirtingų metodikų: skenuojančios zondinės mikroskopijos, ypač atominės jėgos mikroskopijos (AJM) (pvz., Binnig et al., 1986), ir mikroindentavimo (pvz., Blau ir Lawn, 1986). Šios dvi metodikos

susilieja ilgio skalėje nuo 10 iki 1000 nm, kas atitinka apkrovos diapazoną nuo μN iki mN . Taškinio zondo mechaniniai bandymai šioje skalėje dažnai vadinami nanoindentavimu, nes įspaudų dydis yra nanometrų diapazone. Šie nanomechaniniai bandymai dažnai naudojami kartu su papildomomis technikomis, tokiomis kaip mikro-Ramano spektroskopija, elektroninė mikroskopija (SEM ir TEM) ir aukštos energijos difrakcijos tyrimais (Vadgama, 2005).

1.4.3 Dangų H/E ir H^3/E^2 vertinimo kriterijai

Literatūroje, optimizuojant kietų dangų struktūrą ir formavimo parametrus, siūloma taikyti H/E ir H^3/E^2 kriterijus (čia H – kietumas, E – tamprumo modulis), siekiant įvertinti ir/arba palyginti dangų plastiškumą (arba atsparumą trūkinėjimui) (H/E) ir atsparumą plastinei deformacijai dilimo metu (H^3/E^2).

Ankstesniais laikais buvo dedamos pastangos siekiant susieti Jungo modulio (E) vertę su dilimo atsparumu. Vienas iš ankstesnių bandymų naudoti H/E santykį dilimo atsparumui įvertinti buvo padarytas mokslininko Oberle. Dilimo atsparumo priklausomybė nuo H/E santykio buvo priimta, kad medžiagos su didesniais H/E santykiais gali daugiau energijos absorbuoti elastingai su mažesniais pažeidimais. Daugiau tyrimų yra sutelkta ties E poveikį medžiagų kontaktui ar įspaudų geometrijai, nors plastinė deformacija dominuoja kontakto procese, kas gali paveikti dilimo atsparumą. H/E santykis dažnai naudojamas kaip rodiklis įvertinti medžiagų bei dangų/plėvelių dilimo atsparumą.

H^3/E^2 santykis kietuose dangose yra labai svarbus parametras, kuris parodo nusidėvėjimo atsparumą ir deformacijų elgsenai. Šis santykis parodo dangos atsparumą plastinei deformacijai ir jos gebėjimą atlaikyti įtemptį slenkant arba trinties metu. Dangos, kurios sukuriamos su optimizuotais H^3/E^2 santykiais, balansuodamos kietumą ir elastingumo modulį, pasižymi didesniu pažeidimų toleravimu ir mažesniu paviršiaus deformacijos tikimybe veikiant apkrovai. Didinant H^3/E^2 santykį tribologinėse dangose per nanostruktūrizavimą, padidėja atsparumas apkrovoms ir stiprumas, galiausiai pagerinant nusidėvėjimo atsparumą. Be to, H^3/E^2 santykis labai svarbus nustatant dangų mechanines savybes, tokiu kaip kietumas, tamprus atsistatymas ir atsparumas plastinei deformacijai, kurios yra gyvybiškai svarbios metalinių medžiagų apsaugai ekstremaliomis sąlygomis (Beake, 2022).

1.5 Pirmojo skyriaus išvados

1. Martensitiniai sendinami (MS) plienai dėl savo sudėties ir savybių tinka gamybai AG metodais, tokiais kaip selektyvusis lazerinis lydymas. Sparčiai plintant AG technologijoms, MS plienų populiarumas didėja ir yra poreikis vystyti efektyvius paviršiaus apdorojimo metodus, kurie užtikrintų MS plienų atsparumą dilimui.

2. Lazerinis legiravimas boru galėtų tapti efektyvia alternatyva tradiciniams MS plienų paviršiaus termocheminio apdorojimo metodams, jei būtų sumažinta arba pašalinta įtrūkių susidarymo rizika. Lazerinio apdorojimo parametrų ir legiruotų sluoksnių fazinės sudėties optimizavimas galėtų padėti sumažinti arba pašalinti įtrūkių susidarymo riziką.
3. Siekiant ištirti lazeriu įborintų MS plieno paviršiaus sluoksnių fazinės sudėties pokyčių poveikį plastiškumo savybėms, galima pritaikyti H/E ir H^3/E^2 kriterijus. Tai leistų įvertinti ar yra tam tikras kietumas, pasiekus kurį, šuoliškai padidėja įborinto sluoksnio polinkis trapumui, ir padėtų nustatyti maksimalią kietumo ribą, kurios neverta viršyti, siekiant išvengti paviršiaus polinkio trūkinėti. Šios žinios gali būti naudingos toliau vystant martensitinių sendinamų plienų lazerinio legiravimo technologijas.
4. Skirtingai negu termocheminiu įžotiniu gaunamų dangų atveju, lazeriu legiruotiems paviršiams būdingi liekamieji tempimo įtempiai. Be to, šalia įborinto paviršiaus sluoksnio pagrindiniame metale susidaro terminio poveikio sritis, kurioje fiksuojamas reikšmingas kietumo sumažėjimas. Taip, MS plieno gaminys po lazerinio įborinimo šalia darbinių paviršių turi kelių sluoksnių su skirtingomis savybėmis sandara. Martensitinio sendinamo plieno lazeriu įborintų bandinių elgsenos tyrimas lenkimo ir tempimo metu leistų nustatyti lazerinio įborinimo metų formuojamų kietų ir susidarančių minkštų sluoksnių poveikį viso gaminio mechaninėms savybėms bei įvertinti būtinybę taikyti papildomą sendinimą jau įborintiems bandiniams.

2. TIRIAMOJO DARBO METODIKA

Šiame darbe yra nagrinėjami lazeriu įborinti martensitinio sendinamo plieno paviršiai ir lazerinio įborinimo poveikis bandinių mechaniniam atsparumui. Tyrimų metu yra analizuojama ir nagrinėjama skirtingą kietumą turinčių įborintų sluoksnių mikrostruktūra bei mikrokietumas, nustatomas jų tamprumo modulis (E) bei apskaičiuojami plastiškumo kriterijai (H/E ir H^3/E^2). Atlikti eksperimentiniai įborintų bandinių lenkimo bandymai bei lenkimo ir tempimo kompiuterinę analizę. Baigiamajame darbe yra nagrinėjami bandinių tempimo ir lenkimo metu susidarę įtempiai remiantis baigtinių elementų metodika.

2.1 Tiriamojo objekto (SLL bandinių) gamyba

Eksperimentams pasirinktas 18 % Ni martensitinis sendinamas plienas DIN 1.2709 (3 lentelė). Bandiniams gaminti SLL būdu naudota „Concept Laser M3“ įranga. Pagrindiniai SLL įrangos ir proceso parametrai pateikti 4 lentelėje. Po SLL gamybos, bandiniams atliktas terminis apdorojimas elektrinėje krosnyje, apimantis grūdinimą (820 ± 10 °C 2 val., oras, aušinamas ore) ir sendinimą (490 ± 10 °C 2 val., oras, aušinamas ore). Tai tipiniai terminio apdorojimo režimai, kurie taikomi šios markės plienui, po kurio plienas įgauna savo mechanines savybes. Lazerinio įborinimo eksperimentams iš SLL būdu pagamintų bandinių išpjauti $6 \times 20 \times 35$ mm bandiniai.



4 pav. Concept Laser M3 selektyviojo lazerinio sulydymo įrenginys

3 lentelė. Plieno DIN 1.2709 miltelių cheminė sudėtis (pagal gamintojo specifikaciją, mas. %)

Fe	C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti	Co	Al
Balansas	0,03	iki 0,1	iki 0,1	17–19	4,8	iki 0,8	8,5–9,5	iki 0,1

4 lentelė. Concept Laser M3 lazerio ir SLL proceso parametrai

Skaidulinis lazeris			Vieno sluoksnio storis, mm	Sulydymo greitis, mm/s	Apsauginės dujos	
Bangos ilgis, nm	Galia, W	Dėmės dydis, mm			Tipas	Kiekis, l/val.
1064	100	Ø 0,2	0,03	0,2	Ar	0,75

2.2 Tiriamojo objekto lazerinio įborinimo metodika

Lazeriniam įborinimui naudoti „Sigma-Aldrich“ gamintojo 95–97 % amorfinio boro milteliai; dalelių dydis < 1,0 µm. Prieš lazerinį paviršiaus apdorojimą lydymo režimu bandinių paviršiai padengti boro pastos sluoksniu (amorfinis boras sumaišytas su organiniu rišikliu 3 mas.% ir acetonu iki skystos konsistencijos); boru padengti bandiniai išdžiovinti elektrinėje krosnyje (110±5 °C, 2 val.). Paviršiams legiruoti lazeriu naudotas skaidulinis lazeris FANUCI® PRO 1500 (5 pav.) ir taikyti tokie proceso parametrai: 300 W lazerio galia; 1,0 mm lazerio spindulio dėmės skersmuo.



5 pav. Skaidulinis lazeris FANUCI® PRO 1500

5 ir 6 lentelėse pateikti bandinių, įborintų be ir su lazerio spindulio skersine osciliacija, žymenys ir pagrindiniai lazerinio apdorojimo parametrai. Taikant parametrus, nurodytus 5-oje lentelėje, gauti įborinti sluoksniai plačiame kietumų intervale. Šios serijos („A“) bandiniai buvo naudojami tiriant skirtingo kietumo įborintų sluoksnių (boridinės fazės kiekiu) plastiškumą. Serijos „B“ bandiniai buvo naudojami tiriant mechanines savybes.

5 lentelė. Lazerinio įborinimo be osciliacijos režimai ir bandinių žymenys

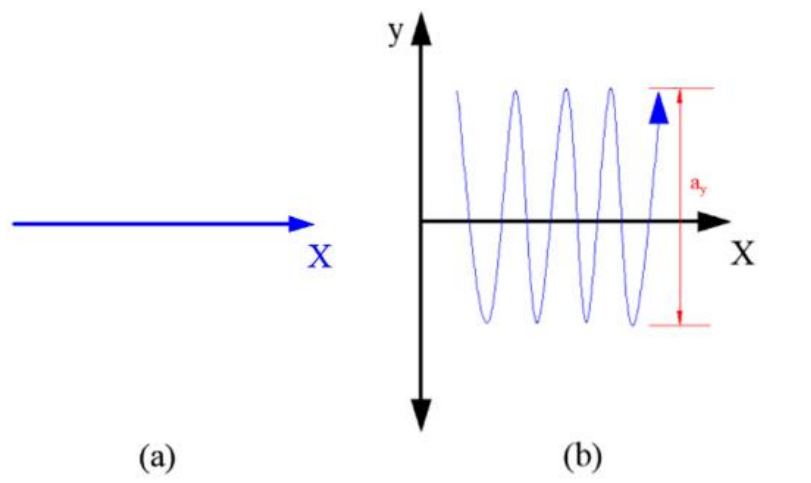
Boro pastos storis, mm	Lazerio eigos greitis, mm/min		
	500	1000	1500
0,03	A ₁	A ₂	-
0,2	A ₃	A ₄	-
0,45	A ₅	A ₆	A ₇

- ✓ bandinių pakaitinimas iki 400 °C lazerinio apdorojimo metu;
- ✓ atstumas tarp gretimų takelių – 0,4 mm.

6 lentelė. Lazerinio įborinimo su lazerio spindulio skersine osciliacija režimai ir bandinių žymenys

Lazerio spindulio skenavimo greitis v , mm/min	Nominalus osciliuoto takelio plotis/žingsnis tarp gretimų lazerių apdorotų takelių, mm	
	1,5/0,8	2,5/2,0
750	–	B ₂
1000	B ₁	B ₃

- ✓ 120 Hz osciliacijos dažnis;
- ✓ 0,03 mm boro pastos storis.



6 pav. Lazerio spindulio osciliacijos modelis ir gaunama lazerio spindulio trajektorija: (a) – be osciliacijos; (b) – su skersine osciliacija; a_y – osciliacijos amplitudė; X – lazerio spindulio pagrindinė judėjimo kryptis (Pang et al., 2019)

2.3 Tiriamojo objekto mikrošlifų paruošimo metodika

Tyrimams, iš visų „A“ ir „B“ serijų bandinių paruošti skersiniai mikrošlifai, taikant įprastą metodiką – išpjovimas, užpylimas derva, šlifavimas, poliravimas, ėsdinimas. Iš pagamintų ir įborintų bandinių buvo išpjauti mažesnių matmenų bandiniai, kurie buvo sudėti į apvalias plastikines formas ir užpilti epoksidiniais klėjais. Ataušus klėjams detalės buvo šlifuojamos įvairaus grublėtumo švitriniumi popieriumi statmenai tiriamam paviršiui. Vėliau išlyginus paviršių ir pašalinus nešvarumus paviršius buvo poliruojamas. Paskutinis poliravimo etapas atliktas su 0,2 μm dalelių dydžio poliravimo suspensija. Struktūrai tirti taikytas ėsdiklis:

H₂O, CH₃COOH, HCl ir HNO₃ tūrio santykiu 1:1:4:1. Terminio poveikio sričiai tirti taikytas *Marble* ėsdiklis: 10g CuSO₄, 50ml HCl, 50ml H₂O.

2.4 Tiriamojo objekto mikrostruktūros tyrimo metodika

Įborintų sluoksnių mikrostruktūra, pagrindinio metalo liekamasis porėtumas ir bandinių po lenkimo lūžiai tirti skenuojamosios elektroninės mikroskopijos metodu (mikroskopas SEM JEOL JSM-7600F). Skenuojamosios elektroninės mikroskopijos (SEM) tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybinių medžiagų institute. Tyrimai atlikti SEM JOEL JSM-7600F skenuojamosios elektroninės mikroskopijos prietaisu su antrinių elektronų SE detektoriumi (7 pav.). Pagrindiniai SEM parametrai: greitinančioji įtampa – 10 kV, atstumas iki bandinio paviršiaus – ~8 mm, padidinimas nuo 400 iki 2000 kartų, temperatūra – 22 °C.



7 pav. SEM JOEL JSM-7600F skenuojamosios elektroninės mikroskopijos prietaisas su antrinių elektronų SE detektoriumi

2.5 Optinės mikroskopijos tyrimo metodika

Tiriamų objektų optinė mikroskopija buvo atlikta naudojant NICON ECLIPSE MA200 optinį mikroskopą. Šis prietaisas yra su integruota vaizdo kamera ir programiniu duomenų apdorojimo paketu. Mikrošlifų paviršiams tirti naudojant 5, 10, 20 ir 50 kartų didinimo objektyvus ir 10 kartų didinimo okuliarą.

Baigiamajame darbe optinės mikroskopijos metodu buvo tirti „B“ serijos mikrošlifai siekiant nustatyti su osciliacija gautų įborintų sluoksnių storį, formą, defektus ir TPS mikrostruktūros ypatumus.

2.6 Mikrokietumo matavimai

Tyrimo metu atlikti lazerinio legiravimo būdu įborintų SLL bandinių paviršių mikrokietumo matavimai Knopo mikrokietumo matavimo metodu. Matavimai atlikti pagal LST EN ISO 4545-1:2018 en „Metalinės medžiagos. Knopo kietumo nustatymas. 1 dalis. Bandymo metodas“ standarto nurodymus. Knopo mikrokietumo bandymo parametrai nurodyti 7 lentelėje.

