VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Konstantin BOBYLIOV

LIEJIMO TUŠTUMŲ ĮTAKA STIPRIOJO KETAUS DAUGIACIKLIAM STIPRUMUI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T)

Vilnius, 2008

Disertacija rengta 2004–2008 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Darbo mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Mindaugas Kazimieras Leonavičius (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

http://leidykla.vgtu.lt
VGTU leidyklos TECHNIKA 1535-M mokslo literatūros knyga

ISBN ?

© Bobyliov, K. 2008
© VGTU leidykla TECHNIKA, 2008

Reziumė

Liejimo tuštumos dažnai aptinkamos liejant kalnakasybos ir transporto įrenginių didelių matmenų detales iš stipriojo ketaus. Disertacijoje nagrinėjama tokių tuštumų įtaka konstrukcinių elementų stiprumui esant daugiacikliam apkrovimui.

Darbe aptariamos tuštumų atsiradimo priežastys ir tiriamas jų poveikis nuovarginio plyšio susidarymui ir plitimui, taikant tiesinės irimo mechanikos kriterijus. Siekiant visapusiškai įvertinti tuštumų sankaupos poveikį detalės cikliniam stiprumui, tiriami stipriojo ketaus su pažeistais tūriais nuovarginio irimo ypatumai. Eksperimentiniams bandymams atlikti reglamentuojami metodai pakeisti ir pritaikyti medžiagos su tuštumomis tyrimams. Pristatomas skirtingų stipriojo ketaus rūšių atsparumo pleišėjimui eksperimentinis tyrimas, atliktas esant labai mažam plyšio plitimo greičiui. Pateikiama lūžių su liejimo tuštumomis nuovarginio irimo ypatumų fraktografinė analizė.

Eksperimentų rezultatai analizuojami jų pagrindu atliktais analitiniais ir skaitiniais tyrimais. Pristatoma papildoma bandinių su tuštumomis eksperimentinių rezultatų analitinė analizė, atsižvelgiant į kintančius plyšio plitimo metu skerspjūvio geometrinius rodiklius. Analitiškai įvertinta liejimo tuštumų sankaupų įtaka įtempių intensyvumo koeficiento intervalo ir plyšio plitimo greičio priklausomybei. Defekto dydžio ir padėties įtaka įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymui necentrinio tempimo bandinyje su plyšio pavidalo defektu tiriama baigtinių elementų metodu.

Lietų konstrukcinių elementų su tuštumomis ir plyšiais sudėtinga geometrinė forma riboja žinomų analitinių įtempių intensyvumo koeficiento skaičiavimo metodų taikymą. Siūloma kompleksinė skaičiavimo metodika, skirta stambiagabaričių detalių su liejimo tuštumų sankaupa daugiaciklio stiprumo įvertinimui, ir paremta atliktais eksperimentiniais, analitiniais ir skaitiniais tyrimais.

Disertaciją sudaro bendroji darbo charakteristika, 4 skyriai, pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados, bibliografinių šaltinių sąrašas. Disertacijos tema paskelbti 5 mokslo darbai, atliktų tyrimų rezultatai buvo pristatyti 3 tarptautinėse mokslinėse konferencijose.

Abstract

The casting voids are often found in large-size castings used in mining and transport equipment parts. The influence of casting voids on spheroid graphite iron high-cycle fatigue strength is investigated in present dissertation.

Defect appearance causes are discussed; their influence on the fatigue crack propagation is being investigated using linear fracture mechanics criterion. In order to comprehensively evaluate the influence of the voids congestion on the cyclic strength of a part, the pecularities of the spheroidal graphite iron are intvestigated. Standard test method is modified and applied for material with voids testing. Different cast iron grades experimental investigation accomplished at very low crack growth rates is presented. Specimens fracture fractographic analysis shows the peculiarities of fatigue crack growth.

The experimental results are being analysed using analytical and numerical research. Additional analytical analysis for specimens with voids was fulfilled, taking into account cross-section geometrical indices which vary while crack grows. The influence of the casting voids congestion on stress intensity factor versus crack growth rate is analysed basing on cross-section geometrical indices variation during the crack propagation. Finite element method is used for stress intensity factor distribution dependency on the crack-like defect size and position in the specimen numerical investigation.

The complex geometrical shape of the casted structure element with voids and cracks limits the application of known analytical stress intensity factor calculation methods. Fatigue strength calculation method is proposed for large-size castings with voids, based on performed experimental, analytical and numerical research.

The dissertation consists of general work characteristics, 4 chapters, basic results and conclusions and References. Basing on the dissertation, 5 scientific publications were published. Performed research results were presented at 3 international scientific conferences.

Žymėjimai

Simboliai

a	plyšio ilgis
A	santykinis pailgėjimas;
A_t	skerspjūvio plotas
B	bandinio plotis
E	tamprumo modulis
ΔF	apkrovimo jėgos kitimo intervalas
G	šlyties modulis
I	skerspjūvio inercijos momentas
J	energinis integralas, skerspjūvio inercijos momentas
K	įtempių intensyvumo koeficientas
ΔK	įtempių intensyvumo koeficiento intervalas
ΔK_{th}	ribinis įtempių intensyvumo koeficiento intervalas (pleišėjimo slenkstis)
N	apkrovimų ciklų skaičius
M	lenkimo momentas
R	ciklo asimetrijos koeficientas
T	vienetinio išorinės normalės kontūrui *ds* vektoriaus dedamoji
u, v, w	poslinkis *x, y z* ašių kryptimis
W	deformacijos energija; necentrinio tempimo bandinio bazinis atstumas; skerspjūvio atsparumo momentas
ε	deformacija
σ	įtempis
σ_{th}	ribinis ciklinis įtempis
σ_{thd}	ribinis ciklinis įtempis konstrukciniame elemente su defektu
$\sigma_{0,2}$	sąlyginė takumo riba
σ_y	takumo riba
σ_u	stiprumo riba tempiant
ν	Puasono koeficientas
δ	plyšio atsivėrimas

Santrumpos

BE	Baigtiniai elementai
BEM	Baigtinių elementų metodas
SEM	Skenuojantis elektroninis mikroskopas

Turinys

Reziumė **iii**

Abstract **iv**

Žymėjimai ..... **v**

Bendroji darbo charakteristika **1**

1. Stipriojo ketaus taikymas ir daugiaciklio stiprumo problematika **7**
1.1. Stipriojo ketaus rūšys ir jų taikymas 7
1.1.1. Rūšys ir savybės 10
1.1.2. Gavyba 14
1.2. Defektų analizė 16
1.2.1. Porėtumas 18
1.2.2. Stingimo tuštumos 19
1.2.3. Porėtumo ir stingimo tuštumų įvertinimas ir išvengimas 21
1.3. Daugiaciklio apkrovimo tyrimai 22
1.4. Tiesinė irimo mechanika 25
1.5. Stipriojo ketaus ciklinio irimo proceso analizė 32
1.5.1. Mažųjų plyšių atsiradimas ir plitimas 33
1.5.2. Trumpųjų plyšių atsiradimas ir plitimas 34
1.5.3. Ilgųjų plyšių plitimas 35
1.6. Stipriojo ketaus ciklinio stiprumo skaičiavimo problematika 36
1.7. Skaičiuojamųjų metodų apžvalga 39
1.8. Apibendrinimas. Uždavinių formulavimas 41

2. Eksperimentinio tyrimo metodika **43**
2.1. Eksperimento metodika 43
2.1.1. Apkrovos parinkimas 46

2.1.2. Necentriškai tempiamų kompaktinių bandinių su tuštumomis pleišėjimo slenksčio nustatymas ... 47
2.2. Bandymų įranga ... 48
2.3. Bandinių aprašymas ... 49
2.4. Antrojo skyriaus išvados ... 50

3. Liejimo tuštumų įtakos plyšio susidarymui ir plitimui eksperimentinis tyrimas ... 51
3.1. Mikrostruktūra ir mechaninės savybės ... 51
3.1.1. Austemperizuotas ketus ... 52
3.1.2. Stiprusis perlitinis ketus ... 55
3.2. Atsparumo nuovarginio plyšio susidarymui ir plitimui eksperimentinis tyrimas ... 57
3.2.1. Austemperizuotas ketus ... 57
3.2.2. Stiprusis perlitinis ketus ... 62
3.3. Bandinių lūžių fraktografinė analizė ... 64
3.3.1. Austemperizuotas ketus ... 65
3.3.2. Stiprusis perlitinis ketus ... 72
3.4. Trečiojo skyriaus išvados ... 76

4. Plyšio pavidalo defekto įtakos analitinis ir skaitinis tyrimas ... 77
4.1. Skerspjūvio su tuštumomis geometrinių rodiklių da/dN–ΔK priklausomybei tyrimas ... 78
4.1.1. Skerspjūvio su tuštumomis geometriniai rodikliai ... 78
4.1.2. Įtempių intensyvumo koeficiento nevienalyčiuose bandiniuose analitinis tyrimas ... 82
4.2. Įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymas nevienalyčiuose bandiniuose ... 84
4.2.1. Analitinis tyrimas ... 84
4.2.2. Skaitinis tyrimas ... 86
4.2.2.1. Įtempių intensyvumo koeficiento nustatymas poslinkių metodu ... 87
4.2.2.2. Įtempių intensyvumo koeficiento nustatymas naudojant standartinę ANSYS funkciją ... 89
4.2.2.3. Įtempių intensyvumo koeficiento nustatymas *J*-integralu ... 90
4.2.2.4. Baigtinių elementų modelio aprašymas ... 91
4.2.2.5. Plyšio defekto, esančio bandinio šone, tyrimas ... 93
4.2.2.6. Plyšio defekto, esančio bandinio centre, tyrimas ... 95
4.2.2.7. Defekto padėties įtaka ... 97
4.2.2.8. Modelio patikrinimas bei skaitinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas ... 98

4.3. Konstrukcijų elementų stiprumo skaičiavimo metodikos patikslinimas 100
4.3.1. Elemento su tuštuma ciklinio stiprumo analitinis skaičiavimas 102
4.3.2. Elemento su tuštuma ciklinio stiprumo skaičiavimas naudojant BEM 104
4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados 105

Pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados 107

Literatūros sąrašas 109
Autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema 119

Priedas. Stipriojo perlitinio ketaus bandinių be tuštumų bandymų rezultatai 121

Bendroji darbo charakteristika

Tiriamoji problema. Aptikus tuštumą liejinyje, būtina įvertinti jos poveikį detalės cikliniam stiprumui. Subjektyvūs vertinimai yra nepriimtini, todėl reikalingi tokie konstrukcinio elemento tinkamumo ir leistinos apkrovos nustatymo metodai, kurie leistų tiksliau įvertinti defektinio liejinio stiprumą ir pagrįsti jį eksperimentiniais, analitiniais ir skaitiniais tyrimais. Siekiant visapusiškai įvertinti tuštumų sankaupos poveikį detalės stiprumui, reikia ištirti stipriojo ketaus su pažeistais tūriais nuovarginio irimo ypatumus. Tuštumų sankaupa – tai įvairios formos ir dydžio ertmės liejinio viduje arba paviršiuje. Nagrinėjamų darbe atskirų tuštumų bet kuris matmuo neviršija 5 mm. Būtina atsižvelgti į tai, kad ne tik ertmės, bet ir medžiagos nevienalytiškumas aplink jas įtakoja medžiagos atsparumui nuovarginio plyšio susidarymui ir plitimui.

Bandinių su tuštumomis eksperimentiniai tyrimai leistų kiekybiškai įvertinti tuštumų poveikį ciklinio stiprumo rodikliams ir ištirti nevienalytės mikrostruktūros įtaką nuovarginio plyšio plitimui. Naudojamas nuovarginio plyšio neplitimo kriterijus yra ribinis įtempių intensyvumo koeficientas (pleišėjimo slenkstis). Hiperciklio stiprumo specifika verčia nustatyti pleišėjimo slenkstį esant labai mažam plyšio plitimo greičiui ($\nu \approx 5 \cdot 10^{-12}$ m/ciklą), kai jis tampa daug jautresnis mikrostruktūros ypatumams. Eksperimentų duomenys leistų išvystyti ir patikrinti jų pagrindu atliekamus analitinius ir skaitinius tyrimus. Reikalingi papildomi tyrimai, skirti ciklinio stiprumo kiekybinių rodiklių pokyčiams nustatyti, atsižvelgiant į tuštumos dydį ir padėtį detalėje bei kitus patvarumą lemiančius veiksnius.

Taikant irimo mechanikos dėsningumus, iš dalies leistina vertinti liejimo tuštumas, kaip medžiagą pažeidusius išankstinius plyšius, kurių plitimas, veikiant ciklinei apkrovai, turi būti žinomas arba sustabdytas. Tampriajame kūne, turinčiame plyšio defektą ir veikiamame išorinių jėgų, defekto aplinkoje atsiranda reikšmingos įtempių koncentracijos sritys. Realių lietų konstrukcinių elementų su plyšiais sudėtinga geometrinė forma riboja žinomų analitinių įtempių intensyvumo koeficiento skaičiavimo metodų taikymą. Kompiuterinėms technologijoms tobulėjant, efektyviai taikomi įtempių intensyvumo koeficiento nustatymo skaičiuojamieji metodai, kurie padeda paaiškinti plyšio plitimą konstrukcijų elementuose su defektais.

Reikalingas kompleksinis eksperimentinis, analitinis ir skaitinis tyrimas, kad būtų įvertintas nevienalytės medžiagos atsparumas cikliniam apkrovimui ir taip patobulinta skaičiavimo metodika, kad ji leistų įvertinti gaminamų ir eksploatuojamų konstrukcijų ciklinį stiprumą bei prisidėtų prie jų ilgaamžiškumo didinimo.