7 lentelė. Knopo mikrokietumo bandymo parametrai

Parametras	Vertė
Apkrova	50 g, 100 g, 200 g
Išlaikymo trukmė	10 s, 15 s
Bandymo žingsnio matmenys pagal LST EN ISO 4545-1:2018 EN	
Žingsnis vertikalčiai	50 μm
Žingsnis horizontalčiai	150 μm

Tyrimai atlikti universaliu automatizuotu kietmačiu *Zwick Roell ZH μ* (8 pav.) su 1 % matavimo paklaida. Matavimais nustatyti tam tikras įborintų sluoksnių mikrostruktūras atitinkantys mikrokietumo intervalai („A“ serijos bandiniams). Taip pat matavimų metu buvo tiriamas mikrokietumo pasiskirstymas „B“ serijos bandiniuose, gautuose su osciliacija, horizontalčiai (įborintame sluoksnyje) ir pagal gylį, apimant įborintą sluoksnį, terminio poveikio sritį ir nepaveiktą pagrindinį metalą. Matavimai atlikti prieš ir po pakartotinio sendinimo.



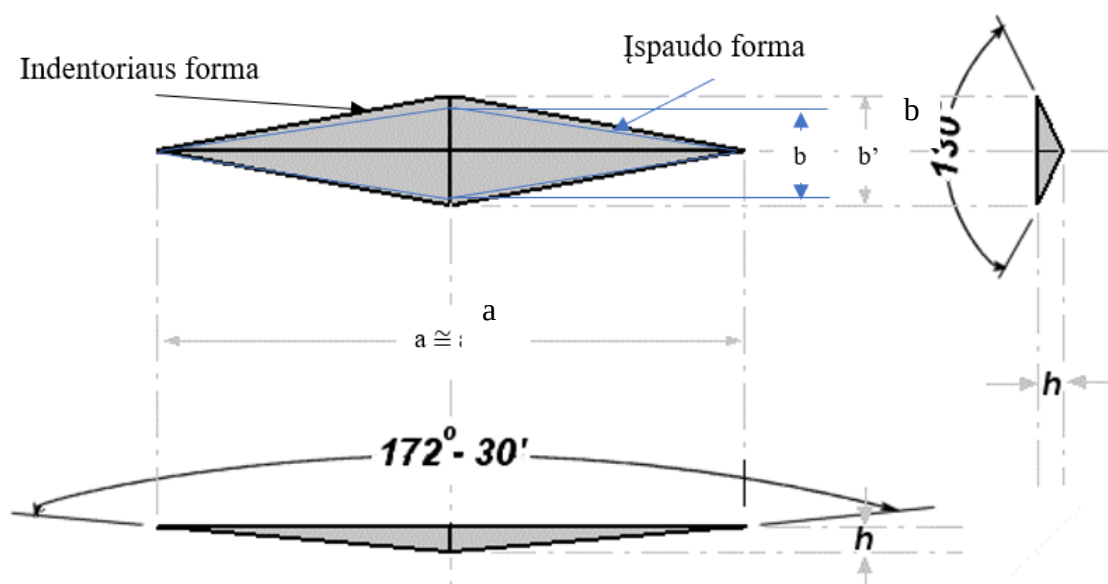
8 pav. Universalus automatizuotas kietmatis *Zwick Roell ZH μ*

2.7 Tamprumo modulio nustatymas

Atlikus lazeriu legiruotų sluoksnių mikrokietumo matavimus, fizikinėms lazeriu legiruotų sluoksnių savybėms įvertinti buvo atlikti tamprumo modulio skaičiavimai taikant mokslininkų B. R. Lawn ir V. R. Howes sukurtą tamprumo modulio nustatymo metodiką. Taip pat buvo remtasi mokslininkų R.S. Lima, S.E. Kruger, G. Lamouche, ir B.R. Marple paruošta metodika.

Šios metodikos principas yra palyginti Knopo indentoriaus deimantinės piramidės pagrindo ilgosios ir trumposios įstrižainių santykį su gautos įspaudos įstrižainių ilgių santykiu.

Knopo indentoriaus įspaudos rombo įstrižainės yra nevienodos. Jų proporcijas nulemia indentoriaus geometrija. Įstrižainių ilgių santykis yra $b'/a'=(1/7,11)$. Įsmeigus indentorių į paviršių, įspaudos formą atkartos indentoriaus geometriją. Panaikinus apkrovą, dėl tampriųjų deformacijų sumažėja įspaudų įstrižainių ilgiai, ilgosios įstrižainės ilgio pokytis yra labai mažas, todėl priimama, kad $a \cong a'$.



9 pav. Knopo indentoriaus įspaudos eskizas

Kietumas pagal Knopo metodą randamas pagal formulę:

$$H_K = 14229 \frac{P}{a^2}; \quad (1)$$

čia: H_K – mikrokietumas, (kg/mm^2); P – svoris, kuriuo spaudžiamas indentorius, (g); a – ilgoji įspaudos rombo įstrižainė, (μm) (Lawn ir Howes, 1981).

Tamprumo modulis E apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\frac{b}{a} \cong \frac{b}{a'} = \frac{b'}{a'} = \frac{\alpha H_K}{E}; \quad (2)$$

čia: a – ilgoji įspaudo rombo įstrižainė, (μm); a' ir b' – indentoriaus įstrižainių ilgiai, (μm); α – konstanta, $\alpha=0,45$; E – tamprumo modulis, (kg/mm^2) (Lawn ir Howes, 1981).

Siekiant apskaičiuoti lazeriu legiruotų sluoksnių tamprumo modulį atlikti Knopo metodo bandymo metu padarytų įspaudų įstrižainių a ir b matavimai.

Apskaičiuoti tiriamojo įspaudo tamprumo moduliai lazeriu legiruotame bandinio sluoksnyje.

$$E_T = 0,45 \cdot \frac{H_K}{(1/7,11) - b/a}; \quad (3)$$

čia: E_T – tamprumo modulis (kg/mm^2); H_K – Knopo metodu išmatuotas mikrokietumas (kg/mm^2);

a – horizontalioji įspaudo įstrižainė (μm); b – vertikalioji įspaudo įstrižainė (μm).

Apskaičiuotos tamprumo modulio E_T vertės konvertuojamos į vertes paskaliais (Pa), taikant formulę:

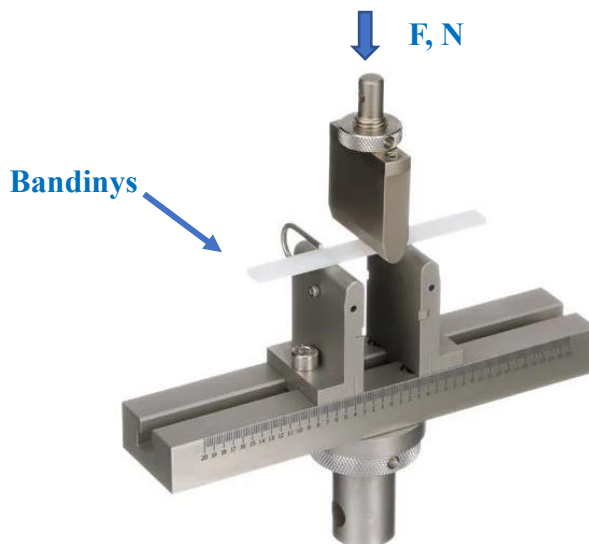
$$E = E_T \cdot 9,806; \quad (4)$$

čia: E – tamprumo modulis (Pa).

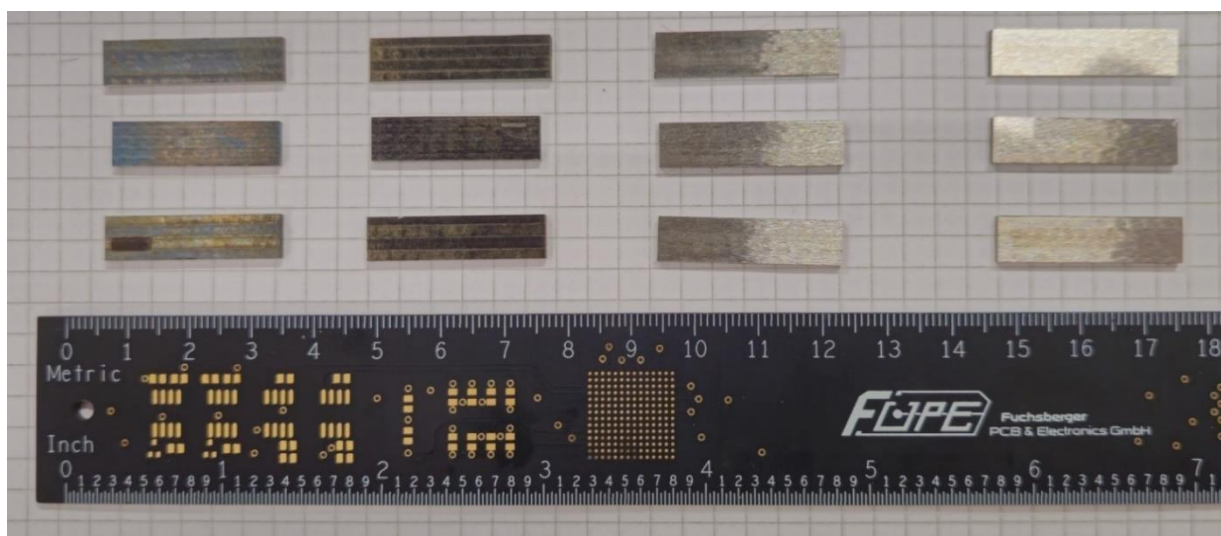
Skaiciavimai buvo atlikti su visomis Knopo mikrokietumo bandymo metu gautomis įspaudomis ir, naudojant gautas reikšmes, sudarytas įborintų sluoksnių tamprumo modulio E kitimo grafikas didėjant kietumui. Naudojant gautas E ir H_K reikšmes, taip pat buvo apskaičiuoti H/E ir H^3/E^2 kriterijų reikšmės ir sudarytos jų kitimo grafikai didėjant įborinto sluoksnio kietumui.

2.8 Lenkimo bandymų metodika

Lenkimo bandymui buvo naudojamas apkrovos matuoklis iki 2 kN. Bandyme naudotų apkrovos ir deformacijų matavimo jutiklių tikslumas $\pm 0,03\%$. Bandymai atlikti taikant pastovų deformacijos greitį nuo 1 iki 1,5 mm/s. Apkrova svyravo nuo 0 N iki 2000 N. Bandymo metu buvo matuojami įlinkiai plokštės tarpatramio viduryje. Lenkimo bandymams paruoštos 8 bandinių serijos: kontrolinė „K“ – iš SLL būdu pagamintų bandinių išpjautos plokštelės be terminio apdorojimo; kontrolinė „KTA“ – iš SLL būdu pagamintų bandinių išpjautos plokštelės, kurioms atliktas pilnas terminis apdorojimas (grūdinimas ir sendinimas); iš įborintų B1, B2, B3 bandinių išpjautos plokštelės ir tokios pat plokštelės, kurioms atliktas pakartotinis sendinimas (490 °C, 2h), siekiant atstatyti TPS kietumą – gautos serijos BS1, BS2, BS3. Visų bandinių matmenys buvo 1,5×7×30 mm. Lenkimui paruoštų bandinių bendras vaizdas pateiktas 11 pav.



10 pav. Trijų taškų lenkimo schema (Instron.com)



11 pav. Lenkimo bandymui paruoštų bandinių bendras vaizdas

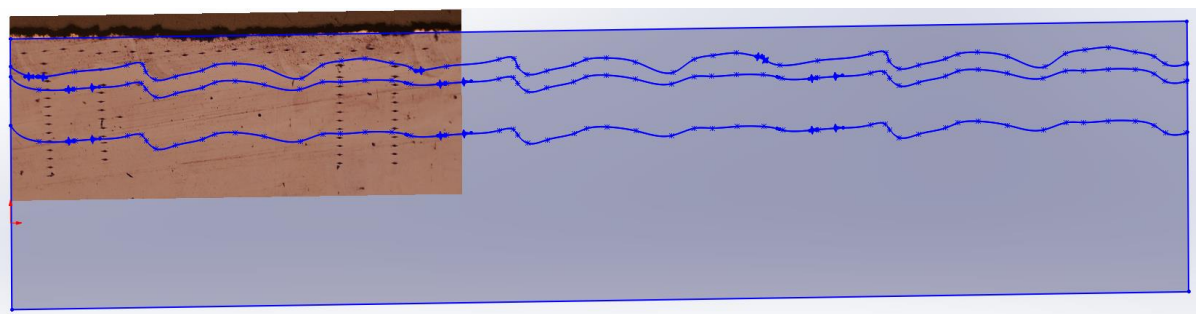
2.9 Kompiuteriniai skaičiavimai baigtinių elementų (BE) metodu

2.9.1 Modelių kūrimas kompiuteriniam skaičiavimas BE metodu

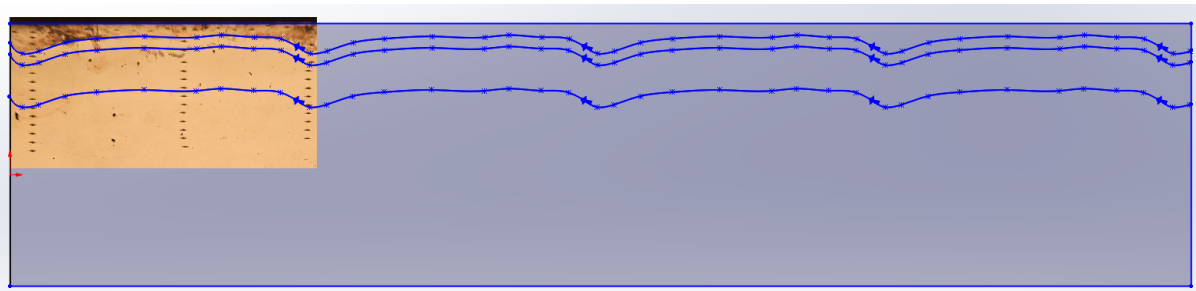
Baigtinių elementų metodas – skaitinis metodas, leidžiantis rasti apytikslius diferencialinių lygčių dalinėmis išvestinėmis ar integralinių lygčių sprendinius. Metodo esmė – sritis, kurioje ieškomas sprendimas, suskaidoma į dalis (baigtinius elementus). Tada daroma prielaida, kad kiekviename elemente nagrinėjamas nežinomas kinta nesudėtingu dėsnio ir diferencialinė lygtis jame pakeičiama į algebrinių lygčių sistemą. Sujungus visų elementų sistemas gaunama sistema, kurią išsprendus gaunamas atsakymas (Barauskas, Belevičius ir Kačianauskas, 2004).

Prieš atliekant skaitinį modeliavimą buvo sukurti B serijos bandinių modeliai bei kontrolinių bandinių modeliai naudojant SOLIDWORKS programinės įrangos paketą. Buvo

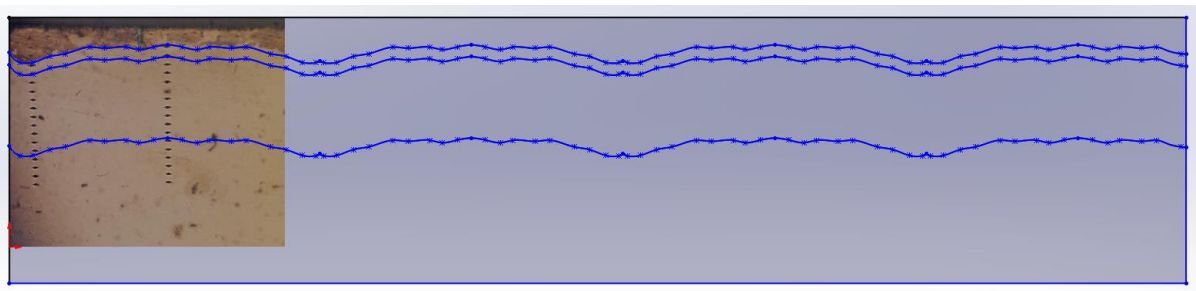
sumodeliuoti 4 skirtingi modeliai. Kontroliniai ir B serijos modeliai buvo kurti pagal tikrų bandinių, kuriems buvo atliktas trijų taškų lenkimo eksperimentas, matmenis. Įborintų bandinių sluoksniai buvo modeliuojami pagal nuotraukas gautas iš mikroskopijos tyrimo. Šie modeliai atitiko arba buvo labai artimi tikriems bandiniams pagal savo įborinto sluoksnio, terminio poveikio sričių matmenis bei pagrindinius matmenis. 13, 14, 15 pav. galima matyti visų įborintų bandinių vaizdus. Bandinių matmenys yra 1,5x7x30 mm. Įborinto sluoksnio storis bei TPS storiai gauti naudojant optinę mikroskopiją.



12 pav. B1 serijos bandinio modelio eskizas



13 pav. B2 serijos bandinio modelio eskizas



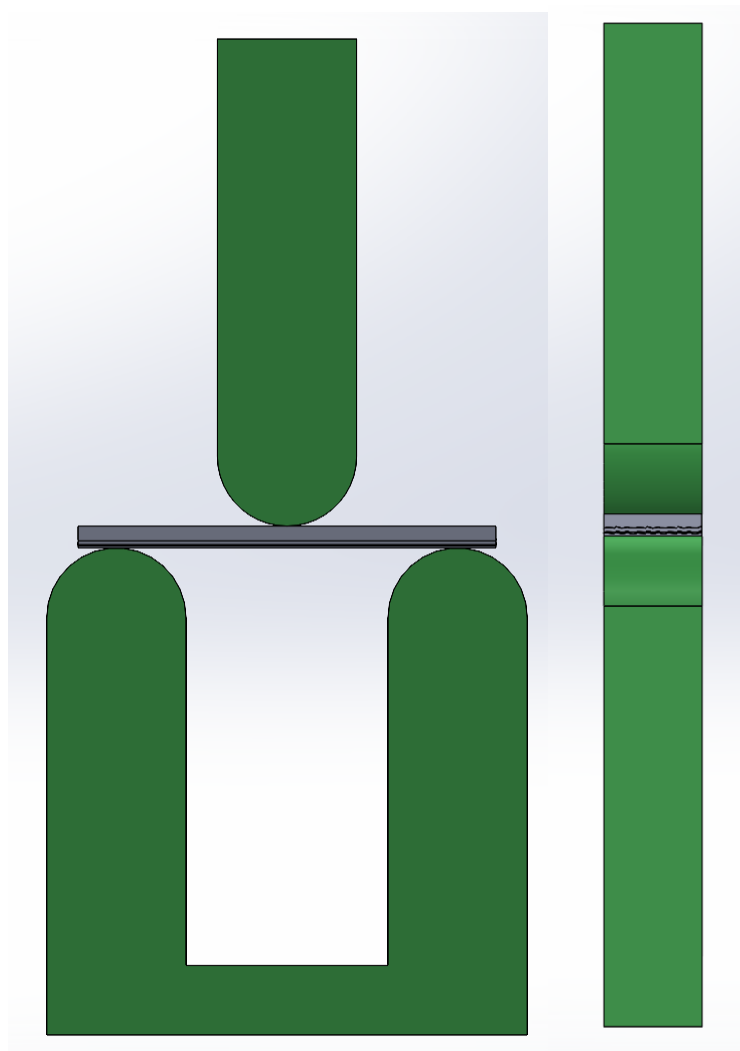
14 pav. B3 serijos bandinio modelio eskizas

B serijos bandiniams atlikus pakartotinį sendinimą jų matmenys ir struktūrą nepasikeitė, tik skyrėsi mechaninės savybės, todėl atliekant kompiuterinius skaičiavimus BS1, BS2 ir BS3 bandiniams nebuvo kuriami naujo modeliai, o tik buvo pakeistos jų mechaninės savybės.

Kontrolinių bandinių serija buvo kuriama pagal bandinius, kurie buvo paruoši lenkimo eksperimentams. Šių bandinių modelių buvo 2. Vienas po SLL gamybos be terminio apdirbimo ir kitas po SLL gamybos su terminiu apdirbimu. Bandinių matmenys nesiskyrė, todėl modeliai

kompiuteriniams skaičiavimams buvo naudojami tokie vienodi, tik skyrėsi jų mechaninės savybės. Bandinių matmenys 1,5x7x30mm.

Suprojektuoti modeliai buvo patalpinti į trijų taškų lenkimo įrenginio modelį bei išcentruoti lenkimo įrenginio modelio atžvilgiu. Šį modelį kartu su bandiniais galite matyti 15 paveiksle.



15 pav. Lenkimo įrenginio su B1 serijos bandiniu modelis

Sukūrus skirtingus modelius atitinkančius lenkimo eksperimentus modeliai buvo eksportuoti į ANSYS WORKBENCH 2023 R2 programinės įrangos paketą, kur buvo atliekami kompiuteriniai skaičiavimai

2.9.2 Kompiuteriniai skaičiavimai baigtinių elementų metodu

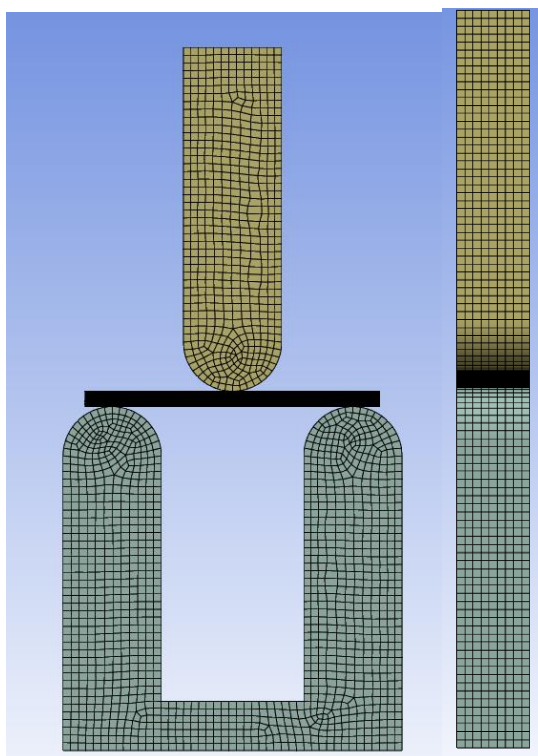
Pirmiausia, atliekant kompiuterinį skaitinį modeliavimą, programinės įrangos paketu ANSYS WORKBENCH 2023 R2, buvo sukurtos tiriamų medžiagų mechaninės savybės, kurios vėliau buvo priskirtos atitinkamai tiriamiems medeliams. TPS 1 yra po įborintų paviršiumi esantis sluoksnis. Šis sluoksnis po įborinimo yra suminkštėjęs, tačiau po

pakartotinio sendinimo atstato savo mechanines savybes. TPS 2 yra sluoksnis po TPS 1, kurį lazerio spinduliuotė paveikia ne taip stipriai ir jo mechaninės savybės yra paveikiamos mažiau. Ir žemiau jų yra pagrindinis metalas, kurio lazerio spinduliuotė visiškai nepaveikia. Puasono koeficientas visiems bandiniams buvo 0,3.

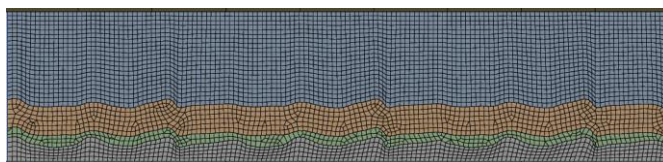
8 lentelė. Bandiniams priskirtos mechaninės savybės

Bandinio pavadinimas	Tamprumo modulis įborintam sluoksniui	Tamprumo modulis TPS 1	Tamprumo modulis TPS 2	Tamprumo modulis pagrindiniam metalui
K	-	-	-	160 GPa
KTA	-	-	-	190 GPa
B1	203 GPa	160 GPa	175 GPa	190 GPa
BS1	203 GPa	190 GPa	190 GPa	190 GPa
B2	273 GPa	160 GPa	175 GPa	190 GPa
BS2	273 GPa	190 GPa	190 GPa	190 GPa
B3	312 GPa	160 GPa	175 GPa	190 GPa
BS3	312 GPa	190 GPa	190 GPa	190 GPa

Priskyrus visiems modeliams jų mechanines savybes ir sukūrus kontaktus tarp bandinio modelio ir lenkimo įrenginio modelio, modeliai buvo sudalinti į smulkius baigtinių elementų mazgus. Dėl sudėtingų ir netaisyklingų formų modelių mazgų kiekis ir formos skyrėsi. Buvo nustatytas automatinės BE formos dėl sudėtingų bandinių modelių, kas leido programai automatiškai pritaikyti elementų formas. Elementų dydis lenkimo įrenginiui buvo parinktas programos su smulkiausia rezoliucija. Bandinių elementų dydis buvo 0,1 mm.



16 pav. Bendro modelio, suskirstyto į baigtinius elementus, bendras vaizdas iš priekio ir šono



17 pav. Bandinio, suskirstyto į baigtinius elementus, vaizdas iš šono



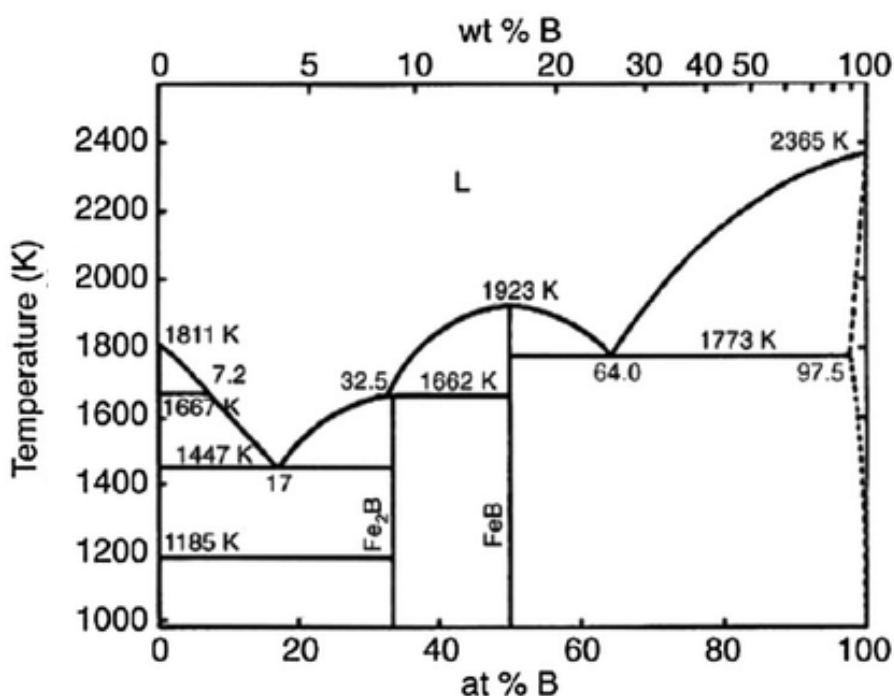
18 pav. Bandinio, suskirstyto į baigtinius elementus, vaizdas iš priekio

Galiausiai, šiuos modelius suskirsčius į baigtinius elementus buvo atlikta trijų taškų lenkimo ir tempimo simuliacijos. Rezultatuose yra pateikiama įtempių pasiskirstymas bei lenkimo ir tempimo jėgos.

3. TIRIAMOJO DARBO REZULTATAI

3.1 Mikrostruktūros tyrimo rezultatai

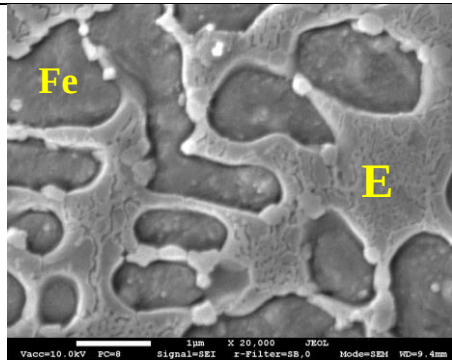
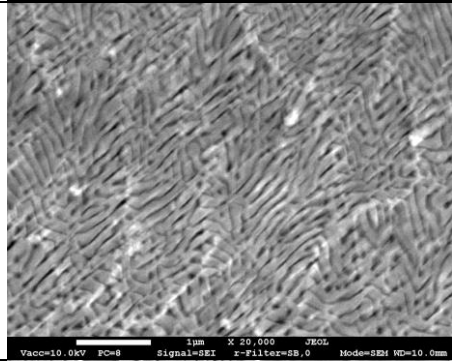
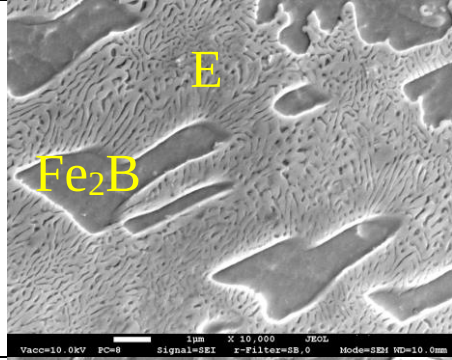
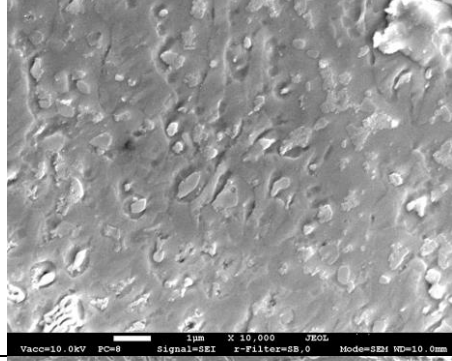
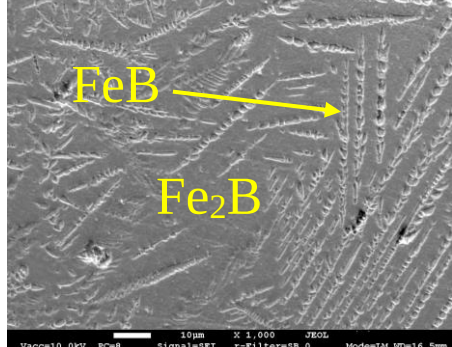
Taikant skenuojamosios elektroninės mikroskopijos metodą ištirta skirtingais režimais įborintų paviršių mikrostruktūra (tirti A serijų bandiniai). Nustatyta, kad taikant 0,03–0,45 mm boro pastos storį ir skirtingą lazerio eigos greitį, ir keičiant tokiu būdu boro pastos ir pagrindinio metalo susimaišymo santykį nuo mažiausių reikšmių (~0,1) iki didžiausių (~2,0), įborintuose sluoksniuose didėja boridinių fazių ir mikrostruktūra iš esmės kinta pagal Fe-B fazinę diagramą (19 pav.). Ištirtų struktūrų tipinės mikronuotraukos pateiktos 9 lentelėje.



19 pav. Fe-B fazinė diagrama (ASM handbook, vol. 3)

Nustatyta, kad esant mažiausiai gautai boro koncentracijai, susidarė ikieutektinė mikrostruktūra, susidedanti iš geležies pagrindo kietojo tirpalo ir boridinės eutektikos. Šios mikrostruktūros įborintų sluoksnių mikrokietumas yra nuo ~500 iki ~950 HK_{0,2}. Šiame intervale ~500 HK reikšmė atitinka struktūrą su labai mažu eutektinės fazės kiekiu. Didėjant boridinės eutektikos kiekiui struktūroje, didėja mikrokietumas. Toliau, didėjant boro koncentracijai, susidaro: boridinės eutektikos struktūra, šios mikrostruktūros kietumas yra ~950–1050 HK_{0,2}. Toliau didėjant boro koncentracijai susidaro poeutektinė struktūra (eutektika + Fe₂B tipo boridai), šios struktūros kietumas yra ~1050–1300 HK_{0,2}. Didėjant boridų koncentracijai, kietumas didėja. Toliau didėjant boro koncentracijai susidaro vien Fe₂B tipo boridų struktūra, kurios kietumas yra apie 1300 HK_{0,2}.