Darbo aktualumas. Stiprusis ketus yra plačiai taikomas kalnakasyboje ir transporto įrenginių gamyboje dėl savo aukštų stipruminių ir technologinių savybių. Rūdos malūnų ir smulkintuvų projektinis ilgaamžiškumas yra 25 metai su galimybe pratęsti resursą. Tokių įrenginių atskirų didelių matmenų detalių (būgnų, atramų) gamybos procesas yra sudėtingas ir brangus. Neišvengiamas technologinio proceso padarinys – įvairūs defektai, kurie išryškėja neardančios kontrolės metu arba tik eksploatacijos metu. Tuštumos liejinyje yra ne tik liejinio technologijos netobulumas, bet ir didelio liejinio problema, kurią reikia įvertinti pradedant įrenginio eksploatavimą.

Tuštumos (įvairios formos ertmės) didelių matmenų ciklišKai apkraunamuose krumpliaračiuose ir korpusinėse detalėse mažina skerspjūvio geometrinius rodiklius, atsparumą statinėms ir ciklinėms apkrovoms, pakeičia mechaninį būvį, tampa plyšių atsiradimo židiniais, o būdami paviršiuje – didina jautrumą išorinės aplinkos neigiamiems veiksniams. Šalia tokių ertmių pastebimas ir struktūros nevienalytiškumas. Įvairaus dydžio tuštumų sankaupa detalės tūryje gali taip sumažinti konstrukcijos elemento stiprumą, kad jis suirs nepasiekęs reglamentuojamos ciklinės apkrovos ar apkrovus jį tik vieną kartą.

Neardančios kontrolės metodai leidžia aptikti liejimo defektus, tačiau dideli liejinių gabaritai sunkina kontrolės metodų taikymą. Atsargos koeficientų didinimas dažnai yra nepakankamai pagrįstas ir daro neigiamą įtaką liejinio masės ir formos optimizavimui. Skaičiavimo metodikų, kurios leistų įvertinti konstrukcinio elemento ciklinio stiprumo sumažėjimą ir atsižvelgtų į medžiagos irimo proceso specifiką, nepakanka. Pagrįstas tuštumų keliamo pavojaus įvertinimas yra sudėtingas, bet aktualus, nes leistų sumažinti didelių gabaritų įrenginių gamybos ir remonto išlaidas. Reikalingas toks elementų tinkamumo eksploatacijai ir apkrovos dydžio nustatymo metodas, kuris galėtų įvertinti gamybos metu aptiktų liejimo tuštumų įtaką, o jeigu plyšys atsirado įrenginį

eksploatuojant – nusakyti ir sustabdyti jo plitimą. Eksploatavimo metu atsirandantys kalnakasybos įrenginių elementų lūžiai rodo atliekamų stiprumo, patikimumo ir ilgaamžiškumo problemų tyrimų svarbą. Jų sprendimui sudarytas tarptautinis projektas.

Tyrimų objektas. Darbe tiriamas liejimo tuštumų sankaupos poveikis stipriojo ketaus bandinių ciklinio irimo procesui, nustatant pleišėjimo slenkstį esant labai mažam plyšio plitimo greičiui. Nagrinėjamas mechaninis būvis, atsirandantis veikiant daugiacikliam apkrovimui, susidarius ir plintant nuovarginiam plyšiui.

Darbo tikslas ir uždaviniai. Pagrindinis darbo tikslas – eksperimentiniais, analitiniais ir skaitiniais tyrimais nustatyti plyšio susidarymo ir sustojimo dėsningumus stipriajame ketuje su tuštumomis esant labai mažiems plitimo greičiams daugiaciklio apkrovimo srityje, įvertinant stipriojo ketaus mikrostruktūrą, mechanines savybes ir mechaninį būvį liejimo tuštumų aplinkoje ir patobulinti konstrukcijų elementų skaičiavimo metodiką.

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Nustatyti tiriamų stipriojo ketaus rūšių atsparumo statinei ir ciklinei apkrovai rodiklius.
2. Eksperimentais nustatyti skirtingų stipriojo ketaus rūšių su liejimo tuštumomis atsparumą pleišėjimui.
3. Įvertinti liejimo tuštumų įtaką įtempių intensyvumo koeficiento intervalo ΔK ir plyšio plitimo greičio da/dN priklausomybei, atsižvelgiant į kintančius bandinio skerspjūvio geometrinius rodiklius.
4. Atlikti bandinių lūžių fraktografinę analizę ir ištirti liejimo tuštumų poveikį nuovarginio plyšio plitimui.
5. Ištirti plyšio pavidalo defekto įtaką įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymui bandinyje su defektu.
6. Pasiūlyti stambiagabaričių konstrukcinių elementų su liejimo tuštumomis stiprumo skaičiavimo metodiką, pagrįstą bandinių su tuštumomis tyrimų rezultatų analize.

Tyrimų metodika. Darbe naudoti eksperimentiniai, analitiniai bei skaitiniai tyrimo metodai. Eksperimentiniams bandymams atlikti reglamentuojami metodai pakeisti ir pritaikyti medžiagos su tuštumomis tyrimams. Tiriant atsparumą plyšio plitimui, naudojami analitiniai ir skaitiniai metodai, pagrįsti tiesinės irimo mechanikos dėsningumais. Skaitinė analizė atliekama remiantis baigtinių elementų metodu. Tuštumų sankaupa nagrinėjama kaip plokščias plyšio pavidalo defektas.

Praktinė vertė. Atlikti tyrimai kokybiškai įvertino pleišėjimo slenksčio sumažėjimą stipriojo ketaus su liejimo tuštumomis tūriuose. Skaičiavimo metodika, pagrįsta eksperimentinių, analitinių ir skaitinių tyrimų rezultatais, leidžia įvertinti didelio gabarito liejamų konstrukcijų elementų stiprumo atsargą.

Mokslinis naujumas. Rengiant disertaciją buvo gauti šie nauji mokslui irimo mechanikos rezultatai:

1. Sukurta originali eksperimentinio tyrimo metodika, remiantis kuria įvertintas liejimo tuštumų sankaupų poveikis stipriojo ketaus daugiacikliam stiprumui.
2. Optinės ir elektroninės mikroskopijos ir kitais neardančios kontrolės metodais ištirtas nuovarginis irimas bandiniuose su tuštumomis.
3. BEM ištirtas įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymas necentrinio tempimo bandinyje įvertinant defekto dydį ir padėtį.
4. Pasiūlyta skaičiavimo metodika įvertina tuštumų liejinyje įtaką cikliniam stiprumui.

Ginamieji teiginiai

1. Įtempių intensyvumo koeficiento ribinėms reikšmėms didelę įtaką turi tuštumų sankaupos ir plyšio padėtis konstrukcijų elemente.
2. Sukurta patikslinta daugiaciklio stiprumo skaičiavimo metodika įvertina konstrukcinių elementų su liejimo tuštumų sankaupa tinkamumą eksploatacijai.
3. Neardančios kontrolės metodais aptiktų defektų įtaką cikliniam stiprumui galima įvertinti darbe naudotais eksperimentiniais, analitiniais ir skaitiniais metodais.

Darbo aprobavimas. Disertacijos tema paskelbti 5 mokslo darbai: 1 straipsnis Lietuvos periodiniame recenzuojamame leidinyje („Thomson ISI Master Journal List“) [1A]; 1 straipsnis užsienio periodiniame leidinyje, įtrauktame į ISI „Thomson Web of Science“ sąrašą [2A]; 3 straipsniai tarptautinių konferencijų pranešimų rinkiniuose (vienas iš jų įtrauktas į „Thomson ISI proceedings“ duomenų bazę) [3A, 4A, 5A].

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti šiose mokslinėse konferencijose:

- *Strength of high-cycle fatigue of non-homogenous cast iron //* “Euromech – Mecamat 2006. 9th European Mechanics of Materials Conference”. 9–12 May 2006, Moret-Sur-Loing, France;
- *Section properties of fracture of compact specimen with defects* // 11th International Conference „Mechanika-2006“, 6–7 April, 2006, Kaunas, Lithuania;

- *Investigation of defects influence on CT specimens fatigue crack threshold* // 13th International Conference „Mechanika-2008“, 3–4 April, 2008, Kaunas, Lithuania.

Disertacijos struktūra ir apimtis. Disertaciją sudaro: bendroji darbo charakteristika, žymėjimų sąrašas, 67 paveikslai, 11 lentelių, keturi skyriai, pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados, 2 priedai. Darbo apimtis yra 119 puslapių, neįskaitant priedų. Disertacijoje panaudoti 108 literatūros šaltiniai.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame apžvelgiama stipriojo ketaus pramoninio naudojimo aktualijos ir problematika, aptariamos defektų atsiradimo priežastys ir pobūdis. Pasitelkus tiesinės irimo mechanikos dėsningumus, nagrinėjamas nuovarginio plyšio atsiradimo ir plitimo procesas stipriajame ketuje esant daugiaciklei apkrovai. Analizuojami esamų ciklinio patvarumo skaičiavimo metodikų trūkumai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir konkretizuojami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pristatoma originali eksperimento metodika bandinių su tuštumomis daugiaciklio stiprumo tyrimui. Siūlomi eksperimento atlikimo ir rezultatų apdorojimo patobulinimai leidžia nustatyti tuštumų poveikį pleišėjimo slenksčiui.

Trečiajame skyriuje pateikiami atliktų eksperimentinių analitinių tyrimų rezultatai ir jų analizė. Pateikiama skerspjūvių su tuštumomis geometrinių rodiklių skaičiavimo metodika. Pateikiama detali fraktografinė lūžių analizė.

Ketvirtajame skyriuje aprašomi analitiniai bei skaitiniai defektų įtakos tyrimai ir jų rezultatų analizė. Pasiūlyta metodika liejinių su tuštumomis daugiaciklio stiprumo skaičiavimui, nagrinėjant projektinį ir eksploatavimo atvejus.

Autoriaus dalyvavimas tarptautiniuose projektuose

Autorius disertacijos rengimo laikotarpyje dalyvavo tarptautinių tyrimų programoje „Kalnakasybos ir transporto įrenginių ilgaamžiškumo didinimas“ („The longevity prolongation of mining and transport equipment“) (Metso #22119), kuriame dalyvauja Lietuvos, JAV, Australijos, Prancūzijos, Vokietijos, Suomijos, Bulgarijos įmonės ir universitetai.

1

Stipriojo ketaus taikymas ir daugiaciklio stiprumo problematika

Skyriuje apžvelgiami stipriojo ketaus mechaninės ir technologinės savybės bei skirtingų rūšių tipinės taikymo sritys. Aptariama gavybos technologija, liejimo tuštumų atsiradimo mechanizmai, tuštumų aptikimo ir išvengimo būdai. Apžvelgiami tiesinės irimo mechanikos ir daugiaciklio stiprumo dėsningumai, taikomi šiame darbe. Analizuojami stipriojo ketaus nuovarginio irimo mechanizmų ypatumai, būtini šios medžiagos irimo proceso supratimui. Apžvelgiamos šiuo metu taikomos konstrukcinių elementų su defektais skaičiavimo metodikos bei skaitiniai metodai, taikomi irimo mechanikos uždaviniams spręsti.

1.1. Stipriojo ketaus rūšys ir jų taikymas

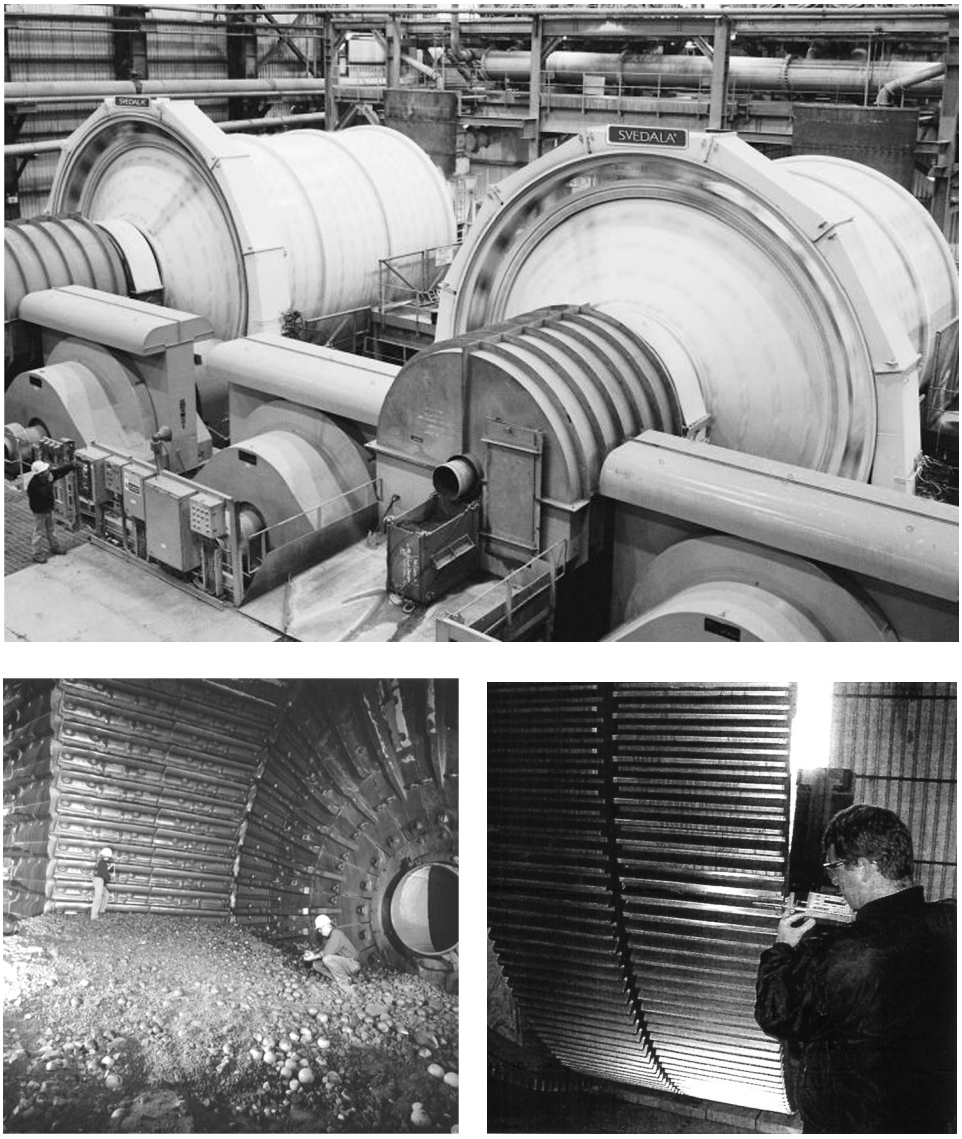
Vienas pagrindinių plačiai žinomų ketaus trūkumų – trapumas. Tačiau XX a. viduryje išradus ketų su rutuliniu grafitu, ši problema tapo mažiau aštri (Budinski, K. G., Budinski, M. K., 2005; Щербединский, 2005). Toks ketus turi aukštus stiprumo, plastiškumo, tąsumo, ciklinio stiprumo, atsparumo dilimui ir korozijai, dinaminio slopinimo rodiklius, yra mažiau jautrus įtempių koncentracijai. Ši medžiaga turi technologines savybes, būdingas įprastoms ketaus rūšims, tačiau jos mechaninių savybių rodikliai yra artimi kai kuriems plienams. Toks teigiamas savybių derinys leidžia naudoti stiprųjį ketų tokioms

konstrukcijoms, kurios iki tol buvo gaminamos mechaninio apdirbimo ir suvirinimo būdu. Plinta stipriojo ketaus naudojimas svarbių konstrukcinių elementų gamyboje, kur reikalaujama geba atlaikyti padidintas apkrovas ir turėti aukštą ciklinį stiprumą. Šios savybės suteikiamos stipriajam ketui taikant specialias technologinės priemones, kurios pagerina medžiagos mechanines savybes. Esant identiškai mikrostruktūrai, galimi nemaži ciklinio stiprumo savybių svyravimai, priklausantys nuo taikyto terminio apdirbimo ypatumų (Callister, 1997–2000).