9 lentelė. Lazeriu įborintų sluoksnių charakteringos mikrostruktūros, didėjant boro koncentracijai

Mikrostruktūra	Apibūdinimas	Mikrokietaumas
	Ikieutektinė struktūra: Fe – geležies pagrindo kietasis tirpalas; E – boridinė eutektika	~500–950 HK0,2 sluoksniai su didesne boridinės eutektikos koncentracija turi didenį kietumą.
	Boridinė eutektika	~950–1050 HK0,2
	Poeutektinė struktūra: E – boridinė eutektika; Fe ₂ B – boridas	~1050–1300 HK0,2 Didėjant boridų koncentracijai, kietumas didėja.
	Fe ₂ B - boridas	~1300 HK0,2
	Boridų mišinio mikrostruktūra: Fe ₂ B – boridas; FeB – boridas	>1300 HK0,2 Didėjant FeB tipo boridų koncentracijai, kietumas didėja. Didžiausios nustatytos reikšmės ~1820 HK0,2

Galiausiai, dar daugiau padidinus boro koncentraciją, susidaro $\text{Fe}_2\text{B}+\text{FeB}$ tipų boridų mišinio struktūra, kurios kietumas yra daugiau nei 1300 HK0,2. Didėjant FeB tipo boridų koncentracijai, kietumas didėja. Didžiausios nustatytos reikšmės ~1820 HK0,2.

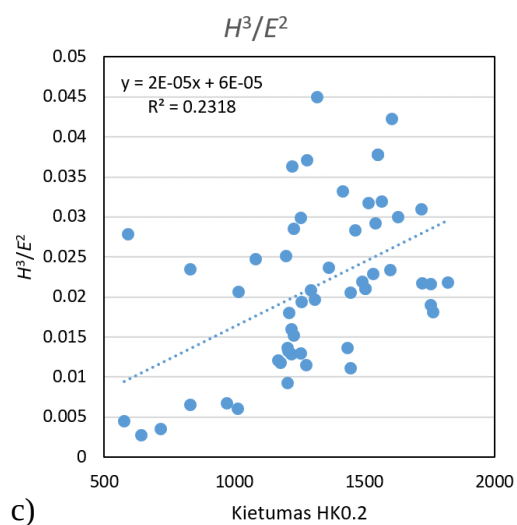
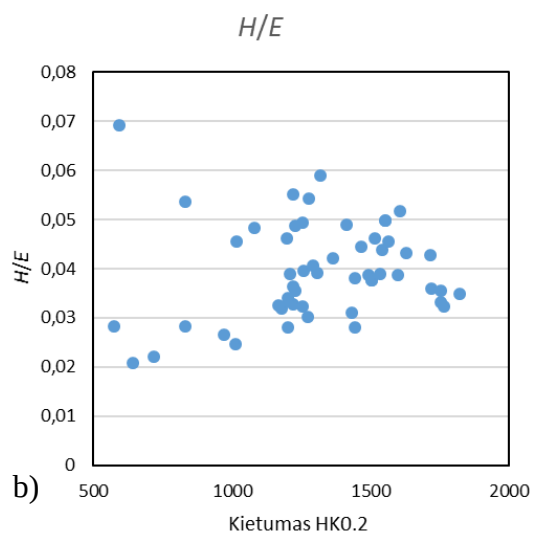
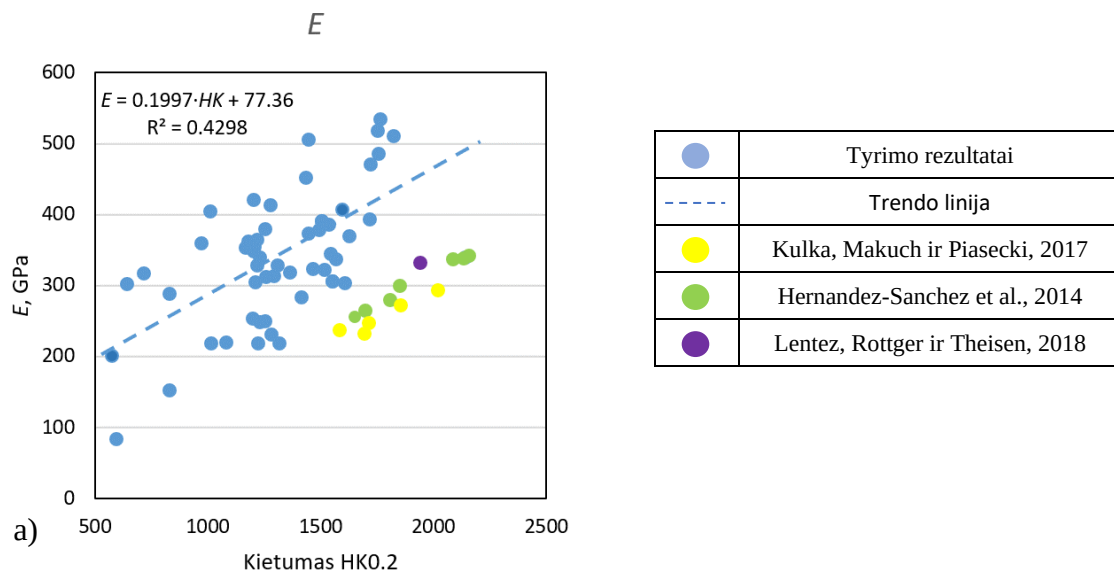
3.2 Plastiškumo kriterijų nustatymas

Optimizuojant dangų struktūrą ir formavimo parametrus, buvo tirti H/E ir H^3/E^2 kriterijai (čia H – kietumas, E – tamprumo modulis), siekiant įvertinti ir/arba palyginti dangų plastiškumą (arba atsparumą trūkinėjimui) (H/E) ir atsparumą plastinei deformacijai dilimo metu (H^3/E^2), atitinkamai. Siekiant įvertinti skirtingo kietumo lazeriu įborintų sluoksnių polinkį trūkinėjimui ir atsparumą plastinei deformacijai dilimo metu, buvo nustatytas tamprumo modulis ir apskaičiuoti H/E ir H^3/E^2 plastiškumo kriterijai. Apskaičiuotų parametų (E , H/E , H^3/E^2) priklausomybės nuo įborinto sluoksnio kietumo pateiktos 20 pav. Tiriant įborintus sluoksnius su kietumu nuo ~500 iki ~1820 HK0,2, nustatytos tamprumo reikšmės buvo intervale nuo 84 iki 535 GPa. Iš pateiktos 20 pav. (a) priklausomybės galima matyti, kad gautas pakankamai didelis E reikšmių išsibarstymas. Tačiau rezultatai parodė pakankamai išreikštą tendenciją: didėjant lazeriu įborintų sluoksnių kietumui, jų tamprumo modulis taip pat didėja (20 pav., a). Taip pat palyginus gautus rezultatus su literatūroje pateikiamais rezultatais, galima matyti tokią pačią tendenciją – didėjant kietumui didėja tamprumo modulis. Lyginant literatūroje pateiktas įvairių boridų fazių tamprumo modulio reikšmes su eksperimentinių tyrimų rezultatai gautomis reikšmėmis, matome, kad tyrimo rezultatuose gautos tamprumo modulio reikšmės yra didesnės nei tyrimo metu nustatytos reikšmės.

Didėjant kietumui, H^3/E^2 reikšmės rodo tendenciją didėti (20 pav., c), t. y. taikant didesnio kietumo įborintus paviršius, galima laukti mažesnės paviršiaus plastinės deformacijos dilimo metu, o tai teigiamai veiktų bendrą atsparumą dilimui. Tuo tarpu, visos apskaičiuotos H/E kriterijaus reikšmės buvo intervale nuo 0,02 iki 0,07 (20 pav., b). Literatūroje nurodoma, kad kieta danga turės didelį irimo tąsumą (gebą priešintis įtrūkių susidarymui), jei jos H/E bus $> 0,1$. Šiame tyrime visos nustatytos reikšmės buvo reikšmingai mažesnės negu 0,1, parodant, kad visi gauti įborinti sluoksniai pasižymi nepakankamu irimo tąsumu.

Tiriant pagrindinį metalą terminio poveikio srityje ir toliau nuo paviršiaus, kur medžiaga termiškai nebuvo paveikta, buvo nustatytos tamprumo modulio reikšmės nuo ~180 GPa iki ~680 GPa, vyraujant mažesnėms reikšmės suminkštintoje TPS zonoje ir didesnėms reikšmėms – pagrindiniame nepaveiktame metale. Bendrai, galima pažymėti, kad metodas duoda didesnes tamprumo modulio reikšmes, palyginus su šaltiniuose nurodomomis

reikšmėmis 18% Ni martensitiniam sendinamam plienui, pagamintam SLL būdu (~160 GPa be terminio apdorojimo; ~190 GPa po terminio apdorojimo).



20 pav. Įborintų sluoksnių, turinčių skirtingą kietumą, tamprumo modulis E ir H/E bei H^3/E^2 kriterijai

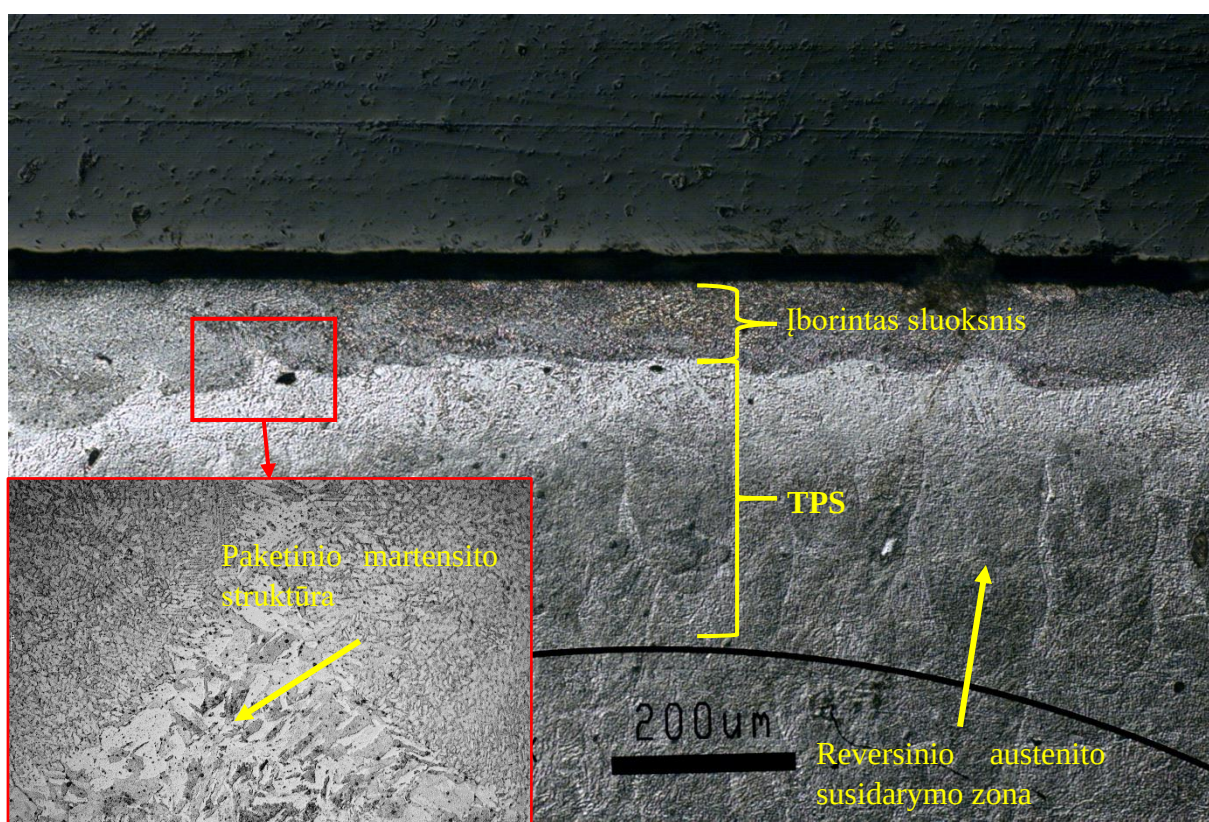
Šiais tyrimais buvo siekiama nustatyti, ar didėjant įborintame sluoksnyje boridų koncentracijai, yra tam tikra kietumo reikšmė, pasiekus kurią vyksta šuoliškas paviršiaus trapumo padidėjimas. Tokios kietumo reikšmės nustatymas leistų apibrėžti racionalų didžiausią įborintų sluoksnių kietumą, kurio tikslinga siekti optimizuojant lazerinio įborinimo technologijos parametrus. Rezultatai leido nustatyti pakankamai išreikštą tamprumo modulio didėjimo tendenciją su kietumu ir parodė, kad tamprumo modulio nustatymas Knopo įspaudimo metodu šio tipo medžiagai duoda reikšmingą rezultatų išsibarstymą ir gali būti taikomas tik palyginamajai analizei. Tikslesniam E reikšmių nustatymui reikėtų ieškoti kitų metodų. Taip pat, kadangi šiame tyrime visos nustatytos H/E reikšmės buvo gerokai mažesnės nei 0,1, galima teigti, kad visi gauti įborinti sluoksniai pasižymi nepakankamu irimo tūsumu, net tie, kurių kietumas nėra ypatingai didelis. T. y., šiuo atveju, tarp H/E reikšmių ir įborintų sluoksnių fazinės sudėties (boridų kiekio) nėra išreikštos priklausomybės. Tai parodo, kad gali būti kitas veiksnys, nulemiantis žemą H/E reikšmių lygį. Tokia priežastimi gali būti liekamieji tempimo įtempiai, kurie yra būdingi apdorojant metalinių medžiagų paviršius juos lokaliai kaitinant ir lydant. Atitinkamai, yra tikslinga toliau tobulinant lazerinio įborinimo technologiją, siekti liekamųjų įtempių mažinimo. Tai gali būti pasiekta optimizuojant lazerinio apdorojimo parametrus – pvz. derinant pakaitinimą su įvedamos šilumos mažinimu (pvz., mažinant taikomą galios tankį ir lazerio eigos greitį).

3. 3 Mikrokietumo ir TPS tyrimų rezultatai

Taikant esdinimą Marble esdikliu (10g CuSO_4 , 50ml HCl , 50ml H_2O), ištirta lazerių įborintų bandinių terminio poveikio sritis (TPS). Nustatyta, kad po lazerinio įborinimo pagrindiniame metale šalia įborinto sluoksnio susidaro TPS, susidedanti iš dviejų zonų – minkšto paketinio martensito zonos, esančios prie pat įborinto sluoksnio, ir toliau esančios zonos, kurioje susidaro reversinis austenitas, kuris taip pat sumažina martensitinio sendinamo plieno (po terminio apdorojimo) kietumą.