Šiuo metu stiprusis ketus dažnai naudojamas vietoj pilkojo ketaus ar liejiminių plienų. Pavyzdžiui, JAV 2000–2002 m. pilkojo ir stipriojo ketaus gavybos kiekiai susilygino, ir laukiama, kad ateinančiu dešimtmečiu stiprusis ketus dominuos tarp kitų ketaus rūšių. Išvardytų savybių dėka ši ketaus rūšis vis plačiau naudojama įvairiose pramonės šakose, tarp jų ir transporto, kalnakasybos bei metalurgijos pramonėje. Sukurta eilė stipriojo ketaus rūšių su didele mechaninių savybių įvairove, kuri leidžia naudoti šį ketų skirtingus inžinierinius reikalavimus keliančiose konstrukcijose. Mechaninės savybės kinta gana didelėse ribose: stiprumo riba σ_u – nuo 400 iki 1600 MPa, o santykinė takumo riba $\sigma_{0,2}$ – nuo 250 iki 1100 MPa. Taip pat pažymėtina, kad takumo ir stiprumo ribos santykis gali net viršyti kai kurių plieno rūšių rodiklius. Šio ketaus geba slopinti vibracijas yra 2–3 kartus aukštesnė už plieno, o rutulinė grafito forma turi palankią įtaką stiprumui esant skirtingiems apkrovimo režimams, tarp jų ir cikliniams. Taigi, stiprųjį ketų dėl jo įprasto pilkojo ketaus ir plieno savybių derinimo galima vertinti kaip ypatingą konstrukcinę medžiagą (Dorazil, 1991).

Stiprusis ketus yra lydinys plieno pagrindu, turintis ne mažiau kaip 2,14 % anglies. Neištirpusi anglis, linkusi sustingti dribsnių pavidalu, suteikia įprastam ketui trapumą ir yra nepageidautina ciklinio stiprumo gerinimo požiūriu. Priešingai, rutulinė grafito intarpo forma mažina trapumą ir gerina stiprumo savybes, tarp jų ir ciklines (Žvinys, 1999).

Mineralų perdirbimas yra daugiapakopis apdirbimas, tarp jų ir smulkinimas. Šiam tikslui naudojami įvairių tipų rūdos malūnai – rutuliniai, strypiniai, būgniniai (pateikti 1.1 paveiksle), sraigtiniai ir kt. (Jones, Svalbonas, 2003). Siekiant padidinti darbo našumą, projektuojami vis galingesni įrenginiai, kurių gabaritai taip pat nuolat didėja. Kai kurių įrenginių galingumas siekia 15000 kW, o atskirų dalių gabaritai viršija 10 m. Mechaninėms pavaroms dažnai naudojami didelių gabaritų krumpliaračių poros. Šių įrenginių detalių gamybai taikomas stiprusis ketus: korpusinėms detalėms, atramoms, dangčiams ir pan. naudojamas ketus su feritine, perlitine-feritine arba perlitine mikrostruktūra, kurio stiprumo riba σ_u svyruoja nuo 400 iki 800 MPa. Krumpliaračių gamybai naudojamas austemperizuotas stiprusis ketus (σ_u – nuo 800 iki 1600 MPa). Žinoma, kad tokiems sudėtingiems ir brangiems įrenginiams stengiamasi užtikrinti kuo ilgesnį eksploatavimo laiką, kuris turi viršyti 25 metus.



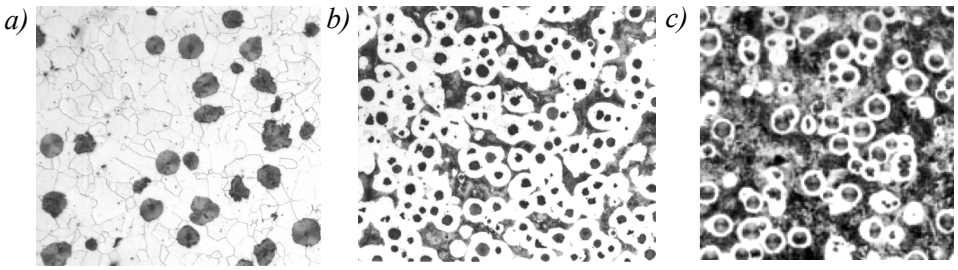
1.1 pav. *Mineralų malūnai ir jų dalys*

Terminio apdirbimo metodas, vadinamas austemperizavimu, buvo išrastas ir taikytas plienams nuo 1930 m. Pirmieji bandymai pritaikyti šį metodą stipriajam ketui buvo pradėti 1950–1960 m., o pramoninis taikymas – 1970 m. beveik vienu metu JAV, Kinijoje, Suomijoje bei Čekijoje. Gauta nauja medžiaga buvo vadinama įvairiai: austemperizuotu ketumi su rutuliniu grafitu, austemperizuotu stipriuoju ketumi, tačiau vėliau buvo priimtas šiuo metu plačiausiai vartojamas

pavadinimas – austemperizuotas ketus. Dėl išskirtinių mechaninių savybių austemperizuoto ketaus taikymas prasidėjo nuo pat jo pramoninės gavybos pradžios: liejami krumpliaračiai, alkūniniai ir skirstymo velenai, automobilių pakabos elementai ir kt. (Harding, 2007).

1.1.1. Rūšys ir savybės

Priklausomai nuo cheminės sudėties ir terminio apdirbimo, stipriajam ketui suteikiama kiek skirtingos prigimties matrica, nuo kurios žymiai priklauso gauto ketaus mechaninės savybės (Žvinys, 1999; Yescas-Gonzalez, Bhadeshia, 2001; Франценюк И. В., Франценюк Л. И., 2004). Pagal matricos prigimtį, išskiriamos 4 pagrindinės stipriojo ketaus rūšys: su feritine, perlitine-feritine, perlitine (1.2 pav.) arba beinitine matricomis (1.3 pav.). Pirmosios 3 gaunamos be specialaus terminio apdirbimo; joms taikoma tik normalizacija ar grūdinimas. Kuo kietesnė yra matrica, tuo stipresnis ir kietesnis yra ketus, tačiau kartu mažėja ir jo plastiškumo rodikliai.



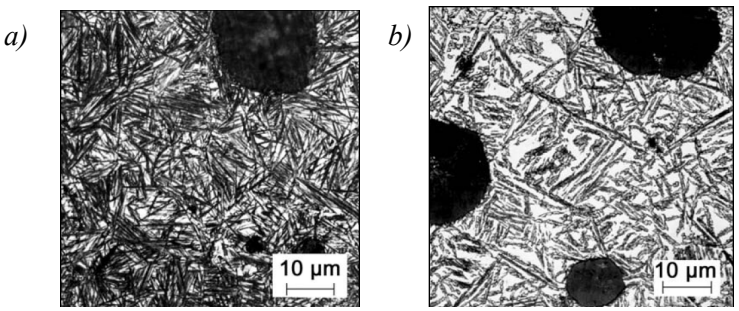
1.2 pav. *Skirtingų stipriojo ketaus rūšių mikrostruktūra: a) feritinė; b) perlitinė-feritinė; c) perlitinė*

Savybių įvairovė (1.1 lentelė) įgalina plačiai taikyti stiprųjį ketų lietų atsakingų konstrukcinių elementų gamyboje. Didėjant perlito kiekiui matricoje, ketus gaunamas kietesnis ir stipresnis, bet mažiau plastiškas. Dėl pakankamai sudėtingos mikrostruktūros, didelę įtaką stipriojo ketaus savybėms turi mikrostruktūros ypatumai ir defektai. Siekiama, kad grafito intarpo dydis neviršytų tam tikros reglamentuojamos reikšmės (apie 60–100 μm), intarpų pasiskirstymas būtų tolygus, o jų kiekis 1 mm^2 būtų pakankamai didelis (skirtingoms rūšims – nuo 150 iki 350 vienetų / 1 mm^2). Perlito ir ferito kiekių santykis mikrostruktūroje taip pat yra reglamentuojamas ir turi tiesioginę įtaką mechaninėms savybėms. Nepageidaujami yra įvairūs defektai: mikrotuštumos, karbidų išsiskyrimas, nemetaliniai intarpai, grafito intarpų pasiskirstymo anomalijos (kaip drosas ar intarpų grandinės). Gamybos technologinių procesų netobulumai turi įtaką gaunamos mikrostruktūros kokybei.

1.1 lentelė. *Stipriojo ketaus pagrindinės mechaninės savybės*

Stipriojo ketaus rūšis	EN-GJS-400-18	EN-GJS-450-10	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3	EN-GJS-700-2	EN-GJS-800-2
Mikrostruktūra	Feritinė	Feritinė-perlitinė	Feritinė-perlitinė	Feritinė-perlitinė	Perlitinė	Perlitinė
Stiprumo riba σ_u, MPa	400	450	500	600	700	800
Proporcingumo riba $\sigma_{0,2}$, MPa	250	310	320	370	420	480
Santykinis pailgėjimas A_t, %	18	10	7	3	2	2
Kietumas, HB	iki 187	160–221	170–241	192–269	229–302	248–352
Tamprumo modulis E, GPa	169	169	169	174	176	176
Puasono koeficientas ν	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275

Stiprusis ketus, kuriam buvo taikytas austemperizavimo procesas, pasižymi išskirtinėmis savybėmis, todėl jis dažnai yra atskiriamas nuo kitų stipriojo ketaus rūšių ir vadinamas austemperizuotu stipriuoju ketumi (angl. „Austemperized Ductile Iron“; rus. “Аустенитно-бейнитный чугун с шаровидным графитом (АБЧШГ)“ („Austenitno-bejnitnyj chugun s sharovidnym grafitom“). Priklausomai nuo austemperizavimo proceso temperatūros, skiriamos mikrostruktūros su žemuoju arba aukštuoju beinitu (1.3 pav.).



1.3 pav. *Tipinė žemojo (260 °C) (a) ir aukštojo (375 °C) (b) beinito matricos austemperizuotame ketuje*

Įvairios pagrindinių austemperizuoto ketaus mikrostruktūrų dedamųjų (grafito branduoliai, beinitinis feritas, austenitas, martensitas, karbidai ir kt.)

proporcijos nulemia skirtingas mechanines savybes. Mikrostruktūra priklauso nuo cheminės sudėties ir terminio apdirbimo ypatumų. Gerą atsparumą dilimui dažniausiai lemia aukštas paviršiaus kietumas. Esant žemoms austemperizavimo temperatūroms (235–250 °C), gaunamas kietas austemperizuotas ketus (480–550 BHN), ir ši ketaus rūšis būtų optimali ten, kur atsparumas dilimui yra svarbesnis už kitas mechanines savybes. Kylant austemperizavimo temperatūrai, gaunamo ketaus kietumas mažėja. Tačiau net ir palyginti minkštas austemperizuotas ketus (280–320 BHN) turi didelį liekamojo austenito kiekį, kuris linkęs virsti martensitu, esant žymioms kontaktinėms deformacijoms paviršiuje. Tai smarkiai pagerina atsparumą dilimui. Ketaus su aukštesniuoju beinitu stiprumo riba σ_u yra apie 960...1150 MPa, santykinis pailgėjimas iki 13 %, tuo tarpu ketus su žemesniuoju beinitu, atitinkamai, – 1310...1495 MPa ir 5 %. Standarte EN 1564 numatomos austemperizuoto ketaus rūšys pateiktos 1.2 lentelėje. Beje, liejyklos dažnai pagerina ir patobulina gaminamo ketaus savybes.