Martensitiniai sendinami plienai įgauna savybes po specifinio terminio apdorojimo, kuris apima grūdinimą ir sendinimą. Grūdinimui, 18 % Ni martensitiniai sendinami plienai yra atkaitinami virš 730 °C temperatūros (paprastai ~820–830 °C), kad susidarytų pilnai austenitinė sandara ir būtų užtikrinta, kad visi legiravimo elementų atomai tolygiai pasiskirstytų geležies kietajame tirpale ir visi po gamybos susidarę įtempiai pasinaikintų. MS plienuose beveik nėra anglies (<0,03 mas. % C), taip užtikrinant, kad legiravimo elementai, dalyvaujantys toliau intermetalidų formavime, nebūtų surišti į karbidus. Aušinant tokį plieną iš austenitinės sandaros, austenitas transformuojasi į mažaanglį geležies-nikelio martensitą, kuris turi kūbinę

centruoto tūrio (KCT) kristalinę gardelę, kurioje skirtingai nuo anglies turinčio martensito, nepasireiškia tetragonališkumo apraiškų. Susidaro paketinis (juostinis, masyvus) martensitas, kuris turi feritinių juostų, atskirtų mažakampėmis ribomis, struktūrą. Šio tipo martensitas yra palyginus minkštas (apie 30 HRC). MS plienai sustiprėja sendinimo metu – kai, kaitinant juos virš $\sim 400\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje, gana minkštoje martensito matricoje susidaro intermetalidai, pagrindinis iš kurių yra Ni_3Mo . Jei taip termiškai apdorotą plieną pakaitinti virš austenizacijos temperatūros ($730\text{ }^{\circ}\text{C}$) ir ataušinti, vėl susidarys paketinis martensitas. Taip ir įvyksta TPS prie pat įborinto sluoksnio. Jei pakaitinimo temperatūra yra tarp ~ 450 ir $730\text{ }^{\circ}\text{C}$, Ni_3Mo intermetalidas virsta Fe_2Mo , o nikelis pereina į geležies matricą, formuojantis stabiliam (reversiniam) austenitui. Minkštas austenitas mažina plieno kietumą ir stiprumą. Taip įvyksta TPS zonoje šiek tiek toliau nuo įborinto sluoksnio.

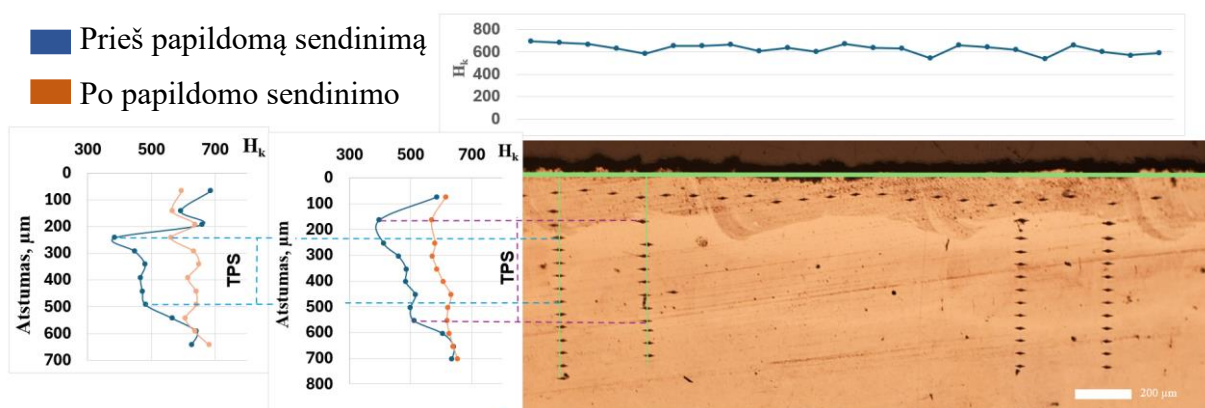


21 pav. Įborinto bandinio sandara skerspjūvyje

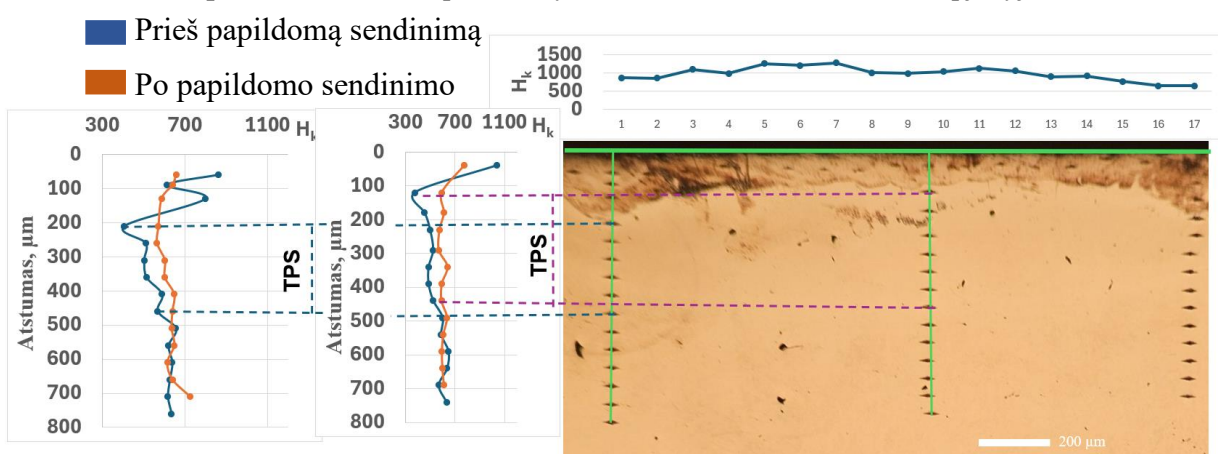
3.4 Įborintų bandinių kietumo analizė

Eksperimentiniams lenkimo bandymams buvo pagamintos 3 įborintų bandinių serijos – B1, B2 ir B3 su skirtingu įborinto sluoksnio kietumu. Siekiant įvertinti įborinto paviršiaus sluoksnio ir susidariusios TPS ypatumus, B serijų bandiniams atliktas mikrokietumo pasiskirstymo tyrimas (Knopo metodas, 100 g, 15 s). Nustatyta, kad B1 serijos įborinto sluoksnio storis $145\text{--}200\text{ }\mu\text{m}$ ir kietumas $550\text{--}700\text{ HK0.1}$ (22 pav.). B2 – įborinto sluoksnio

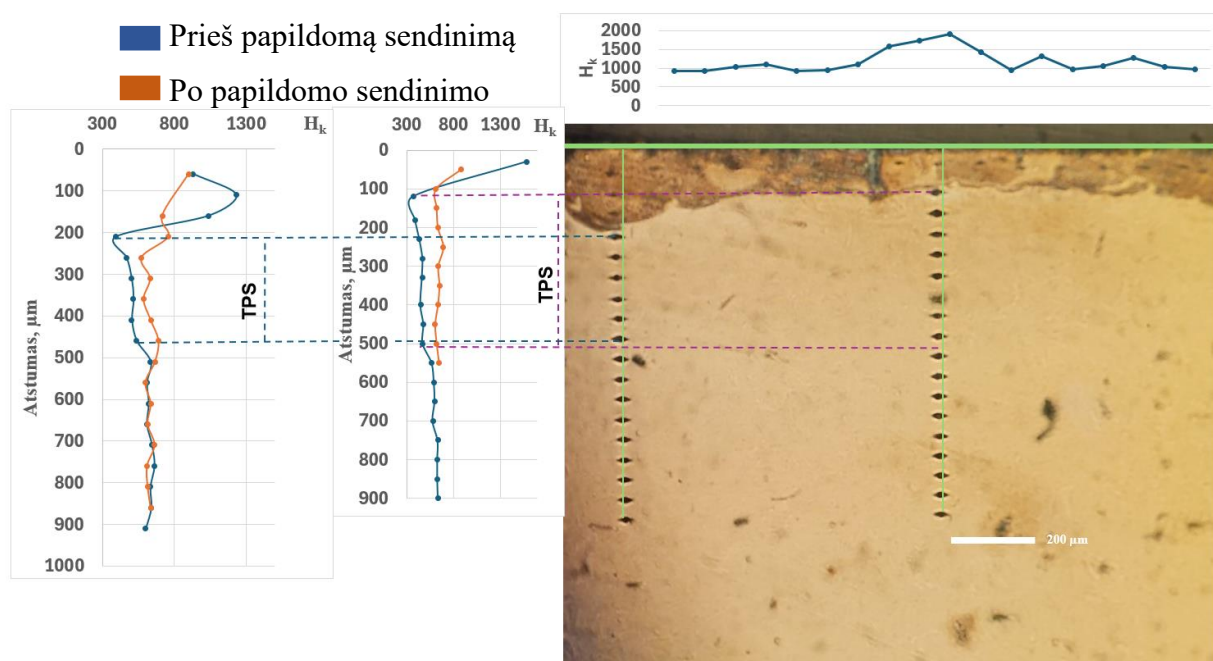
storis 90–200 μm ir kietumas 650–1280 HK0.1 (pav. 23). B3 – įborinto sluoksnio storis 80–180 μm ir kietumas 915–1580 HK0.1 (pav. 24).



22 pav. Mikroketumo pasiskirstymas BS1 įborinto bandinio skerspjūvyje



23 pav. Mikroketumo pasiskirstymas BS2 įborinto bandinio skerspjūvyje



24 pav. Mikroketumo pasiskirstymas BS3 įborinto bandinio skerspjūvyje

Galima matyti, kad visais atvejais susidarė TPS, kurios kietumas labiausiai suminkštėjusioje zonoje prie pat įborinto sluoksnio, kur susidaro pakotinio martensito struktūra, yra ~370–410 HK0.1. Tolstant gilyn nuo paviršiaus, kur susidaro reversinis austenitas, kietumas laipsniškai didėja kol pasiekia pagrindinio metalo kietumą (~600 HK).

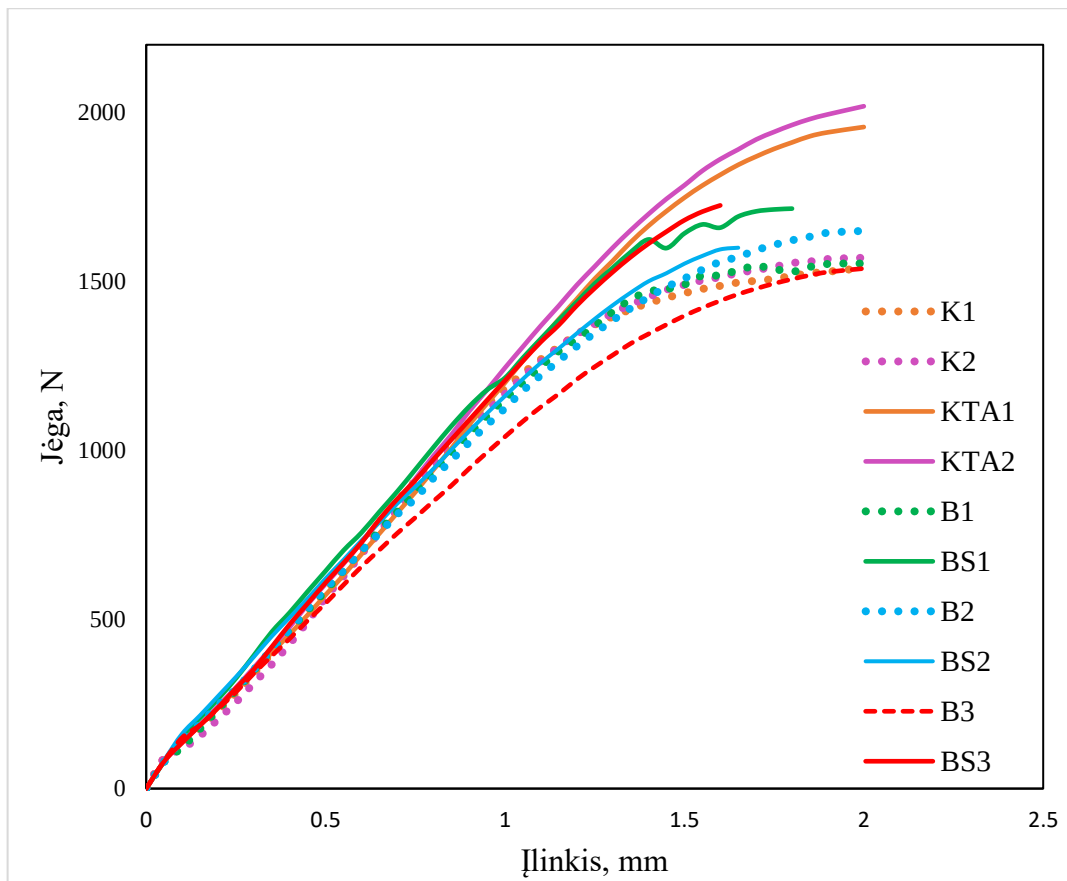
Taip pat eksperimentiniams lenkimo bandymams buvo pagamintos 3 įborintų bandinių serijos – BS1, BS2 ir BS3, kurios gautos pritaikius „B“ serijos bandiniams pakartotinį sendinimą. Siekiant įvertinti pakartotinio sendinimo poveikį TPS kietumui, „BS“ serijų bandiniams atliktas mikrokietumo pasiskirstymo tyrimas (Knopo metodas, 100 g, 15 s). Nustatyta, kad TPS kietumas po pakartotinio sendinimo atsistatė iki pagrindinio metalo kietumo (~600 HK0.1) (pav. 22–24).

3.3 Lenkimo bandymų rezultatai

Siekiant išryškinti galimą įborinto sluoksnio ir TPS poveikį, mechaniniams bandymams paruošti ploni bandiniai, kuriuose įborintas sluoksnis sudarė reikšmingą dalį nuo viso bandinio storio: B1 serijai – 10–13 %; B2 – 6–13 %; B3 – 5–12 %. Kartu su TPS tai sudaro: B1 serijai – ~37–40 % nuo viso bandinio storio; B2 – ~30 %; B3 – 47–50 %. Lenkimo metu bandiniai buvo orientuoti taip, kad įborintas sluoksnis būtų tempimo srityje. Iš viso tirta 12 bandinių. K serijos vieno bandymo ir KTA serijos vieno bandymo rezultatai buvo atmesti, kadangi jų rezultatai labai skyrėsi nuo kitų bandymų rezultatų serijoje. K serijos bandiniai – tai po SLL gamybos gauti bandiniai. KTA serijos bandiniai – tai po SLL gamybos gauti bandiniai, kuriems buvo atliktas pilnas terminis apdorojimas. B serijos bandiniai – tai SLL gaminiai su pilnu terminiu apdorojimu bei įborintu sluoksniu. BS serijos bandiniai – tai SLL būdu pagaminti bandiniai su pilnu terminiu apdorojimu, įborintu sluoksniu bei pakartotiniu sendinimu.