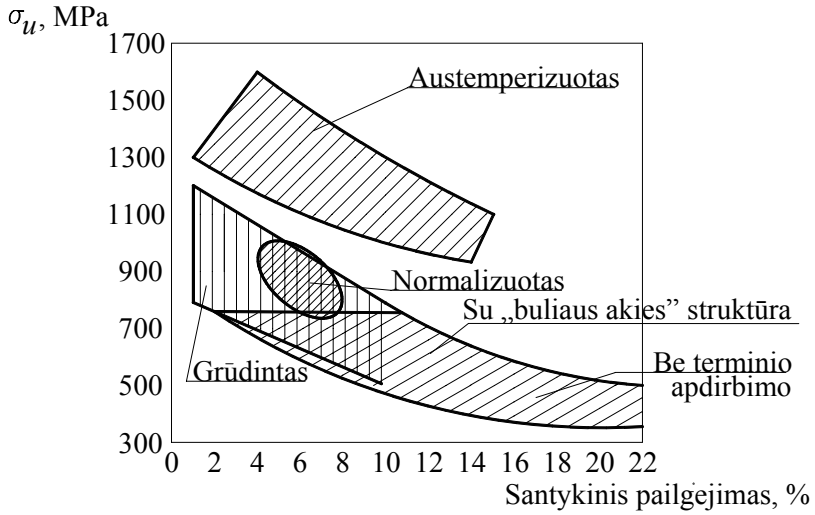
1.2 lentelė. *Pagrindinės austemperizuoto ketaus mechaninės savybės*

Austemperizuoto ketaus rūšis	EN-GJS-800-8	EN-GJS-1000-5	EN-GJS-1200-2	EN-GJS-1400-1
Stiprumo riba σ_u, MPa	800	1000	1200	1400
Proporcingumo riba $\sigma_{0,2}$, MPa	500	700	850	1100
Santykinis pailgėjimas A, %	8	5	2	1
Kietumas, HB	260–320	300–360	340–440	380–480
Tamprumo modulis E, GPa	170	168	167	165
Puasono koeficientas v	0,27	0,27	0,27	0,27

Toks ketus yra plačiai taikomas konstrukcinių elementų, veikiančių padidintos trinties sąlygomis, gamyboje. Austemperizuoto ketaus mechaninės savybės (aukštas stiprumas ir tąsumas) kartu su ekonominiais privalumais sudaro sąlygas šios medžiagos taikymui atsakingų detalių gamyboje. Žinoma, kad austemperizuoto ketaus atsparumas dilimui yra aukštesnis lyginant su tokios pat cheminės sudėties normalizuotu ketumi arba specialiais plienais. Austemperizuotas stiprusis ketus pasižymi išskirtiniu savybių deriniu: aukštas santykinis pailgėjimas ir smūginis tąsumas, aukštas atsparumas dilimui, geresnės vibracijų slopinimo savybės, ciklinis stiprumas, mažesnės liekamosios deformacijos po terminio apdirbimo, mažesni gavybos kaštai masinėje gamyboje,

lyginant su plienu ar aliuminiu, mažesnis tankis. Prie teigiamų austemperizuoto ketaus technologinių savybių paminėtinas geras liejamumas ir mechaninis apdirbamumas (žinomas ir perspektyvus karštos deformacijos būdas, taikomas slėginių vamzdžių gamybai (Щербединский, 2005). Prie neigiamų savybių – žemesnį, nei plienų, tamprumo modulį, nesuvirinamumą, ribotą eksploatacijos temperatūrą (-40...+200 °C) dėl mikrostruktūrinių virsmų rizikos, aukštą gamybinės įrangos kainą.

Literatūroje nėra vieningos nuomonės apie austenito poveikį cikliniam stiprumui. Vieni autoriai nurodo, kad austenito virsmas martensitu plyšio viršūnėje yra lydimas tūrinių pokyčių ir padidina įtempius plyšio viršūnėje. Šis padidėjimas sudaro palankesnes sąlygas plyšio plitimui. Kitur teigiama, kad stabilus austenitas gali pagerinti austemperizuoto ketaus ciklinį stiprumą. Be to, austenitas padidina tąsumą, todėl lyginant austemperizuoto ketaus ciklinį stiprumą su kitomis stipriojo ketaus rūšimis, pirmojo rodikliai yra aukštesni. Stipriojo ketaus rūšių santykinio pailgėjimo ir stiprumo savybes atspindi diagrama, pateikta 1.4 paveiksle. Matome, kad savybės smarkiai kinta, o kai kurių rūšių skirtinga mikrostruktūra suteikia panašias plastiškumo ir stiprumo savybes.



1.4 pav. *Stipriojo ketaus rūšių mechaninės savybės*

Vienas plačiausiai taikomų pasaulyje yra ASTM A897M-03 standartas, sukurtas 1990 m. Be jo, naudojami Europos Sąjungos (BS EN 1564, EN-JS1100), Japonijos, Rusijos standartai. Pagal Rusijos standartą GOST 7293-85 stiprusis ketus žymimas ВЧ – "высокопрочный чугун" (vysokopročnyj čiugun).

Po raidžių rašomi skaičiai reiškia minimalią stiprumo ribą kgf/mm^2 reikšmę. Pagal JAV standartą ASTM A 536 stiprusis ketus žymimas skaičiais: pirmieji du skaičiai reiškia stiprumo ribą „svarais/kvadratiniam coliui (psi)×10^{-3}“, antrieji – suapvalintas skaičius to paties rodiklio, išreiškus MPa×10^{-1}. Trečias skaičius reiškia santykinį pailgėjimą, išreikštą procentais. Pagal Vokietijos standartą DIN 1693 stipriojo ketaus markėje GGG-50 raidės, išvertus, reiškia „stiprusis ketus su rutuliniu grafitu“, o „50“ – minimali stiprumo riba MPa× 10^{-1} (kgf/mm^2).

1.1.2. Gavyba

Vidinė sandara nusako medžiagos mechanines savybes, tarp jų ir ciklinį stiprumą. Stiprusis ketus yra santykinai nevienalytė medžiaga; siekiant įsigilinti į jo ciklinio stiprumo problematiką, reikia detaliau išnagrinėti šios medžiagos sandarą ir gavybos technologiją.

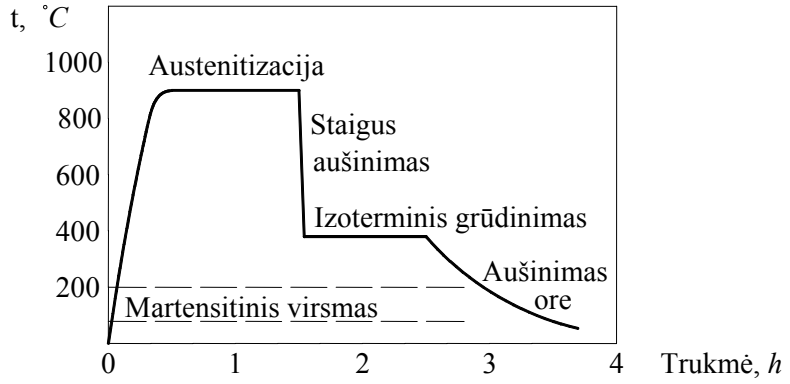
Rutulinio grafito formavimas reikalauja tam tikrų papildomų operacijų prieš aušinant skystą ketaus lydinį. Stingstant kinta ketaus mikrostruktūra. Taikant skirtingą terminį apdirbimą, galima gauti skirtingą mikrostruktūrą ir platų stiprumo rodiklių pasirinkimą. Kaip jau buvo pažymėta, rutulinė grafito forma lemia aukštesnes ketaus mechanines savybes. Siekiant suteikti grafitui rutulinę formą, pridedami papildomi cheminiai elementai. Ši technologinė operacija vadinama sferoidizacija. Jos metu pridedama magnio, kuris reaguoja su siera ir deguonimi. Kadangi magnio sulfidas ir oksidas didina paviršinius įtempius, gaunama rutulinė grafito forma. Jeigu sieros kiekis lydinyje nėra aukštas, pakanka pridėti 0,03...0,06 % magnio. Papildomai, pridedant ferosilicio, skatinamas grafito branduolių susidarymas – ši operacija vadinama inokuliacija. Aukšta vietinė silicio koncentracija sukelia silicio karbidų augimą aplink ką tik suformuotus grafito branduolius ir sumažina ketaus tendenciją sustingti metastabilioje fazėje. Gautas lydinys išlaikomas ~930 °C temperatūroje apie 12 h ir vėliau lėtai aušinamas, taip gaunant rutulinį grafitą su ferito matrica.

Austemperizuotas ketus taip pat priskirtinas prie stipriųjų ketų grupės. Geras mechanines savybes užtikrina matricos mikrostruktūra, kuri yra gaunama ypatingo terminio apdirbimo dėka. Konstrukcinių elementų iš austemperizuoto ketaus gamyba prasideda nuo tinkamos cheminės sudėties, aukštos kokybės stipriojo ketaus paruošų liejimo, kurios vėliau apdirbamos taikant specifinį terminio apdirbimo procesą. Šis būdas leidžia gauti stiprųjį ketų su beinitine matrica, kurios dėka žymiai išauga stiprumo savybės. Izoterminis apdirbimas, kurio dėka gaunamas beinitas, vadinamas austemperizavimu, o tokiu būdu gautas ketus – austemperizuotu.

Viena pagrindinių užduočių, liejant austemperizuotą ketų, yra reikiamos cheminės sudėties, kuri leistų gauti pageidaujamos mikrostruktūros ir mechaninių savybių galutinę medžiagą, užtikrinimas (Harding, 2007). Tipinė cheminė sudėtis yra 3,60 % C (±0,20 %); 2,50 % Si (±0,20 %); 0,35 Mn (±0,05 %), kai sienelės

storis viršija 13 mm ir 0,60 % Mn, kai sienelės storis yra mažiau už 13 mm; 0,80 Cu (±0,05 %); 2,00 % Ni (±0,10 %); 0,30 % Mo (±0,03 %). Siekiant optimizuoti perlito susidarymą, naudojamas nedidelis kiekis Ni, Cu ir Mo – atskirai arba šių metalų kombinacijose. Mo ir Mg pagerina greitą aušinimą, tačiau dideli jų kiekiai sukelia karbidų susiformavimą bei segregaciją grūdų paviršiuose, tuo pačiu smarkiai mažina mechanines savybes. Todėl jų kiekis daugelyje liejyklų yra ribojamas. Pasitaikantys liejimo defektai (stingimo tuštumos, šlako sluoksniai, drosas ir pan.) gali sumažinti teigiamą beinitinės matricos poveikį.

Tipinė austemperizacijos proceso schema pateikta 1.5 paveiksle. Terminis apdirbimas atliekamas 2 etapais. Pirmiausia paruoša yra įkaitinama iki austenitizacijos temperatūros (850–950 °C) ir išlaikoma šioje temperatūroje iki pilno metalinio pagrindo virsmo vienalyčiu austenitu (apie 2 val.). Įkaitinimui naudojamos druskos vonios arba terminės krosnys su apsauga nuo atmosferos. Po to paruoša yra greitai ištraukiama ir perkeliama į grūdinimo vonią su aušinančiu skysčiu, kurio temperatūra viršija martensitinio virsmo temperatūrą. Proceso esmę sudaro būtent šis greitas aušinimas nuo austenitizacijos temperatūros iki izoterminio virsmo (austemperizacijos) temperatūros (250–450 °C). Dėl didelio silicio kiekio karbidų susidarymas yra išvengiamas ir gaunama netaisyklingos formos beinitinio ferito ir liekamojo austenito, prisotinto anglies, matrica. Po aušinimo leidžiamas nedidelis martensito ir karbidų kiekis. Tokia mikrostruktūra, kurią sudaro apvalių grafito intarpai austenitinėje matricoje, dar vadinama ausferitu. Technologiniai veiksniai, tokie kaip cheminė sudėtis ir terminio apdorojimo režimų ypatumai, daro nemažą įtaką grafito intarpų kiekiui, dydžiui ir matricos sandarai.



1.5 pav. *Tipinis austemperizacijos procesas*

Po išlaikymo druskų vonioje ir aušinimo ore nebūtina taikyti nei atleidimo, nei sendinimo. Didelių gabaritų liejiniams aktuali yra vienodo aušinimo greičio išlaikymo problema, nes kitaip kyla segregacijos pavojus. Dėl kietumo

padidėjimo mechaninis apdirbimas turi būti atliktas prieš galutinį terminį apdirbimą, kuriuo metu suteikiamas pageidautinas kietumas gaminio paviršiams.

1.2. Defektų analizė

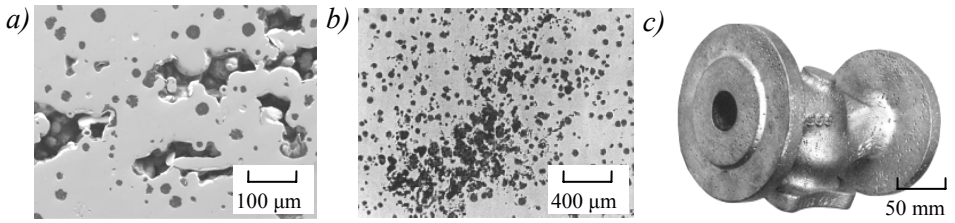
Liejimas – sudėtingas technologinis procesas, kuris yra rizikingas gaminio kokybės požiūriu viso gamybos proceso metu. Lietų konstrukcinių elementų projektavime taikoma daug technologinių apribojimų, susietų su liejimo defektų atsiradimo pavojumi. Defektu vadinamas kiekvienas atskiras produkcijos neatitikimas nustatytiems reikalavimams. Gaminys, turintis bent vieną defektą, vadinamas defektiniu. Tai reiškia, kad bent vienas iš liejinio kokybės rodiklių viršijo ribinį leistiną dydį. Priklausomai nuo defektų kiekio ir pobūdžio, visi liejiniai skirstomi į 4 grupes:

- Tinkami, visiškai atitinkantys visus techninės dokumentacijos ir standartų nustatytus reikalavimus;
- Sąlyginai tinkami, turintys nedidelius nukrypimus nuo nustatytų reikalavimų (mažai reikšmingi defektai), kurie nedaro didelę įtaką liejinio arba viso gaminio eksploataciniams rodikliams; liejiniai leidžiami eksploatuoti po nuodugnaus defektų įvertinimo;
- Pataisomas brokas – liejiniai, turintys vieną arba keletą pataisomų defektų, kuriuos pašalinus galima leisti eksploatuoti gaminį;
- Nepataisomas (galutinis) brokas – liejiniai, kurių defektus techniškai neįmanoma arba ekonomiškai nenaudinga taisyti, arba kai jų taisymo kokybės patikrinimas neįmanomas.

Ketaus liejimo defektų klasifikaciją yra universali, nes taikoma ir kitų metalų liejiniams. Defektai skirstomi pagal technologinius požymius ir atsiradimo priežastis. Pagal defektų pobūdį jie gali būti akivaizdūs arba slapti. Akivaizdus defektas gali būti nustatytas vizualiai arba numatytais normatyvinėje dokumentacijoje techniniais būdais. Slaptas defektas – defektas, kurio neįmanoma nustatyti minėtais būdais. Tokie defektai aptinkami liejinio apdirbimo arba nenumatytais techninėje dokumentacijoje būdais. Nepageidautina ir pavojinga, kai toks defektas nustatomas gaminio eksploatacijos metu, nes tai gali sukelti gedimą.

Analizuojant gamybos broko statistinius duomenis liejyklose, tuštumų ir porėtumo atsiradimas įeina į 5 dažniausiai pasitaikančių defektų sąrašą (Siekanski, Borkowski, 2003), nuo kurių tiesiogiai priklauso liejinio patikimumas ir kokybė. Stipriajam ketui priskiriamos kelios liejimo defektų rūšys, kurios gali lemti daugiaciklį konstrukcinių elementų stiprumą. Pirma, tai didesnės stingimo

tuštumos (> 0,5 mm), kurios yra aptinkamos vizualiai paviršiuje arba neardančios defektoskopijos priemonėmis liejinio tūryje. Antra, mažesnės stingimo tuštumos (stingimo porėtumas, 1.6 pav., a) (< 0,5 mm), kurios yra sunkiau aptinkamos ir kurių gabaritai yra didesni už grafito intarpo dydį (kurio maksimalus dydis siekia maždaug 100 μm). Trečia, tai mikrostruktūros defektai, pvz., grafito intarpų formos ir tarpusavio išsidėstymo anomalijos (droso sluoksniai, grafito intarpų grandinės), kurie yra pavojingi nuovarginių plyšių atsiradimo požiūriu (1.6 pav., b) (Leonavičius, Petraitis, Šukšta et al., 2003). Ketvirta, tai adatinės formos kiaurymės, esančios paviršiuje arba arti paviršiaus (*angl.* „pinholes“) (2.6 pav, c). Kartais tokių defektų galima ir nevertinti, jeigu liejinio paviršius po liejimo yra mechaniškai apdorojamas.



1.6 pav. *Stipriojo ketaus defektų pavyzdžiai: a) stingimo tuštumos; b) grafito išsidėstymo anomalija droso sluoksnyje; c) adatinės kiaurymės liejinio paviršiuje*

Liejimo metu atsiradę defektai, aptikti krumpliaračių darbiniuose paviršiuose, laikomi nepataisomu broku, nes labai sumažina gaminio stiprumą. Defektai, atsiradę mažiau pavojingose vietose, kelia mažesnį pavojų. Norint objektyviai nustatyti jų poveikį, reikia tobulinti skaičiavimo metodiką taip, kad ji leistų įvertinti liejimo defektų įtaką konstrukcinio elemento stiprumui daugiaciklio apkrovimo atveju.

Šiame darbe nagrinėjama liejimo tuštumų įtaka stipriojo ketaus cikliniam stiprumui. Priklausomai nuo atsiradimo mechanizmo, vidines tuštumas galima suskirstyti į tuštumas, atsiradusias dėl dujų išsiskyrimo arba stingimo tūrinių pokyčių. Vidinės stingimo tuštumos ir porėtumas priskirtini prie sunkiau aptinkamų vidinių liejimo defektų, kurie yra ypač pavojingi dėl akivaizdžiai neigiamos įtakos konstrukcinio elemento stiprumui. Dauguma technologinių veiksnių veikia ketaus tūrio pokytį aušinimo ir stingimo metu, ir, tuo pačiu, polinkiui sudaryti vidines tuštumas (Siclari, Margarita, Berthelet et al., 2003). Prie pagrindinių veiksnių priskirtini:

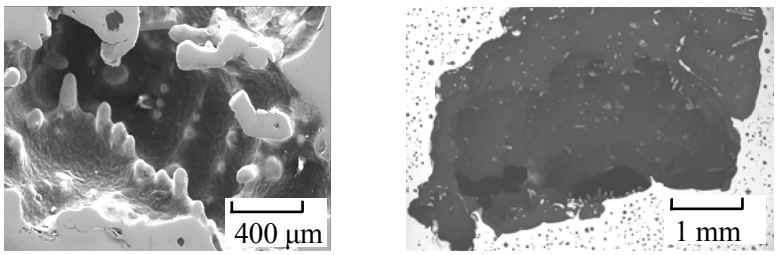
- per aukšta liejimo temperatūra;
- per ilgas išlaikymas krosnyje;
- per didelis pakartotinai naudojamo ketaus kiekis;

- didelis nepageidaujamų cheminių elementų, skatinančių anglies išsiskyrimą ir karbidų atsiradimą, kiekis (pvz., Mg);
- kintantis anglies ekvivalento kiekis ketuje;
- netinkama inokuliacija.

Šių veiksnių poveikis gali būti apytiksliai nusakomas analizuojant technologinius bandinius, kai polinkis atsirasti tuštumoms nustatomas lyginant atsiradusių tuštumų dydį ir kiekį kintamo skerspjūvio arba skirtingos cheminės sudėties bandomuosiuose liejiniuose. Ketaus rūšys, kurių polinkis sudaryti vidines tuštumas yra nedidelis, kartu pasižymi ir kita teigiama savybe – karbidų kiekis jose yra žemas. Didesnis karbidų kiekis ketuje iki papildomo terminio apdirbimo didina vidinių tuštumų atsiradimo pavojų.

1.2.1. Porėtumas

Porėtumas – vienas dažniausia pasitaikančių liejimo defektų, kai liejinio tūryje atsiranda mažo dydžio (< 0,5...1 mm) chaotiškai pasiskirsčiusios tuštumos. Šis defektas pagal atsiradimo mechanizmą gali būti skirstomas į dujinį (1.7 pav.) ir stingimo porėtumą.



1.7 pav. *Dujinio porėtumo pavyzdžiai*

Dujinis porėtumas turi keletą atsiradimo priežasčių. Vienas iš dujinio porėtumo šaltinių – nesugebėjimas išspausti orą iš liejimo formos liejimo metu. Dujų ertmės atsiranda, kai liejant dujų burbuliukai patenka į išlydytą metalą. Toks porėtumas gali atsirasti visose liejinio dalyse.

Kita galima priežastis – pakartotinos oksidacijos procesas liejinio paviršiuje arba tūryje. Pridėtinės medžiagos yra lengvesnės už ketų ir kaupiasi aukštesniuose liejinio sluoksniuose. Šlako oksidai atsiranda visose liejimo proceso operacijose, ir jų atsiradimas ar patekimas į liejinio vidų taip pat yra dažna dujinio porėtumo priežastis. Mažiau stabilūs oksidai (pvz., MnO) reaguoja su anglimi; taip atsiranda anglies monoksido (CO) burbuliukas. Didesnis deguonies kiekis mažina paviršinius įtempius, kuriuos būtina įveikti burbuliuko formavimosi proceso metu. Ketus turi pakankamai anglies, todėl liejimo proceso

cheminių virsmų darinys daugiausia yra anglies monoksidas, kuris susikaupia arti paviršiaus arba liejinio paviršiuje esant normalioms pilstymo ir liejimo temperatūroms. Taip oksidų intarpai tampa dujų ertmių atsiradimo priežastimi. Didelių dujų porų atsiradimas dažnai priskiriamas prie šlako kriauklių, ypač kai defekto paviršius turi oksidų arba šlako pėdsakų. Didelis magnio kiekis ir maža liejimo temperatūra padidina šlako ir adatinių kiaurymių kiekį. Pakartotinos oksidacijos šlakas yra pagrindinė šio defekto priežastis ketuje. Šio defekto galima išvengti, atskiriant šlaką liejimo metu filtrais.

Vandenilinis porėtumas yra minimas kaip dar viena dažna dujų porų atsiradimo priežastis metalo mikrostruktūros lygyje. Vandenilis ištirpsta išlydytame metale esant sąlyčiui su drėgme, todėl jos šalinimas viso liejimo proceso metu padėtų išvengti šio defekto atsiradimo. Aliuminio arba titano priedas mažina geležies oksido ir šio defekto atsiradimą.

Priešingai, stingimo porėtumo (*angl.* „microshrinkage“) priežastis – mažo masto tūriniai pokyčiai, kurie nėra pakankamai žymūs, kad atsirastų didesnė stingimo tuštuma. Stingimo porėtumas stebimas pavojingų šiuo požiūriu stambesnių skerspjūvių viduryje, kur metalas sustingsta vėliausiai. Tai išskirstytos mažos tuštumos, kurių dydis neviršija 0,5 mm. Kadangi jų atsiradimo mechanizmas yra toks pat, kaip ir didesnių stingimo tuštumų, jis yra detaliau aptariamas 1.2.2 skirsnyje.

Pagrindinis požymis, kuriuo dujinis porėtumas skiriasi nuo stingimo porėtumo, – palyginti lygus blizgus vidinis paviršius. Priešingai, stingimo tuštumų vidinis paviršius yra matinis ir šiurkštus dėl nepilnai suformuotų grūdų ir sustingusių dendritų. Tačiau praktikoje dažnai sutinkamas ir mišrus tuštumų atsiradimo procesas, kai liejimo tuštumos atsiranda vykstant abiem mechanizmams.

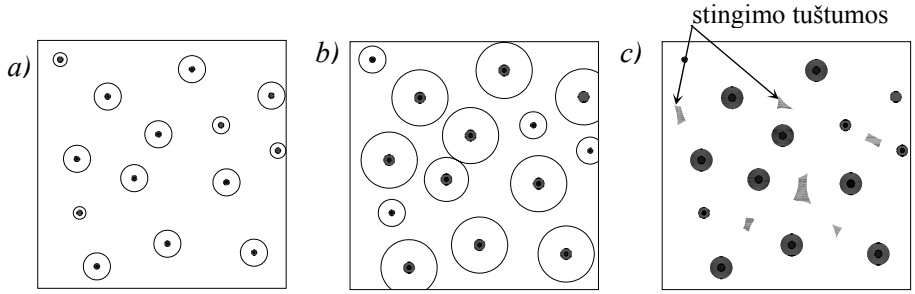
1.2.2. Stingimo tuštumos

Liejant didelių matmenų detales, dažnai aptinkamos didesnės stingimo tuštumos, kurių dydis viršija 1 mm (*angl.* „macroshrinkage“ arba “shrink“). Pagal atsiradusių tuštumų dydį stingimo tuštumas galima suskirstyti į mažas (dujinį porėtumą, aptartą 1.2.1 skirsnyje ir aptinkamą optinėmis priemonėmis), ir didesnes (pastebimas be didinimo). Pagal padėtį liejinyje stingimo tuštumos gali būti paviršinės arba vidinės.

Siekiant ištirti stingimo tuštumų atsiradimo mechanizmą, reikia detaliau išnagrinėti stipriojo ketaus aušimo procesą, kuris pasižymi keliais etapais: augančių grūdelių atsiradimu, cheminiais virsmais ir tūrio pokyčiu (1.8 pav.).

Išlydytas metalas pasižymi chaotiškų atomų išsidėstymu. Auštant, formuojami metalo grūdai, kai atomai prikimba vienas prie kito tam tikra tvarka, sudarydami dendritinę struktūrą. Dendritai virsta grūdais stingimo pabaigoje. Pirmoje fazėje aušta susiformavusios eutektinės akutės su grafito branduoliais; stingstant jose atsiranda

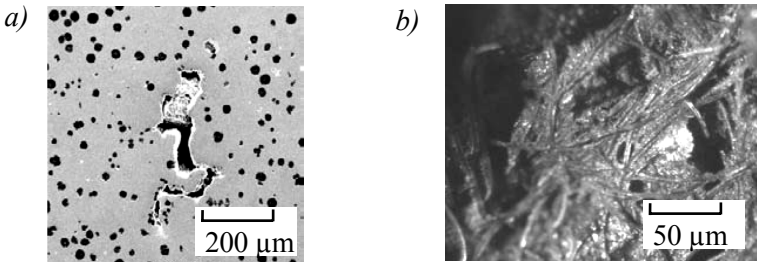
kryptingai augantys dendritai. Ši fazė turi svarbią įtaką liejinio mechaninėms savybėms, nes taikant įvairias technologines priemones, galima pasiekti skirtingą aušinimo režimą. Pageidaujant galima pasiekti, kad liejinys auštų per visą tūrį ir dendritų užuomazgos atsirastų visame liejinio tūryje; taip gaunama vienalytė įvairiomis kryptimis struktūra. Priešingai, kai dendritai auga nuo liejinio išorės į vidų, gaunami kryptinga vidinė struktūra su gana stambiais grūdais, kas leidžia gauti pageidautinas mechanines savybes norima kryptimi (pvz., turbinų mentės).



1.8 pav. *Stipriojo ketaus stingimo proceso fazės – grūdų atsiradimas (a), grūdų augimas ir cheminiai virsmai (b), stingimo tuštumų atsiradimas (c)*

Antroji būdinga stingimo proceso fazė yra cheminiai virsmai augant grafito branduoliams (1.8 pav., b). Įvairių cheminių elementų skirtingos fizikinės savybės nulemia segregacijos reiškinį, kuris pasižymi tam tikru cheminės sudėties skirtumu mikrolygyje, kai grūdų paviršiuje vyksta kai kurių cheminių elementų arba junginių išsiskyrimas. Šis reiškinys turi įtaką ir mechaninėms savybėms.

Trečioji esminė fazė yra liejinio tūrio sumažėjimas dėl skysto ir sustingusio ketaus tankio skirtumo. Tai turi įtaką liejinio matmenims ir sudaro sąlygas stingimo tuštumų atsiradimui. Tuštumų atsiradimo procesas yra ne tik terminės, bet ir slėginės prigimties. Kai liejimo kanalai sustingsta, stingimo procesas liejinio viduje vis dar tęsiasi ir slėgis dar nesustingusio metalo dalyje krinta – atsiranda tuštumos (1.9 pav.).