Bandinių serijos:	Santrumpos:
K: SLL	SLL: Selektyvusis lazerinis lydymas
KTA: SLL → TA	TA: Terminis Apdorojimas
B: SLL → TA → LĮ	LĮ: Lazerinis Įborinimas
BS: SLL → TA → LĮ → S	S: Sendinimas

25 pav. Bandinių serijos ir santrumpos



26 pav. Tirtų bandinių eksperimentinės lenkimo kreivės

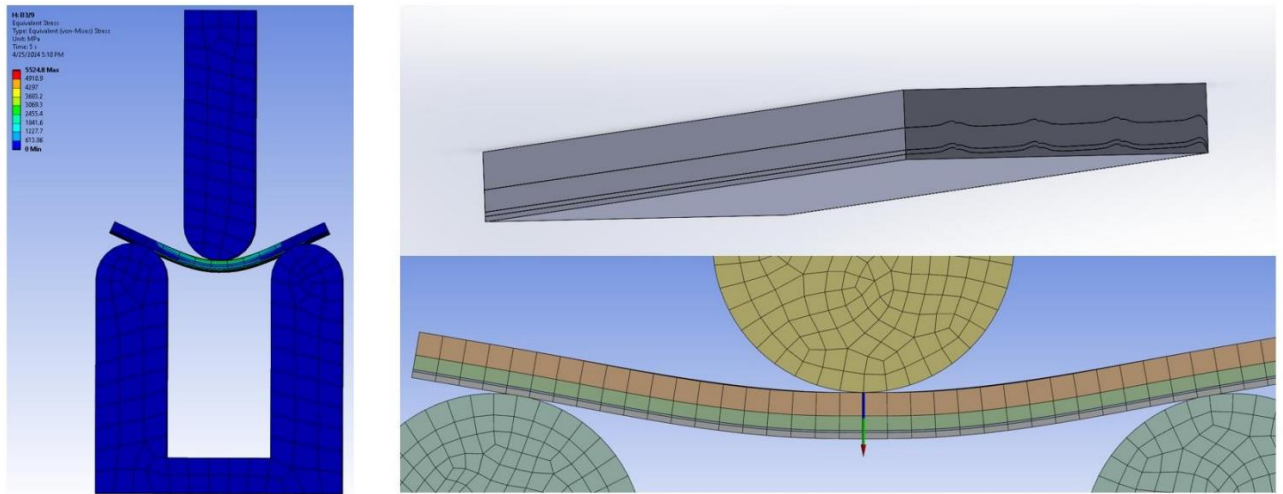
Atlikus lenkimo bandymus, gautos pridėtos jėgos ir atitinkamų įlinkių kreivės, kurios pateiktos 26 pav. Iš pateiktų lenkimo kreivių matyti, kad didžiausios įlinkio jėgos nustatytos kontroliniams bandiniams po pilno terminio apdorojimo (serijos KTA1 ir KTA2). Įborintų bandinių kreivės (B1, B2, B3) išsidėstė žemesnių jėgų srityje, parodant, kad po įborinimo, bandinių atsparumas lenkimui sumažėja. Toje pačioje srityje yra ir kontrolinių bandinių be terminio apdorojimo (K1 ir K2) kreivės. Visos įborintų bandinių po pakartotinio sendinimo (BS1, BS2, BS3) kreivės pasislinko į didesnių jėgų sritį, parodant, kad TPS atstatymas turi teigiamo poveikio bandinių atsparumui lenkimui. Tačiau kreivės nepasiekė kontrolinių bandinių lygio (KTA), tai leidžia teigti, kad pats įborintas sluoksnis mažina atsparumą lenkimui.

3.5 Kompiuterinės analizės rezultatai

3.5.1 Lenkiamųjų bandinių su skirtingais įborintais ir susilpnintais sluoksniais modelių sudarymas ir įtempių pasiskirstymo analizė (ANSYS).

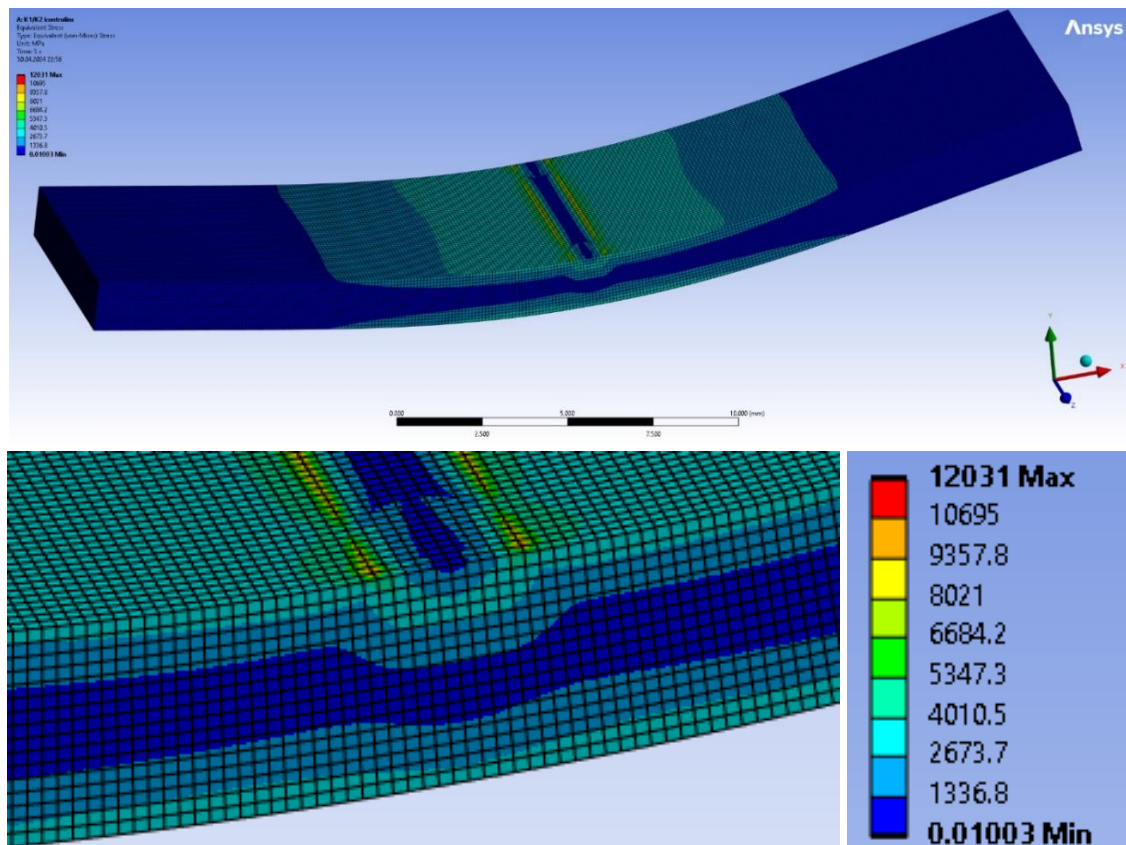
Tiriant bandinių įtemptą būvį lenkimo metu kompiuterinio modeliavimo įrankiais ir taikant baigtinių elementų (BE) metodą, buvo sukurti pačių bandinių modeliai, identiški

realiems B1, B2 ir B3 serijų bandiniams, bei tiksliai atkartotos lenkimo stende realizuotos lenkimo sąlygos (27 pav.).



27 pav. Lenkimo simuliacijai BE metodu sukurto modelio ir bandinio modelio bendras vaizdas

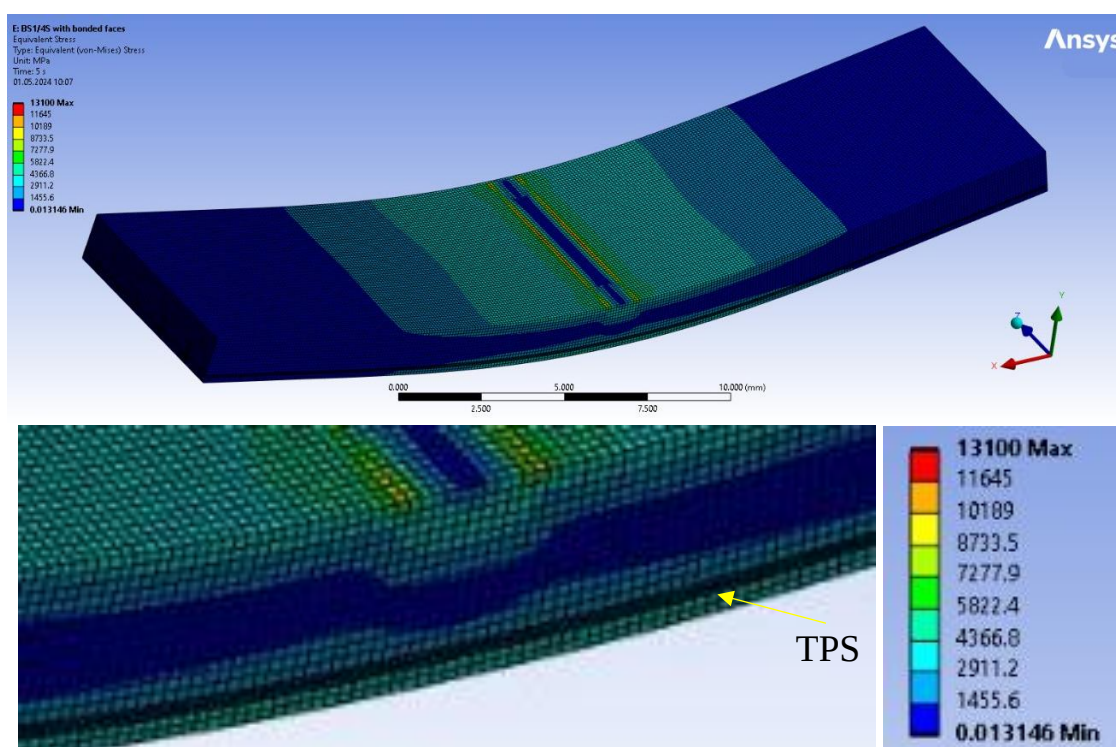
Tiriant įtempių pasiskirstymą įtemptoje bandinių būsenoje lenkimo atveju, nustatyta, kad lenkiant kontrolinį bandinį, įtempiai jo skerspjūvyje pasiskirsto pagal tipinę lenkimui būdingą įtempių pasiskirstymo epiūrą: centrinėje bandinio dalyje, ties neutralia linija, įtempiai artimi nuliui, išoriniuose sluoksniuose, labiausiai nutolusiuose nuo neutralios linijos, įtempiai yra didžiausi (28 pav.).



28 pav. Įtempių pasiskirstymas lenkimo metu kontroliniame termiškai apdorotame bandinyje

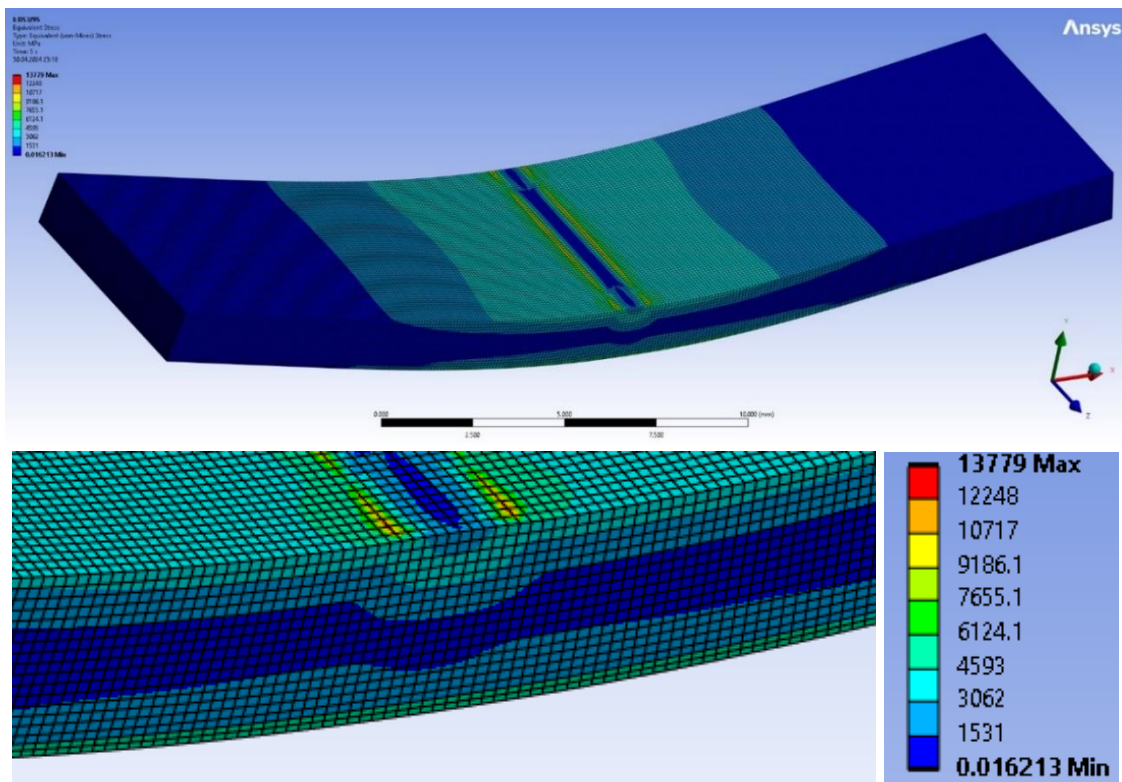
Įtempių pasiskirstymas lenkimo metu įborintuose bandiniuose be pakartotinio sendinimo ir su juo parodytas 29 ir 30 pav. Galima matyti, kad esant parodytai bandinių orientacijai, kai atskirų įborinimo takelių kryptis sutampa su įtempių kryptimi tempimo zonoje, ypatingos įtempių koncentracijos, kurios galima būtų laukti kietų ir minkštų sluoksnių kontakto zonoje, nėra.

Įtempių pasiskirstymas lenkimo metu įborintame bandinyje, kuriam nebuvo atliktas pakartotinis sendinimas ir TPS yra suminkštėjusi, parodytas 29 pav. Galima matyti, kad nors TPS išsidėsčiusi tempimo zonoje, įtempiai joje yra minimalūs, t. y. TPS, turinti žemas mechanines charakteristikas, beveik neperima įtempių. Tai paaiškina įborintų bandinių atsparumo lenkimui sumažėjimą. Turėdama mažesnę tamprumo modulį, TPS galėtų lengviau deformuotis lenkimo metu, tačiau standesnis įborintas sluoksnis riboja deformaciją ir įlinkį ir didesnę apkrova atitenka jam.



29 pav. Įtempių pasiskirstymas lenkimo metu įborintame bandinyje be pakartotinio sendinimo

Įtempių pasiskirstymas lenkimo metu įborintame bandinyje po pakartotinio sendinimo, kai TPS savybės buvo atstatytos ir yra sulyginamos su nepaveikto pagrindinio metalo po pilno terminio apdorojimo, parodytas 30 pav. Galima matyti, kad atstačius TPS savybes, įtempiai tolygiau pasiskirsto visame skerspjūvyje ir TPS dalyvauja perimant dalį įtempių ir prisideda prie viso bandinio standumo padidėjimo. Tai paaiškina, kodėl po pakartotinio sendinimo įborintų bandinių atsparumas lenkimui padidėjo.



30 pav. Įtempių pasiskirstymas lenkimo metu įborintame bandinyje po pakartotinio sendinimo

Visais lenkimo simuliacijos etapais – pradžioje, viduryje ir pabaigoje, gauti rezultatai rodo tolygią tendenciją (10 lentelė). B3 ir BS3 bandiniai turi didžiausią atsparumą lenkimui visais simuliacijos etapais. O mažiausią atsparumą lenkimui turi B1 bandinys visais lenkimo simuliacijos etapais.