1.9 pav. *Stingimo tuštumos (a) ir dendritai jų paviršiuje (b)*

Stingimo tuštumos aplinkoje pritrūksta skysto metalo, todėl tuštumos paviršiuje dendritinė struktūra sutinkama ypač dažnai, o grūdai susiformuoja nevisiškai. Tai neigiamai atsiliepia medžiagos mechaninėms savybėms tuštumos aplinkoje ir prisideda prie neigiamos stingimo tuštumos įtakos konstrukcinio elemento stiprumui. Aukštas tūrio sumažėjimo laipsnis apsunkina matmenų pasikeitimo įvertinimą ir daro prielaidą sudėtingų vidinių įtempių atsiradimui po aušinimo.

1.2.3. Porėtumo ir stingimo tuštumų įvertinimas ir išvengimas

Siekiant nustatyti stingimo tuštumų buvimą liejiniuose, plačiai taikomi defektoskopiniai neardančios kontrolės metodai. Jeigu defektas yra liejinio paviršiuje, taikomi optinis-vizualinis bei kapiliarinis metodai. Esant defektui tam tikrame gylyje, plačiai paplito ultragarsinis, radiografinis, miltelinis, sūkurinių srovių ir kiti metodai. Deja, dažnai tuštumos pavojinguose liejinio skerspjūviuose yra tokios mažos, kad jų negalima aptikti, tačiau jos gali lemti gaminio eksploatacines savybes. Dideli liejinių gabaritai taip pat sunkina neardančios kontrolės technologinės įrangos naudojimą.

Taikomi sudėtingi kokybės nustatymo ir eksploatacinių savybių tikrinimo bandymai neretai yra brangūs. Siekiant ištirti lydinių polinkį sudaryti stingimo tuštumas, liejyklose naudojami specialios formos bandiniai, sudaromos tūrinių pokyčių diagramos skirtingos cheminės sudėties lydiniams ir kt. Analizuojant defektus ir tobulinant jų išvengimo būdus, kuriami įvairūs projektavimo būdai, padedantys nustatyti optimalią liejinio konstrukciją ir liejimo technologiją. Didelę įtaka stingimo tuštumų atsiradimui turi aušinimo greitis. Priklausomai nuo liejinio formos, atliekami technologiniai skaičiavimai, kurie leidžia parinkti tinkamą aušinimo greitį, atsižvelgiant į ketaus tūrinį pokytį mažėjant temperatūrai.

Iš kitos pusės, net jei ir įmanoma aptikti defektą, kokybės standartai dažnai numato tik kokybinį porėtumo įvertinimą. Kartais taikomi subjektyvūs vertinimai, kurie negali užtikrinti defektinio gaminio eksploatacinių savybių atitikimo numatytiems. Pažymėtina, kad pasikartojančios tuštumos yra aptinkamos lengviau ir gali būti įvertinamos patikimiau nei atsitiktiniai tuštumų atvejai.

Eksploatacinių savybių įvertinimas, naudojamas serijinės gamybos metu, padeda nustatyti tam tikras leistinas defektų dydžio ir kiekio ribas bei nustatyti porėtumo ir stingimo tuštumų įtaką gaminio kokybei. Tai sudaro pagrindą konstrukcinių ir technologinių skaičiavimų tobulinimui, tačiau yra sunkiai įgyvendinama stambiagabaričių detalių atveju, kai gaminamos detalės dažnai yra unikalios. Atsižvelgiant į liejinių masę, kuri gali siekti dešimtis ir net šimtus tonų, ypač svarbu yra užtikrinti optimalią gaminio konstrukciją. Nepagrįstai didelių atsargos koeficientų taikymas riboja projektavimo objekto formos ir

masės optimizavimą. Didesni skerspjūviai, masės prieaugis, geometrinių formų pakeitimas gali lemti liejimo tuštumų atsiradimą, kurio būtų išvengta mažesniuose konstrukcinėse elementuose. Šis dydžio ir saugumo santykis yra sunkiai įvertinamas ir dažnai remiamasi palyginimo duomenimis.

Optimalių liejimo ir aušinimo sąlygų paieškai taikomi ir kompiuteriniai metodai. Šiuo metu taikomi modernūs liejimo technologijos procesų tyrimams skirti kompiuteriniai būdai, naudojantys skaitinius terminius kriterijus. Tai leido sukurti ir pritaikyti stingimo proceso modelius ir tuo pačiu labai pagerinti liejimo našumą ir kokybę. Įvertinant metalo stingimo kryptis ir ištirpusių dujų įtaką, naudojami patobulinti stingimo modeliai, pagrįsti skysto metalo tekėjimo ir slėgio susidarymo dėsningumais. Kaip tuštumų prevencijos technologinė priemonė, perspektyvūs yra slėginio maitinimo kanalai.

Nagrinėjamų defektų atsiradimo priežasčių eliminavimas leistų smarkiai pagerinti produkcijos kokybę, jos eksploatacinius rodiklius ir patikimumą. Pagrindinis tuštumų išvengimo būdas – tinkamas liejimo formos konstrukcijos ir gamybos technologijos sudarymas ir užtikrinimas. Iš taikomų technologinių priemonių reikėtų paminėti:

- Naudoti aukštos kokybės priedus su pastovia chemine sudėtimi ir mažu neigiamą poveikį liejinių mikrostruktūrai turinčių elementų (Mn, S, V, Mo, Ti, Cr ir kt.) kiekiu;
- Taikyti efektyvų bazinio ketaus apdorojimo procesą, kuris užtikrintų cheminės sudėties pastovumą, aukštą modifikatorių įsisavinimo lygį bei efektyvų metalo šilumos panaudojimą;
- Sumažinti laiką tarp modifikavimo ir liejimo;
- Naudoti tinkamą maitinimo kanalų išdėstymą, siekiant tobulesnės gaminio ir liejimo kanalų formos, kuri užtikrintų liejimo procesą be turbulencijos bei liejinio tolygų stingimą ir aušinimą;
- Kontroliuoti šlakų ir oksidų patekimą ir atsiradimą, naudoti filtrus, valyti technologinę įrangą;
- Naudoti apsaugines priemones, sausus įrankius ir formavimo mišinį, liejimo formos ventiliaciją;
- Tiksliau kontroliuoti anglies ir legiravimo elementų kiekius.

1.3. Daugiaciklio apkrovimo tyrimai

Analizuojant konstrukcijų gedimo ir irimo priežastis, susidurta su nuovargio reiškiniu, kai konstrukcijas veikiančios pasikartojančios apkrovos akivaizdžiai

neviršydavo statinio stiprumo ribos, tačiau konstrukcija suirdavo. Nuovargis – laipsniškas pažeidimų kaupimosi procesas, veikiant kartotinai kintamiems įtempiams, dėl kurio atsiranda plyšys ir konstrukcinis elementas suyra. Šiuo metu laikoma, kad net iki 80 % eksploatacinių irimo atvejų galima sieti su įvairiomis nuovargio atmainomis (kontaktiniu, terminiu, korozijos nuovargiu ir pan.). Pastebėta, kad defektai turi didžiulę įtaką konstrukcijų statiniam ir cikliniam stiprumui. Nustatyta, kad dalis defektų egzistuoja medžiagoje nuo pat pradžių dėl medžiagos gavybos proceso netobulumo (mechaninis ir cheminis nevienalytiškumas) bei atsiranda konstrukcinio elemento gamybos proceso metu (įvairios įpjovos, įdubos, įbrėžimai, neleistina deformacija, formos ir matmenų neatitikimas ir pan.). Tačiau visa tai nereiškia, kad konstrukcijų elementai turi neišvengiamai suirti. Įsivyravo požiūris, kad kuriant konstrukcijas yra būtina taikyti kontroliuojamo irimo proceso prielaidą. Reikia nustatyti, kiek ir kokie defektai yra leistini konstrukcijai, atsižvelgiant į jos paskirtį ir eksploatacijos sąlygas.

Nuovarginio stiprumo problematikai skirta per 100 tūkst. mokslinių darbų. Klasikiniais laikomi A. Griffith, Y. Murakami, L. Coffin, N. A. Machutov, V. Troščenko ir daugelio kitų autorių darbai. Lietuvoje nuovarginio stiprumo aktualijas tiria M. Daunys, A. Žiliukas, A. Bražėnas, G. Medekšas, M. K. Leonavičius, A. Krenevičius, M. Šukšta, Ž. Bazaras ir kiti tyrinėtojai. Irimo proceso tyrimus skaitiniais metodais atlieka R. Kačianauskas, E. Stupak, S. Stupak, J. Atkočiūnas ir kiti. Geležinkelio riedmenų automatinių sankabų stiprumo ir ilgaamžiškumo tyrimas pateikiamas darbe, kai liejamojoje sankabos detalėje yra tuštumos defektas (Daunys, Putnaitė, 2004).

Atliekant ciklinio irimo analizę, priimta išskirti šias eksploatacinio apkrovimo ciklų sritis:

$10^0 – 10^1$: surinkimas, paleidimas, bandymas, avarijos būsenos;

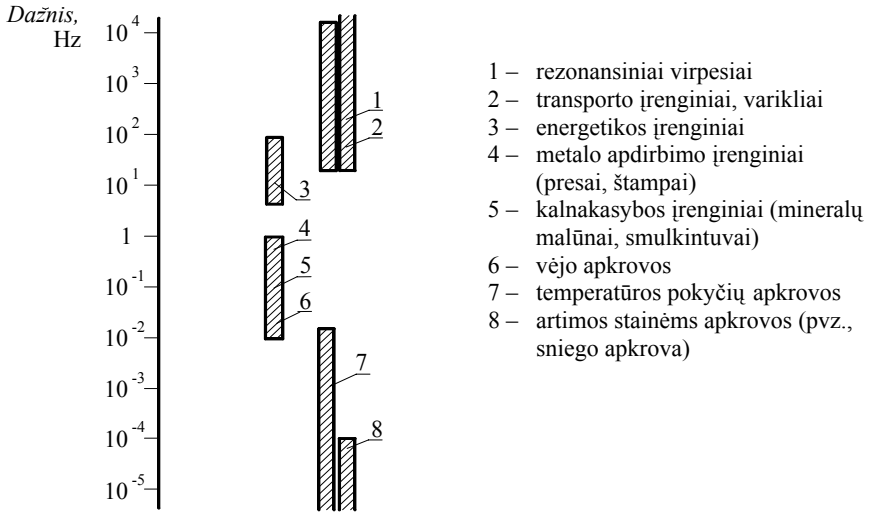
$10^2 – 10^3$: galingumo reguliavimas, apsaugos sistemų suveikimas, perėjimas prie normalios eksploatacijos;

$10^4 – 10^5$: technologiniai ciklai, reguliavimas;

$10^6 – 10^8$: technologiniai, transportavimo ciklai, slėgio pokyčiai, besisukančių dalių apsisukimų skaičiai;

$10^9 – 10^{12}$: vibracijos, vietinės pulsacijos, apsisukimų skaičiai, temperatūros ir slėgio pokyčiai.

Skirtingi vieno įrenginio konstrukciniai elementai gali būti veikiami skirtingo dažnio pasikartojančios apkrovos. Technikoje sutinkamų ciklinių apkrovų pavyzdžiai pateikiami 1.10 paveiksle. Ciklinės apkrovos veikia plačiame dažnio diapazone. Tai atsispindi ir sąlyginiame ciklinės irimo mechanikos suskirstyme į mažaciklę ir daugiaciklę.



1.10 pav. *Ciklinių apkrovų pavyzdžiai*

Ciklinėje irimo mechanikoje laikoma, kad metalinių konstrukcinių medžiagų nuovargis, esant 10^0–10^{12} ciklų skaičiui, turi 6 būdingas sritis:

$10^0 – 10^1$: infraciklinis (dekaciklinis) dinaminis, statinis ir kvazistatinis irimas esant avaringoms arba katastrofinėms būsenoms dėl pirminių ir antrinių paleidžiančių veiksnių (didžiausi σ_{max} ir amplitudiniai $\sigma_a = \Delta\sigma/2$ įtempių reikšmės viršija takumo (σ_y) ir stiprumo (σ_{max}) ribas;

$10^0 – 10^3$: mažaciklis (hektociklinis) kvazistatinis arba nuovarginis irimas esant didelėms mikroplastinėms deformacijoms irimo zonoje makrostruktūriniame lygyje (įtempių amplitudė $\sigma_a >> \sigma_y$);

$10^3 – 10^5$: mažaciklis (kilociklinis) nuovarginis irimas esant palyginti mažoms makroplastinėms deformacijos irimo zonoje makrostruktūriniame lygyje ($\sigma_{0,2} \le \sigma_a \le \sigma_y$);

$10^5 – 10^8$: klasikinis daugiaciklis (megaciklinis) nuovarginis irimas esant mikroplastinėms deformacijos irimo zonoje mikro- ir makro tūriuose ($\sigma_a \le \sigma_{0,2}$);

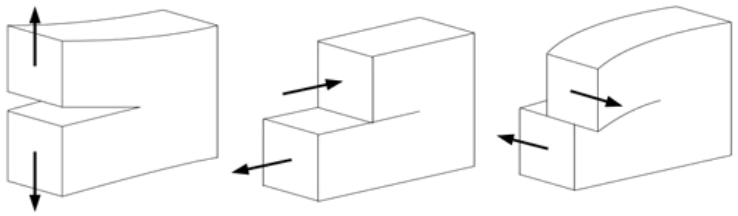
$10^8 – 10^9$: nuovarginis hiperciklinis (gigaciklinis) nuovarginis irimas prie padidinto ciklų skaičiaus esant mikroplastinėms deformacijos irimo zonoje mikrotūriuose ($\sigma_a \le \sigma_{0,2}$);

$10^{10} – 10^{12}$: hipernuovarginis (teraciklinis) irimas prie labai didelio ciklų skaičiaus irimui formuojantis mikrostruktūriniame lygyje ($\sigma_a << \sigma_{0,2}$).