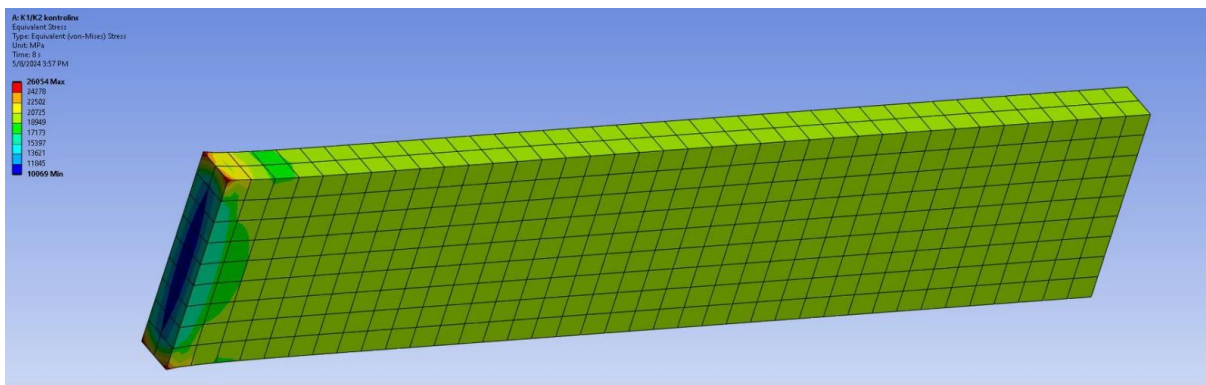
10 lentelė. Kompiuterinės analizės rezultatai – reikalinga jėga (N) norint pasiekti tam tikrą įlinkį (mm)

Įlinkis, mm	K1	K2	KTA1	KTA2	B1	BS1	B2	BS2	B3	BS3
0,3	370	370	402	390	354	394	369	410	414	457
0,6	771	771	838	818	738	821	771	855	863	954
0,9	1202	1202	1306	1281	1149	1280	1201	1336	1344	1485
1,2	1658	1658	1803	1778	1585	1767	1657	1851	1854	2049
1,5	2138	2138	2324	2298	2043	2279	2135	2378	2390	2640

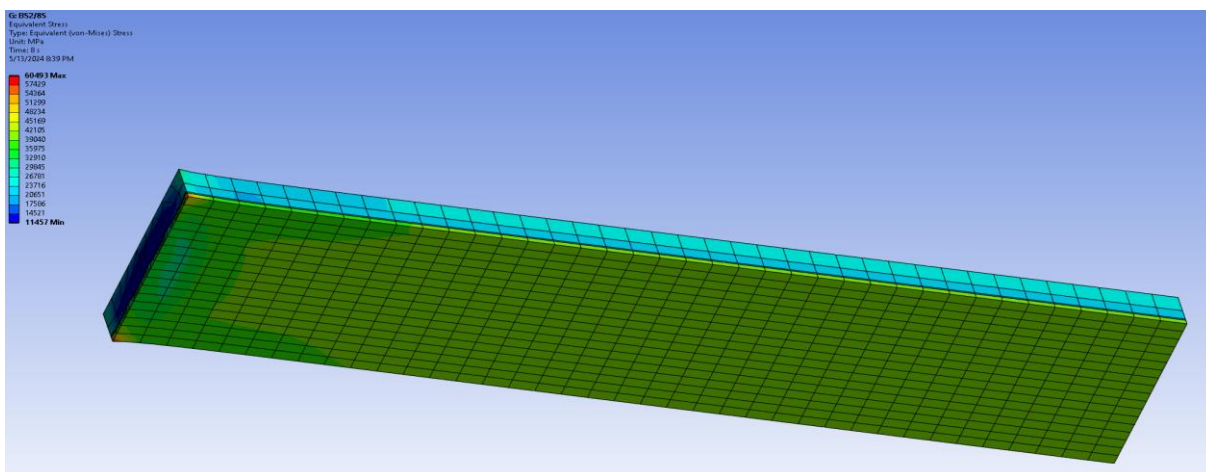
3.5.2 Tempiamųjų bandinių su skirtingais įborintais ir susilpnintais sluoksniais modelių sudarymas ir įtempių pasiskirstymo analizė (ANSYS).

Bandinių tempimo simuliacija parodė, kad kontroliniuose bandiniuose įtempiai pasiskirsto tolygiai visame skerspjūvyje (31 pav.). Įborintuose bandiniuose nustatytas žemesnis bendras įtempių lygis pagrindiniame metale, tačiau įborintame sluoksnyje nustatyti didesni įtempiai (32 pav.), tai sietina su didesniu įborinto sluoksnio standumu. Tokiu būdu,

mechaniškai apkraunant įborintą gaminį, įborintame sluoksnyje susidarys didesni įtempiai ir gaminio atsparumas pradiniam etape bus kontroliuojamas įborinto sluoksnio geba priešintis įtrūkių susidarymui. Esant įborintame sluoksnyje defektams, galima laukti spartesnio įtrūkių susidarymo ir gaminio mechaninio atsparumo sumažėjimo, apkraunant gaminį tempimą sukeliančiomis apkrovomis.



31 pav. Įtempių pasiskirstymas tempimo metu kontroliniame bandinyje



32 pav. Įtempių pasiskirstymas lenkimo metu įborintame bandinyje po pakartotinio sendinimo

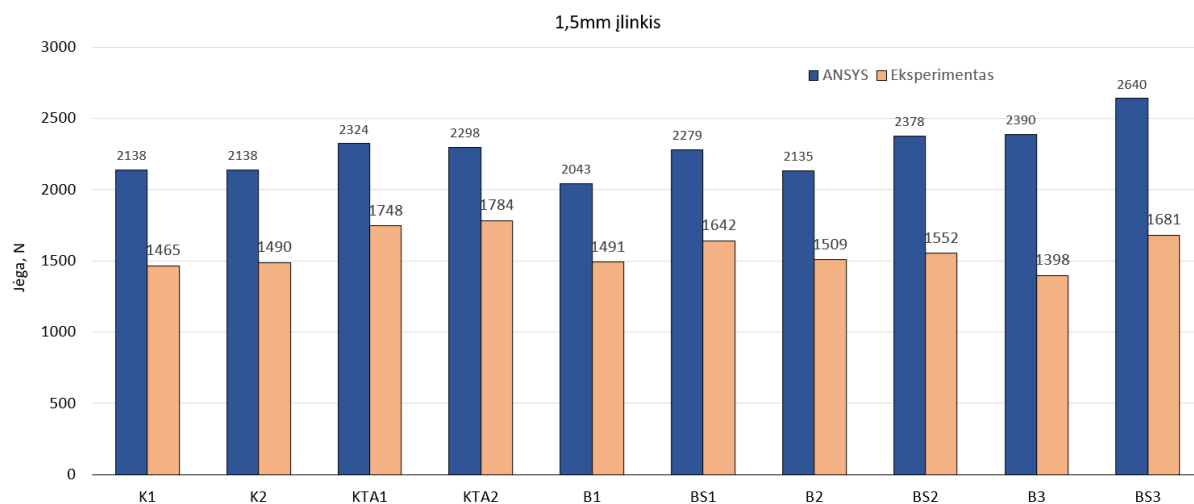
11 lentelėje galima matyti reikalingą jėgą norint pasiekti tempiamų bandinių 1,5 mm poslinkį. Šios jėgos parodo bandinių atsparumą tempimui. Išskirtinai didesnes jėgas reikia naudoti KTA2 ir BS3 bandiniams. Mažesnių apkrovų reikia kontroliniams bandiniams po SLL gamybos bei įborintiems bandiniams be pakartotinio sendinimo. Kompiuterinės analizės metu matoma, kad BS3 bandinys turi didžiausią atsparumą tempimui. Šis bandinys turi 4 % didesnę atsparumą tempimui negu kontroliniai bandiniai po terminio apdirbimo. BS3 bandiniui reikalinga jėga 1,5 mm poslinkiui pasiekti yra 96 353 N, o KTA2, kuriam reikalinga didžiausia jėga 1,5 mm poslinkiui pasiekti iš KTA serijos bandinių, reikalinga 92 617 N apkrova.

11 lentelė. Reikalinga jėga (N) norint pasiekti 1,5 mm poslinkį tempiant bandinį

Bandinys	Jėga (N)	Poslinkis (mm)
K1	83 099	1,5
K2	83 099	1,5
KTA1	89 246	1,5
KTA2	92 617	1,5
B1	75 685	1,5
BS1	87 776	1,5
B2	79 606	1,5
BS2	89 873	1,5
B3	82 059	1,5
BS3	96 353	1,5

3.6 Teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas

Siekiant geriau suprasti lazerinio įborinimo poveikį viso bandinio mechaniniam atsparumui, taip pat buvo atlikta eksperimentinių bandymų ir kompiuterinės analizės rezultatų palyginamoji analizė. Jėgų, kurių prirėikė, kad lenkiant tirtus bandinius būtų pasiektas 1,5 mm įlinkis, reikšmės, nustatytos eksperimentu ir kompiuteriniu modeliavimu, pateiktos 33 pav.

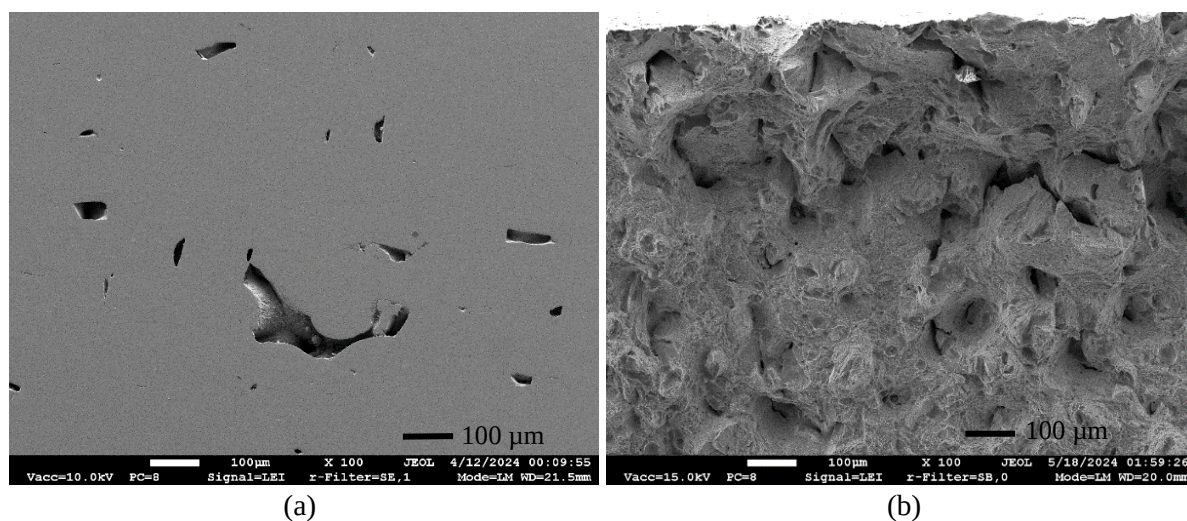


33 pav. Jėga, kurios prirėikė, kad lenkiant tirtus bandinius būtų pasiektas 1,5 mm įlinkis

Eksperimentinių bandymų rezultatai rodo, kad po terminio apdorojimo MS plieno SLL būdu pagamintų bandinių (serijos KTA) atsparumas lenkimui (vertinant pagal lenkimo jėgą) padidėjo 19–20 % palyginus su bandiniais be terminio apdorojimo (K1 ir K2). Po lazerinio įborinimo bandinių (B1, B2, B3) atsparumas lenkimui sumažėjo ~14–22 % (palyginus su KTA serijomis), o pritaikius įborintiems bandiniams pakartotinį sendinimą, atsparumas lenkimui padidėjo ~3–20 % (palyginus su B1–B3 serijomis), t. y., atstačius TPS kietumą pakartotiniu

sendinimu, atsparumas lenkimui atstatytas iki ~96 % nuo pradinio SLL gaminio po terminio apdorojimo.

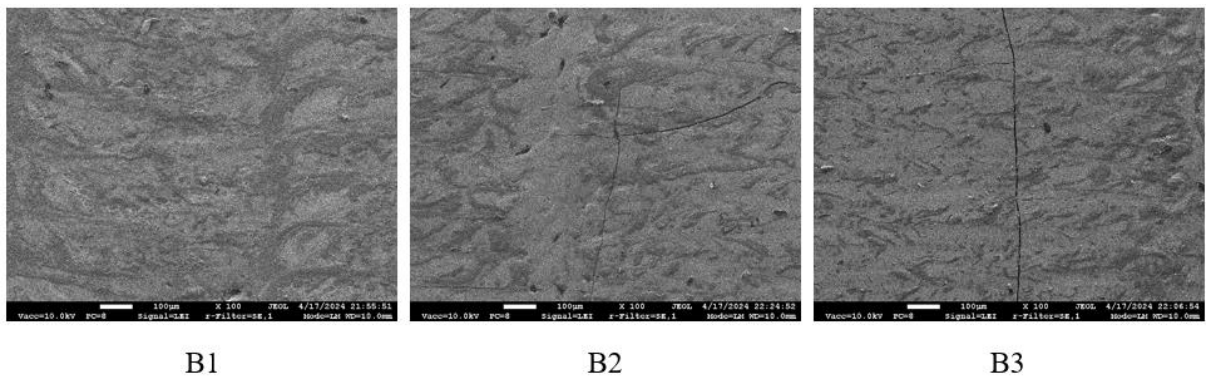
Iš pateiktų rezultatų matyti, kad lenkimo jėgos, gautos kompiuterinės simuliacijos būdu, yra didesnės negu gautos kompiuteriniu modeliavimu. Kontroliniams bandiniams skirtumas tarp eksperimentinių ir modeliavimo reikšmių sudarė ~29–46 %. Ieškant tokio skirtumo priežasties, buvo atliktas papildomas kontrolinių bandinių mikroskopinis tyrimas. Nustatyta, kad SLL būdu pagaminti pradiniai bandiniai, iš kurių buvo pagaminti visi bandiniai šio darbo tyrimams, pasižymi reikšmingu liekamuoju akytumu, kuris gali susidaryti, kai SLL proceso metu sulydomame tūryje lieka ne iki galo sulydyti lazeriu mikrotūriai (34 pav., a). Nesulydytos zonos ir liekamas akytumas matomi taip pat ir kontrolinio bandinio lūžio mikronuotraukoje (34 pav., b). Toks akytumas ne tik sumažina realų bandinio skerspjūvį, bet gali sukelti įtempių koncentracijos židinius ir papildomai sumažinti bandinių mechaninį atsparumą. Dėl netaisyklingos tuštumų formos ir išdėstymo tūryje, bandinio BE modelio su tokiu akytumu sudarymas labai sudėtingas. Kitas veiksnys, kuris gali lemti mechaninio atsparumo sumažėjimą, tai liekamieji įtempiai, kurie susidaro visame SLL proceso metu sulydomame tūryje. Liekamųjų įtempių SLL gaminiuose problematika yra pabrėžiama ir nagrinėjama mokslinėje literatūroje (Casati et al. 2016).



34 pav. Liekamas akytumas kontroliniame bandinyje dėl SLL proceso ypatumų (a) ir kontrolinio bandinio lūžis po lenkimo bandymo (b)

Lyginant eksperimentines ir modeliavimo rezultatus, galima matyti taip pat, kad išlaikoma analogiška lenkimo jėgos reikšmių kitimo tendencija po kontrolinių bandinių terminio apdorojimo ir po įborintų bandinių pakartotinio sendinimo: termiškai apdorotų kontrolinių bandinių jėgos ~7–9 % didesnės, palyginus su neapdorotais; po sendinimo, įborintų bandinių atsparumas lenkimui padidėjo ~10–12 %. Nagrinėjant įborintų bandinių lenkimo

modeliavimo rezultatus, nustatyta, kad $\sim 11\text{--}12\%$ ir $\sim 7\text{--}8\%$ sumažėjimą palyginus su KTA serija parodė įborinti bandiniai su mažesniu įborinto sluoksnio kietumu B1 ir B2, atitinkamai. B3 serijai (su didžiausiu įborinto sluoksnio kietumu ir E) nustatyta $\sim 3\text{--}4\%$ lenkimo jėgos padidėjimas. O sumodeliuoti įborinti bandiniai su atstatyta TPS parodė iki 14% didesnę atsparumą lenkimui palyginus su kontroliniais bandiniais. Atsižvelgiant į tai, kad eksperimentiniai bandymai vienareikšmiškai parodė bandinių atsparumo lenkimui sumažėjimą net pritaikius pakartotinį sendinimą, galima teigti, kad modeliavimas neįvertino tam tikrų ypatumų, susijusių būtent su įborintais sluoksniais.



35 pav. Įborintų bandinių paviršius

Prie tokių ypatumų galima priskirti žemą įborintų sluoksnių atsparumą įtrūkių susidarymui, kuris buvo patvirtintas pirmame tyrimų etape. Taip pat, atlikus papildomą įborintų paviršių mikroskopinį tyrimą (SEM), buvo nustatyta, kad didesnio kietumo bandiniuose B2 ir B3 jau po lazerinio įborinimo proceso susidarė įtrūkiai (35 pav.), kurie nebuvo įvertinti tirtuose modeliuose.