Šiuo metu vis dar aktualūs yra daugelis nuovarginio irimo klausimų. Tarp jų – didelio ir labai didelio ciklų skaičių nuovargis. Šie klausimai reikalauja ilgai trunkančių bandymų, jų rezultatų analizės, gigaciklio nuovargio mechanizmų tyrimo.

1.4. Tiesinė irimo mechanika

Kadangi šis darbas remiasi tiesinės irimo mechanikos prielaidomis, trumpai apžvelgsime naudojamas sąvokas ir dėsningumus. Vientiso kūno irimas pasižymi negrįžtamu vienos dalies atskirimu nuo kitos dalies, sudarant laisvąjį paviršių. Plyšiu vadiname geometrinį reiškinį, susidedantį iš kūno dalis skiriančių paviršių ir plyšio fronto, pasižyminčio labai mažu užapvalinimo spinduliu. Plyšio paviršius gali būti atvaizduojamas poslinkių lauku $[[u_i]] = u_i^+ - u_i^-$. Pagal jėgos pridėties kryptį plyšio atžvilgiu išskiriamos 3 tipinės irimo formos (1.11 pav.).



I forma	II forma	III forma
$[u_1] = 0$	$[u_1] \neq 0$	$[u_1] = 0$
$[u_2] \neq 0$	$[u_2] = 0$	$[u_2] = 0$
$[u_3] = 0$	$[u_3] = 0$	$[u_3] \neq 0$

1.11 pav. *Tipinės irimo formos*

I tipinė forma: poslinkiai yra statmeni plyšio plokštumai;

II tipinė forma: poslinkiai yra lygiagretūs plyšio plokštumai ir statmeni pridėtų jėgų krypčiai;

III tipinė forma: poslinkiai yra lygiagretūs plyšio plokštumai ir pridėtų jėgų krypčiai.

Atliekant poslinkių ir įtempių plyšio viršūnėje analizę, tiesinėje irimo mechanikoje laikoma, kad plyšio viršūnėje įtempiai yra begaliniai. Irwin‘as pasiūlė įtempių intensyvumo koeficiento sąvoką, kuri kiekybiškai įvertintų įtempių singuliarumo intensyvumą. Statikos (arba kvazistatikos) sąlygomis šie koeficientai siejami tiek su singuliariais įtempiais, tiek su poslinkiais:

$$K_I = \lim_{r\to 0}\sqrt{2\pi}\ \sigma_{22}(\theta=0) = \lim_{r\to 0}\frac{\mu}{k+1}\sqrt{\frac{2\pi}{r}}\left\|u_2(\theta=\pi)\right\|, \tag{1.1}$$

$$K_{II} = \lim_{r\to 0}\sqrt{2\pi}\ \sigma_{12}(\theta=0) = \lim_{r\to 0}\frac{\mu}{k+1}\sqrt{\frac{2\pi}{r}}\left\|u_1(\theta=\pi)\right\|\ , \tag{1.2}$$

$$K_{III} = \lim_{r\to 0}\sqrt{2\pi}\ \sigma_{23}(\theta=0) = \lim_{r\to 0}\frac{\mu}{4}\sqrt{\frac{2\pi}{r}}\left\|u_3(\theta=\pi)\right\|\ . \tag{1.3}$$

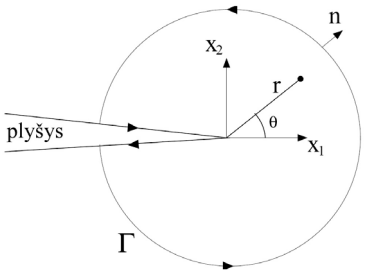
čia (r, θ) – taško padėtis polinėse koordinatėse (1.12 pav.), u_i – taško poslinkis, k – Kolosovo konstanta (Anderson, T.L., 1995):

$$k = \begin{cases} 3-4\nu, \\ \dfrac{3-\nu}{1+\nu}. \end{cases} \tag{1.4}$$

čia ν – Puasono koeficientas.

Termodinaminio požiūrio į kūną su plyšiu iliustracija pateikta 1.12 paveiksle. Vienas pirmųjų irimo mechanikos mokslinių darbų autorius Griffith'as, pasiūlęs susieti energijos, reikalingos plyšio augimui, pokytį su naujai atsirandančio paviršiaus energija ir specifiniu medžiagos paviršiaus rodikliu γ:

$$dW = 2\,\gamma\,dA\,. \tag{1.5}$$

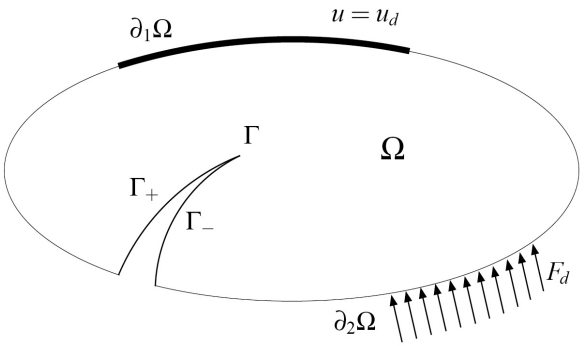


1.12 pav. *Geometriniai parametrai plyšio viršūnėje*

Pritaikius šią išraišką ir I termodinamikos dėsnį 1.13 paveiksle pavaizduotai terpei, gaunama:

$$\frac{\partial E_i}{\partial t} + \frac{\partial K}{\partial t} = P_{ext} + Q - 2\,\gamma\,\frac{\partial A}{\partial t}\,, \tag{1.6}$$

čia E_i yra vidinė energija, K – kinetinė energija, P_{ext} – išorinių jėgų galia, Q – suteikta šiluma.



1.13 pav. *Energetiniai parametrai plyšio aplinkoje*

Vidinės energijos pokytis gali būti pateiktas šia formule:

$$\frac{\partial E_i}{\partial t} = Q + \frac{\partial W_{tampr}}{\partial t}, \quad \text{kai} \quad \frac{\partial W_{tampr}}{\partial t} = \int_\Omega \sigma : \mathbf{D}\, d\Omega, \tag{1.7}$$

čia W_{tampr} yra tampriojo deformavimo energija, σ – Koši įtempių tenzorius, **D** – deformacijų tenzorius. Kai tūrinių jėgų nėra, išorinių jėgų galia gali būti užrašoma taip:

$$P_{ext} = \int_{d\Omega_2} F_{ext} \frac{\partial u}{\partial t} dS, \tag{1.8}$$

čia F_{ext} – išorinės paviršinės jėgos, u – poslinkių laukas. Taigi, formulė (1.8) gali būti pateikta taip:

$$\frac{\partial W_{tampr}}{\partial t} + \frac{\partial K}{\partial t} = \int_{d\Omega_2} F_{ext} \frac{\partial u}{\partial t} dS - 2\gamma \frac{\partial A}{\partial t}. \tag{1.9}$$

Laikant, kad plyšio neaugimo sąlyga yra kinetinės energijos nedidėjimas, gauname:

$$\int_{d\Omega_2} F_{ext} \frac{\partial u}{\partial t} dS - \frac{\partial W_{tampr}}{\partial t} - 2\gamma \frac{\partial A}{\partial t} \le 0. \tag{1.10}$$

Laikydami, kad A yra vienintelis kintamasis dydis šioje išraiškoje, ji gali būti pateikta taip:

$$\left(\int_{d\Omega_2} F_{ext} \frac{\partial u}{\partial A} dS - \frac{\partial W_{tampr}}{\partial A} - 2\gamma \right) \frac{\partial A}{\partial t} \le 0. \tag{1.11}$$

Kadangi plyšio augimas yra negrįžtamas procesas, galima užrašyti:

$$\frac{\partial A}{\partial t} \geq 0 . \tag{1.12}$$

Taigi, galioja nelygybė:

$$\int_{d\Omega_2} F_{ext} \frac{\partial u}{\partial A} dS - \frac{\partial W_{tampr}}{\partial A} - 2\gamma \leq 0 . \tag{1.13}$$

Atpalaiduojamos energijos G kiekis:

$$G = \int_{d\Omega_2} F_{ext} \frac{\partial u}{\partial A} dS - \frac{\partial W_{tampr}}{\partial A}. \tag{1.14}$$

Pagal Griffith‘o plyšio augimo kriterijų, galimos trys būsenos:

$G < 2\gamma$: plyšys neauga;
$G = 2\gamma$: plyšys atsiranda ir auga stabiliai;
$G > 2\gamma$: plyšys auga nestabiliai.

Įstačius poslinkių formulę (1.1-1.3) į išraišką (1.14), gauname energijos išraišką per įtempių intensyvumo koeficientus :

$$G = \frac{k+1}{8\mu}\left(K_I^2 + K_{II}^2\right) \tag{1.15}$$

1968 m. Rice pasiūlė integralo, nepriklausomo nuo integravimo kontūro, sąvoką. Laikant, kad plyšys auga x_1 kryptimi, J-integralas užrašomas:

$$J = \int_{\Gamma}\left(Wn_1 - \sigma_{ik} n_k \frac{\partial u_i}{\partial x_1}\right) ds, \tag{1.16}$$

čia Γ – kontūras plyšio viršūnės aplinkoje (integravimo kelio kryptis - prieš laikrodžio rodyklę), n yra normalė, nukreipta iš kontūro Γ (1.14 pav.), u_i – i-toji poslinkių lauko komponentė, W - deformacijos energija, lygi:

$$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} , \tag{1.17}$$

čia σ_{ij} ir ε_{ij} yra įtempių ir deformacijų tenzorius. Tokiu būdu, Rice nurodė lygybę tarp atpalaiduojamos energijos kiekio ir J-integralo.

Gaunamas ryšys tarp J-integralo, atpalaiduojamos energijos kiekio G ir įtempių intensyvumo koeficientų K_I (kai $K_{II} = 0$):

$$J = G = K_I^2 \begin{cases} \dfrac{1-\nu^2}{E} & \text{esant triašiam įtempių būviui,} \\ \dfrac{1}{E} & \text{esant dviašiam įtempių būviui.} \end{cases} \tag{1.18}$$

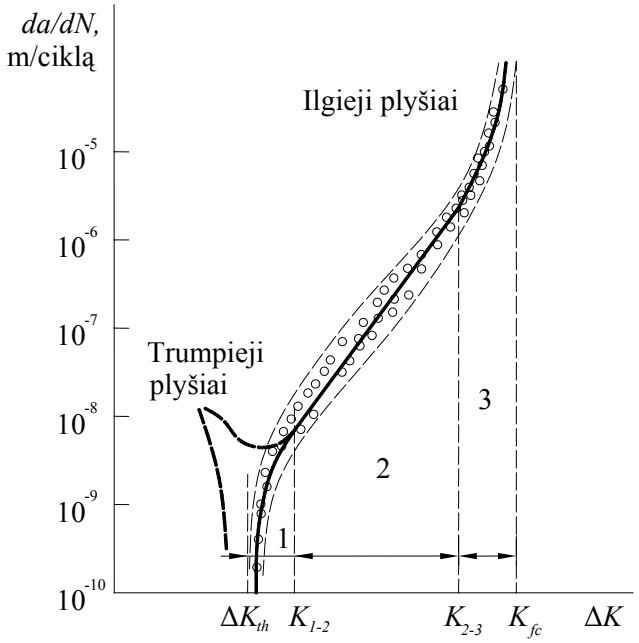
Nuovarginio irimo mechanikoje (plyšių mechanikoje) parametrai, nusakantys įtempių ir deformacijų būvį plyšio viršūnėje tampriajame kūne ir nulemiantys šio plyšio plitimo dėsningumus, yra įtempių intensyvumo koeficientas K ir apkrovimo ciklo asimetrijos koeficientas $R = K_{min} /K_{max}$. Irimo mechanikos parametras K įvertina apkrovos pridėtį ir dydį, kūno bei plyšio formą ir dydį. Taigi, tiriant nuovarginio irimo dėsningumus plyšio plitimo stadijoje, pakanka naudoti šio plitimo greičio *da/dN* priklausomybę nuo įtempių intensyvumo koeficiento skirtumo $\Delta K = (1 - R) K_{max}$ arba didžiausio įtempių intensyvumo koeficiento K_{max} :

$$\frac{da}{dN} = V = f\left(K_{\max}, K_{\min}/K_{\max}, C, m\right), \tag{1.19}$$

čia a – plintančio nuovarginio plyšio ilgis, N – apkrovimo ciklo skaičius, C ir m – konstantos.

Nuovarginio plyšio plitimo greičio kreivę nusakantys parametrai kiekybiškai išreiškia medžiagos atsparumą cikliniam pleišėjimui esant įvairiems plyšio plitimo greičiams. Tipinė kinetinė nuovargio diagrama (1.14 pav.), sudaryta logaritminėje skalėje, iš kairės pusės yra ribojama ribiniu įtempių intensyvumo koeficiento dydžiu ΔK_{th} (pleišėjimo slenksčiu), žemiau kurio plyšys nebeauga (arba priimama, kad toks lėtas augimas yra priimtinas); iš dešinės – kritiniu įtempių intensyvumo koeficientu (cikliniu irimo tąsumu) K_{fc}, kurį pasiekus, įvyksta staigus bandinio irimas. Sąlyginai diagramą galima suskirstyti į tris būdingus ruožus: vidurinį ruožą 2, aprašoma tiese, ir kraštinius kreivalinijinius ruožus su žemais (apytiksliai mažiau 10^{-8} m/ciklą – ruožas 1) ir aukštais (maždaug daugiau nei 10^{-6} m/ciklą – ruožas 3) nuovarginio plyšio plitimo greičiais.

Ruože 1, dar vadinamame mažų greičių ruožu, didelę įtaką daro medžiagos mikrostruktūra, pagrindinių įtempių ir aplinkos rodikliai. Nuovarginio stiprumo bandymus reglamentuojančiuose standartuose priimama, kad plyšys neplinta, kai jo plitimo greitis yra žemesnis nei 10^{-10} m/ciklą. Projektuojant įrenginius, kurių praktinis ilgaamžiškumas viršija 25 metus, tokia riba gali būti nepakankama, todėl aktualus yra nuovarginio stiprumo tyrimas esant apatinei ribai 10^{-12} m/ciklą, kuri atitiktų ilgesnį eksploatavimo laiką (25–50 metų) (Leonavičius, Petraitis, Šukšta et al., 2006).