Tokiu būdu, kompiuterinis modeliavimas parodė, kad kieti įborinti sluoksniai su pakankamai aukštu irimo tūsumu ir neturintys pradinių defektų, turėtų teigiamo poveikio įborintų gaminių mechaniniams atsparumui, didinant lenkiamų gaminių stiprumą ir standumą.

IŠVADOS

1. Atlikus literatūros analizę galima teigti, kad martensitiniai sendinami (MS) plienai dėl savo sudėties ir savybių tinka gamybai AG metodais, tokiais kaip selektyvusis lazerinis lydymas, o lazerinis legiravimas boru galėtų tapti efektyvia alternatyva tradiciniams MS plienų paviršiaus termocheminio apdorojimo metodams, jeigu pavyktų optimizuoti legiravimo proceso parametrus.
2. Atsparumas plastinei deformacijai (H^3/E^2) didėja, didėjant įborinto sluoksnio kietumui. Taikant didesnio kietumo įborintus paviršius, galima laukti mažesnės paviršiaus plastinės deformacijos dilimo metu, o tai teigiamai veiktų bendrą atsparumą dilimui. Tuo tarpu, visos apskaičiuotos H/E kriterijaus reikšmės buvo intervale nuo 0,02 iki 0,07. Nepriklausomai nuo kietumo, gauti lazeriu įborinti sluoksniai turi nepakankamą irimo tįsumą ($H/E < 0,1$), kas gali neigiamai veikti jų elgseną eksploatacijos metu. Tikslinga tęsti lazerinio įborinimo technologijos tyrimus, siekiant optimizuoti lazerinio apdorojimo parametrus ir pagerinti gaunamų sluoksnių atsparumą trūkinėjimui.
3. Atlikus įborintiems bandiniams pakartotinį sendinimą, po kurio buvo atstatytos TPS savybės, atsparumas lenkimui padidėjo iki 21 %. Tačiau net ir po sendinimo įborintų bandinių atsparumas lenkimui yra apie 7–9 % mažesnis negu kontrolinių bandinių po terminio apdorojimo. Taip yra dėl to, kad pagrindinio plieno mechaninės savybės yra labai aukštos, o įborintas paviršius, nors kietesnis, bet kitomis savybėmis, ir visų pirma tįsumu, yra prastesnis. Taikant gaminiams lazerinį įborinimą, reikia atsižvelgti į tai, kad atsparumas lenkimui pablogėja, tam turi poveikio ir suminkštėjusi TPS.
4. Kompiuterinio modeliavimo rezultatai rodo, kad įborinti sluoksniai su aukštu irimo tįsumu ir neturintys pradinių defektų, turėtų ne tik pagerintas atsparumo dilimui savybes, bet galėtų padidinti viso gaminio mechaninį atsparumą lenkimui bei tempimui.

Padarius šias išvadas, galima teigti, kad MS plienų lazerinis paviršiaus legiravimas yra tinkama paviršiaus apdorojimo technologija, kuri pagerina plieno atsparumą abrazyviniu dilimui, tačiau reiktų toliau tobulinti šį metodą, tirti lazerinio legiravimo parametrų parinkimą. Parinkus tinkamus parametrus ir išvengus įtrūkių susidarymo dangoje, būtų galima gauti dangas, kurios ne tik pagerina atsparumą abrazyviniam dilimui, bet ir pagerina viso gaminio mechanines savybes.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Barauskas, R., Belevičius, R., & Kačianauskas, R. (2004). *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Technika.
2. Beake, B. D. (2022). The influence of the H/E ratio on wear resistance of coating systems—Insights from small-scale testing. *Surface and coatings technology*, 442, 128272. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128272>
3. Casati, R., Lemke, J. N., Tuissi, A., & Vedani, M. (2016). Aging Behaviour and Mechanical Performance of 18-Ni 300 Steel Processed by Selective Laser Melting. *Metals, Volume 6*. <https://doi.org/10.3390/met6090218>
4. Chen, S., Cong, Z., Wang, Z., Chen, J., Cui, T., Liang, J., & Wang, M. (2024). Effect of nano-SiC on microstructure evolution and enhanced high wear resistance mechanism of laser surface alloyed M42 high-speed steel. *Tribology International*, 194, 109559.
5. European Powder Metallurgy Association. (2015). Introduction to additive manufacturing technology, a guide for designers and engineers. *European Powder Metallurgy Association: Chantilly, France*.
6. Funch, C. V., Christiansen, T. L., & Somers, M. A. (2022). Gaseous nitriding of additively manufactured maraging steel; nitriding kinetics and microstructure evolution. *Surface and Coatings Technology*, 432, 128055. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128055>
7. Gan, X., Fei, G., Wang, J., Wang, Z., Lavorgna, M., & Xia, H. (2020). Powder quality and electrical conductivity of selective laser sintered polymer composite components. In *Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components* (pp. 149-185). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819535-2.00006-5>
8. gordonengland.co.uk.(n.d.) *Hardness. Microhardness.* <https://www.gordonengland.co.uk/hardness/microhardness.htm>
9. Hearn, E. J. (1997). Chapter 10: Contact stress, residual stress and stress concentrations. *Mechanics of materials*, 2, 381-442. <https://doi.org/10.1016/B978-075063266-9/50011-1>
10. Hernandez-Sanchez, E., Domínguez-Galicia, Y. M., Orozco-Álvarez, C., Carrera-Espinoza, R., Herrera-Hernández, H., & Velázquez, J. C. (2014). A study on the effect of the boron potential on the mechanical properties of the borided layers obtained by boron diffusion at the surface of AISI 316L steel. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/249174>

11. Huang, W., Cheng, X., Huang, X., Qin, S., Huang, L., Lin, Y., & Chen, G. (2024). Microstructure and mechanical properties of Ti modified 7075 aluminum alloy fabricated by selective laser melting. *Materials Today Communications*, 109079.
12. Hussain, A., Akhter, R., Farooq, W. A., & Aslam, M. (2010). Laser surface alloying of Ni-Co electroplated low carbon steel. *Key Engineering Materials*, 442, 137-143. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.442.137>
13. Illinois Tool Works Inc. <https://www.instron.com/en/products/testing-accessories/flexure-fixtures/three-point-bend-test-fixtures>
14. Jeyapragash, N., Yang, C. H., & Kumar, D. R. (2020). Laser surface modification of materials. *Practical Applications of Laser Ablation*, 61-81.
15. Juodelis, V., Benediktas, J., Valiulis, A. V., (2004). *Metalotyros pagrindai*. Technika.
16. K. Bučelis (2024). *Lazerinio įborinimo poveikis martensitinio sendinamo plieno paviršiaus sluoksnio struktūrai ir savybėms*. [Daktaro disertacija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas]. Lietuvos akademinė elektroninė biblioteka. <https://etalpykla.vilniustech.lt/handle/123456789/154192>
17. Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J. (2011). Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel. *Physics Procedia*, 12, 255-263.
18. Kulka, M., Makuch, N., & Piasecki, A. (2017). Nanomechanical characterization and fracture toughness of FeB and Fe₂B iron borides produced by gas boriding of Armco iron. *Surface and Coatings Technology*, 325, 515-532. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.07.020>
19. Kumar, A., & Li, D. Y. (2022). Can the H/E ratio be generalized as an index for the wear resistance of materials?. *Materials Chemistry and Physics*, 275, 125245. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125245>
20. Lawn, B. R., Howes, V. R. 1981. Elastic recovery at hardness indentations. *Journal of Materials Science* 16: 2745–2752. <https://doi.org/10.1007/BF00552957>
21. Lawrence, J. R. (Ed.). (2017). *Advances in laser materials processing: technology, research and applications*. Woodhead Publishing.
22. Lekurwale, S., Karanwad, T., & Banerjee, S. (2022). Selective laser sintering (SLS) of 3D printlets using a 3D printer comprised of IR/red-diode laser. *Annals of 3D Printed Medicine*, 6, 100054. <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2022.100054>

23. Lentz, J., Röttger, A., & Theisen, W. (2018). Hardness and modulus of Fe₂B, Fe₃ (C, B), and Fe₂₃ (C, B) 6 borides and carboborides in the Fe-CB system. *Materials Characterization*, 135, 192-202. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.11.012>
24. Lin, G. W., Chen, T. C., Hsu, H. H., & Tsay, L. W. (2024). Synergetic effects of micro-shot peening and gas nitriding on the fatigue performance of AISI 4140 steel. *Surface and Coatings Technology*, 130856. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130856>
25. Marshall, D. B., Noma, T., & Evans, A. G. (1982). A simple method for determining elastic-modulus-to-hardness ratios using Knoop indentation measurements. *Journal of the American Ceramic Society*, 65(10), c175-c176. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1982.tb10357.x>
26. Martinez-Hernández, A., Méndez-Albores, A., Arciga-Durna, E., Flores, J. G., Pérez-Bueno, J., Meas, Y., Trejo, G. 2018. Effect of heat treatment on the hardness and wear resistance of electrodeposited Co-B alloy coatings. *Journal of Materials Research and Technology* 450: 960–968. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.007>
27. Mattox D. M. 2010. Chapter 1 – Introduction. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing* (Second Edition): 1–24. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2037-5.00001-0>
28. Meredith, N., Sherriff, M., Setchell, D. J., & Swanson, S. A. V. (1996). Measurement of the microhardness and Young's modulus of human enamel and dentine using an indentation technique. *Archives of Oral Biology*, 41(6), 539-545. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0884>
29. Munir, K. S., Li, Y., & Wen, C. (2017). Metallic scaffolds manufactured by selective laser melting for biomedical applications. In *Metallic Foam Bone* (pp. 1-23). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101289-5.00001-9>
30. Munir, K., Biesiekierski, A., Wen, C., & Li, Y. (2020). Selective laser melting in biomedical manufacturing. *Metallic biomaterials processing and medical device manufacturing*, 235-269. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102965-7.00007-2>
31. Nagarajan, B., Hu, Z., Song, X., Zhai, W., & Wei, J. (2019). Development of micro selective laser melting: the state of the art and future perspectives. *Engineering*, 5(4), 702–720. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.002>
32. Peng, T., Dai, M., Cai, W., Wei, W., Wei, K., & Hu, J. (2019). The enhancement effect of salt bath preoxidation on salt bath nitriding for AISI 1045 steel. *Applied Surface Science*, 484, 610–615. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.134>

33. P Prashanth, K. G. (2020). Selective laser melting: materials and applications. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(1), 13. <https://doi.org/10.3390/jmmp4010013>
34. PROTOLABS Ltd <https://www.protolabs.co.uk/materials/comparison-guide/?category=metal>
35. Quinn, G. D., & Bradt, R. C. (2007). On the Vickers indentation fracture toughness test. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(3), 673–680. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01482.x>
36. Ratna, D. (2022). Chapter 2—Properties and processing of thermoset resin. *Recent Advances and Applications of Thermoset Resins*, 2nd ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 173-292. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85664-5.00003-X>
37. Schaaf, P., Kaspar, J., & Höche, D. (2014). Laser Gas–Assisted Nitriding of Ti Alloys. *Comprehensive Materials Processing*, Volume 9. 261-278. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00912-2>
38. Sciti, D., Silvestroni, L., Celotti, G., Melandri, C., & Guicciardi, S. (2008). Sintering and mechanical properties of ZrB₂–TaSi₂ and HfB₂–TaSi₂ ceramic composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(10), 3285-3291. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02593.x>
39. Selg, H., Meka, S. R., Kachel, M., Schacherl, R. E., Waldenmaier, T., & Mittemeijer, E. J. (2013). Nitriding behaviour of maraging steel: experiments and modelling. *Journal of Materials Science*, 48, 4321-4335. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7248-2>
40. Sokeng, I. T., Ngom, B. D., Cummings, F., Kotsedi, L., Msimanga, M., Maaza, M., & Van Zyl, R. R. (2015). Proton-induced nanorod melting in a coating obtained from the pulsed laser ablation of W₂B₅/B₄C. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 344, 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.12.021>
41. Somers, M. A. (2015). Development of the compound layer during nitriding and nitrocarburising of iron and iron-carbon alloys. In *Thermochemical Surface Engineering of Steels* (pp. 341-372). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096524.3.341>
42. Suryawanshi, J., Prashanth, K. G., & Ramamurty, U. (2017). Tensile, fracture, and fatigue crack growth properties of a 3D printed maraging steel through selective laser melting. *Journal of alloys and compounds*, 725, 355-364.

43. Škamat, J., Bučelis, K., & Černašėjus, O. (2022). Laser boronizing of additively manufactured 18Ni-300 maraging steel part surface. *Materials*, 15(13), 4631. <https://doi.org/10.3390/ma15134631>
44. Škamat, J.; Bučelis, K.; Černašėjus, O.; Indrišiūnas, S. Fiber Laser Alloying of Additively Manufactured 18Ni-300 Maraging Steel Part Surface: Effect of Processing Parameters on the Formation of Alloyed Surface Layer and Its Properties. *Materials* 2023, 16, 4732. <https://doi.org/10.3390/ma16134732>
45. Tan, C., Zhou, K., Ma, W., Zhang, P., Liu, M., & Kuang, T. (2017). Microstructural evolution, nanoprecipitation behavior and mechanical properties of selective laser melted high-performance grade 300 maraging steel. *Materials & Design*, 134, 23-34.
46. Tekin, T., Ischia, G., Naclerio, F., Ipek, R., & Molinari, A. (2023). Effect of a direct aging heat treatment on the microstructure and the tensile properties of a 18Ni-300 maraging steel produced by Laser Powder Bed Fusion. *Materials Science and Engineering: A*, 872, 144921. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144921>
47. Vadgama, P. (2005). *Surfaces and interfaces for biomaterials*. CRC Press.
48. Valiulis, A. V. (2007). *Legiruotieji plienai ir jų suvirinimas*. Technika.
49. Vishwakarma, J., Chattopadhyay, K., & Srinivas, N. S. (2020). Effect of build orientation on microstructure and tensile behaviour of selectively laser melted M300 maraging steel. *Materials Science and Engineering: A*, 798, 140130. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140130>
50. Wei, F., Zhang, W., Zhang, C., Tian, Y., Wu, S., Chen, H., & Dong, C. (2022). High Ratio of Hardness and Elastic Modulus (H/E) Studied by the Nanoindentation Technique of Acetaminophen with Corrugated Slip Planes. *Crystal Growth & Design*, 22(5), 2880-2888.
51. Winter, K. M., Kalucki, J., & Koshel, D. (2015). Process technologies for thermochemical surface engineering. In *Thermochemical surface engineering of steels* (pp. 141-206). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096524.1.141>
52. Wu, Y. Q., & Yan, M. F. (2011). Plasticity characterization of the modified layer produced by plasma nitrocarburizing of nanocrystallized 18Ni maraging steel. *Vacuum*, 86(2), 119-123. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2011.04.021>
53. Wu, W., Wang, X., Wang, Q., Liu, J., Zhang, Y., Hua, T., & Jiang, P. (2020). Microstructure and mechanical properties of maraging 18Ni-300 steel obtained by

- powder bed based selective laser melting process. *Rapid Prototyping Journal*, 26(8), 1379-1387. <https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2018-0189>
54. Zadeh, J. M., Yeganeh, M., Zaree, S. R. A., & Khorasanian, M. (2024). Microstructure and Corrosion Behavior of Ti-10Cu Fabricated by Selective Laser Melting. *Materials Today Communications*, 109103. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109559>
55. Zhang, J., Fan, J., Yang, D., Peng, Y., & Wang, K. (2024). The fracture toughness and fatigue crack growth properties of 18Ni 300 maraging steel manufactured by wire+ arc additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 892, 145993. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145993>