1.14 pav. *Kinetinė nuovargio diagrama*

Mikrostruktūros poveikis sumažėja ruože 2 (vidutinių greičių ruože), bet išryškėja apkrovimo ir aplinkos rodikliai. Kuo statesnė yra tiesė 2 ruože (tai sietina su skirtingomis m reikšmėmis lygtyje 1.19), tuo greičiau plinta nuovarginis plyšys šioje medžiagoje.

Galutinio irimo (ir didelių nuovarginio plyšio plitimo greičių) ruože 3 didelę įtaką turi kūno storis, medžiagos mikrostruktūra ir pagrindinių įtempių dydis (Ritchie, 1999).

Stipriajame ketuje, prieš susidarant magistraliniam nuovarginiam plyšiui, atsiranda didelis mikroskopinių plastinės deformacijos taškų kiekis. Šie taškai tampa mikroskopinių nuovarginių plyšių atsiradimo židiniais. Šį reiškinį sukelia grafito branduoliai, mikrostruktūros defektai ir vidinės tuštumos (pvz., tuštumos ir poros). Esant ciklinei apkrovai, kai didžiausi įtempiai yra kiek žemesni už ciklinį stiprumą, nuovarginiai plyšiai atsiranda, bet neplinta toliau už tam tikrą ilgį (pirmieji darbai – Frost ir Dugdale, 1957). Tokie neaugantys plyšiai parodo, kad ciklinis stiprumas nėra ribiniai įtempiai, prie kurių nuovarginiai plyšiai neatsiranda, bet nurodo medžiagos gebą priešintis atsiradusių plyšių plitimui. Tuo atveju, kai stipriajame ketuje plyšys atsiranda grafito branduolio aplinkoje, galima laikyti, kad įtempiai pačiame branduolyje yra maži palyginus su matricoje kylančiais įtempiais. Ribiniai įtempiai, prie kurių nuovarginiai plyšiai atsiranda, bet neplinta, yra 2–3 % mažesni nei ciklinio stiprumo riba (Murakami, 2002).

Šiuo metu naudojama nemažai skirtingų ir dažnai prieštaringų irimo modelių. Vienas iš jų, pakankamai pagrįstai ir paprastai aprašantis nuovarginio irimo procesą stipriajame ketuje, remiasi išankstinio irimo koncepcija. Laikoma, kad artėjant nuovarginio plyšio frontui, plyšio viršūnėje suformuojama išankstinio irimo zona, kurioje atsiranda ir vystosi trumpieji plyšiai. Nagrinėjant stipriojo ketaus ciklinį stiprumą, mažo dydžio tuštumos galėtų būti vertinamos kaip trumpieji plyšiai. Kadangi tokio dydžio defektų įtaka yra sietina su trumpųjų plyšių nagrinėjimu, dėmesys turi būti skirtas trumpųjų plyšių irimo mechanikai. Siekiant ištirti liejimo tuštumų stipriojo ketaus konstrukcinėse elementuose įtaką cikliniam stiprumui, būtina išnagrinėti šių tuštumų poveikį nuovarginio irimo mechanizmui medžiagoje. Geometriniai ir mikrostruktūriniai nevientisumai (intarpai, tuštumos, grūdo sienelės, karbidų ir kitų nepageidautinų cheminių junginių pėdsakai), galbūt turintys sąlyginai nedidelę įtaką ilgiems plyšiams, gali stipriai paveikti trumpųjų plyšių augimo kryptį ir greitį, nes jų dydžiai yra apytiksliai vienodi. Nuovarginių plyšių augimo rodikliai yra tiriami naudojant bandinius, kuriuose plyšio gylis gali siekti keliasdešimt milimetrų, tuo tarpu inžineriniu požiūriu gali būti svarbūs net ir tie plyšiai, kurių matmenys yra kur kas mažesni.

Lyginant su ilgaisiais, trumpieji plyšiai turi du esminius skirtumus. Pirma, trumpiems plyšiams galioja kita neplitimo sąlyga, nes tiesinės irimo mechanikos prielaida, kad esant įtempių intensyvumo koeficientui mažesniam nei pleišėjimo slenkstis ΔK_{th}, plyšiai neplinta, negalioja. Antra, trumpieji plyšiai gali plisti net iki 100 kartų greičiau už ilguosius, esant toms pačioms apkrovimo sąlygoms. Taigi, reikia atsižvelgti į tai, kad trumpieji plyšiai apsunkina konstrukcinio elemento ciklinio stiprumo įvertinimą (Pearson, 1975).

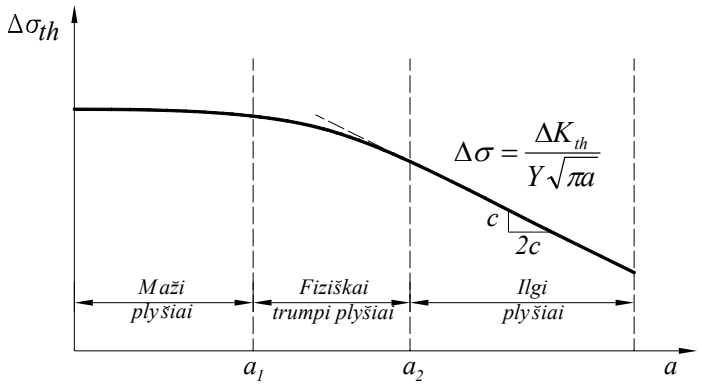
Trumpųjų plyšių augimas ir palyginimas tarp trumpųjų augančių ir neaugančių plyšių gali būti pavaizduotas diagramoje (Kitagawa, Takanashi, 1976), kuri parodo, kad yra toks kritinis plyšio dydis, žemiau kurio pleišėjimo slenkstis sumažėja, kartu sumažindamas plyšio ilgį. Patobulinta trijų pakopų plyšio augimo diagrama, pasiūlyta Ellyin‘o (1997), pateikta 1.15 paveiksle.

Plyšiai, ilgesni už a_2, vadinami ilgais ir jų augimas gali būti pavaizduotas tiesinės irimo mechanikos dėsningumais bei Paris‘o diagrama. Plyšiai, trumpesni už a_1, savo augimui reikalauja didesnės nei ciklinė stiprumo riba, įtempių amplitudės.

Siūloma tokia trumpųjų plyšių klasifikaciją (Suresh, Ritchie, 1984):

- Mikrostruktūriškai trumpi plyšiai, kai plyšio ilgis yra panašaus dydžio kaip ir medžiagos mikrostruktūros grūdas. Šioje augimo pakopoje plyšio augimas daro stiprią įtaką mikrostruktūrai ir, esant įtempiams, mažesniems nei ciklinė stiprumo riba, yra sustabdomas mikrostruktūros barjerais (plyšio ilgis dažnai neviršija 0,1 mm);

- Mechaniškai trumpi plyšiai – plyšio ilgis yra artimas plastiškumo zonai, susidarančiai plyšio viršūnėje (stipriajam ketui pirmos dvi sąvokos yra artimos dėl mažo plastinės zonos dydžio);
- Fiziškai trumpi plyšiai – plyšio ilgis yra didesnis už grūdo ar plastiškumo zoną, tačiau jis neviršija 1...2 mm;
- Chemiškai trumpi plyšiai – tokie, kurie galėtų būti nagrinėjami tiesinės irimo mechanikos pagrindu, tačiau jų augimo greičiai yra aukštesni dėl išorinės aplinkos sukeltos korozijos.



1.15 pav. *Trijų plyšio augimo pakopų diagrama*

1.5. Stipriojo ketaus ciklinio irimo proceso analizė

Didelė stipriojo ketaus konstrukcinių elementų dalis suyra veikiant ciklinėms apkrovoms, kai atsiranda ir plinta nuovarginis plyšys. Viena įdomiausių ir perspektyviausių irimo mechanikos sričių yra nuovarginio irimo tyrimas realiose konstrukcinėse medžiagose.

Stipriojo ketaus daugiaciklis stiprumas tebėra aktualus mokslinis klausimas. Nagrinėjant plyšio plitimą, reikia atsižvelgti į tai, kad skirtinguose plyšio vystymosi etapuose (atsiradimo, stabilaus augimo ir galutinio irimo) gali veikti skirtingi irimo mechanizmai. Ketaus nuovarginio irimo proceso tyrimas apjungia visapusišką išorinių ir vidinių veiksnių analizę. Nagrinėjant ketaus su rutuline grafito forma nuovarginį irimą, yra svarbu ištirti medžiagos vidinę sandarą ir jos ypatumus. Reikia atižvelgti į gavybos ir tolimesnio apdirbimo proceso poveikį medžiagos struktūrai.

Stipriojo ketaus nuovarginis irimas turi tam tikrą plyšių atsiradimo ir plitimo specifiką, atsirandančią dėl ypatingos medžiagos sandaros. Medžiagos irimo mechanizmo supratimas ir kiekybinis irimo parametrų įvertinimas įgalina

tobulinti ciklinio stiprumo skaičiavimo metodikas, skirtas patikimai nustatyti konstrukcijų ilgaamžiškumą. Tai prisideda ir prie konstrukcinių medžiagų ir jų gavybos technologinio proceso tobulinimo.

Stipriajame ketuje, kaip ir kai kuriose kitose medžiagose (aukšto stiprumo aliuminio lydiniuose, liejamuosiuose plienuose) stebimas grūdelinis nuovarginio plyšio plitimas. Šio ketaus nuovarginio irimo mechanizme galima išskirti keletą pakopų, kurios yra bendros daugumai metalinių konstrukcinių medžiagų:

- Mažųjų plyšių atsiradimas ir plitimas;
- Trumpųjų plyšių atsiradimas ir plitimas;
- Nuovarginio plyšio plitimas iki galutinio konstrukcinio elemento suirimo.

Rutulinė grafito intarpų forma sušvelnina įtempių ir deformacijų būvį grafito intarpo aplinkoje. Tačiau dėl žymaus grafito ir matricos medžiagos mechaninių rodiklių skirtumo, galima vertinti stipruįį ketų kaip sąlyginai nevientisą medžiagą, kurioje fazių rodikliai daro didelę įtaką nuovarginio irimo procesui. Nors stipriojo ketaus atveju išskirtinos bendros plyšio atsiradimo ir vystymosi pakopos, jos turi tam tikrų ypatumų, būdingų tik šiai medžiagai. Todėl panagrinėkime stipriojo ketaus nuovarginio irimo mechanizmą detaliau.

1.5.1. Mažųjų plyšių atsiradimas ir plitimas

Eksploatavimo metu ciklinė apkrova medžiagos kristaluose sukelia pasikartojančius įtempius. Mikrotūryje plyšio užuomazgų susidarymą aiškina dislokacijų teorija. Mažų plyšių atsiradimo mechanizmas grindžiamas dislokacijų kaupimusi, kuris sukelia vietinių įtempių padidėjimą. Dėl ciklinių įtempių atsiranda ir plinta dislokacijos plokštumose, kur tangentiniai įtempiai yra didžiausi. Kai kuriuose kristaluose įtempiai lieka sukelia plastines deformacijas, nors nominalieji įtempiai skerspjūvyje mažesni už tamprumo ribą. Nuovarginio irimo atsiradimui (plyšių susidarymui) yra būtina tam tikra mikroskopiniame lygyje atsirandanti plastinė deformacija, kuri pasireiškia dislokacijų slinkties juostomis, išeinančiomis į paviršių. Tokių dislokacijų juostų atsiradimas dar nėra irimas, nes tai – grįžtamas procesas. Jau po palyginti nedidelio ciklų skaičiaus dislokacijos kaupiasi tam tikrose augančiose nuovarginėse slydimo plokštumose, sudarydami slinktis. Šiose slydimo plokštumose slinktys pasireiškia iškilumų (ekstruzijų) ir įdubų (intruzijų) atsiradimu, kuris yra vertinamas kaip submikroskopnio plyšio atsiradimo pradžia. Mažų plyšių atsiradimas slydimo juostose, grūdų sienelėse, intarpuose sukelia savotišką mikroporėtumą, turintį įtaką tolimesniam plyšio augimui. Įrodytas ikikritinio mažo plyšio augimo išankstinio irimo zonoje, kur apkrova sudaro tik 40 % tos, kuriai esant stebimas magistralinio plyšio augimas (Monchoux, 1997).

Perėjimas nuo pažeidimų kaupimosi prie mažų plyšių atsiradimo yra sunkiai tiriamas sudėtingas procesas. Šis procesas baigiasi mažo plyšio atsiradimu, kai, pasiekus tam tikrą kritinį dislokacijų skaičių, plyšio atsiradimas tarp grūdo paviršiaus ir dislokacijų slydimo juostos sumažina sistemos energiją. Iš kitos pusės, grūdo sienelėse ir fazių paviršiuose taip pat atsiranda mikroskopiniai plyšiai (šis procesas ypač pasireiškia esant aukštesnėms temperatūroms dėl skirtingų fazių skirtingų mechaninių savybių). Šie procesai sukelia medžiagos fizikinių savybių pasikeitimą esant ciklinei apkrovai, kai medžiagos stiprumas padidėja arba sumažėja.

Įvairios mikrostruktūros anomalijos ir patys grafito intarpai yra natūralios mažų plyšių atsiradimo vietos. Lygiagrečiai su grafito intarpais, mikroplyšiai atsiranda ir porų bei tuštumų aplinkoje. Literatūroje aptariami skirtingi rodikliai, nulemiantys mažų plyšių atsiradimą. Pirma, tai plyšių židinių nuosavi rodikliai – dydis ir forma, antra – jų padėtis tarp panašių objektų ir paviršiaus atžvilgiu. Kai atstumas tarp tuštumų yra mažas, pastebima, kad plyšių atsiradimas paspartėja. Žinomi trys pagrindiniai trumpųjų plyšių atsiradimo mechanizmai: matricos irimas, atsirandant dislokacijoms ir slydimo plokštumoms; intarpo ir matricos sukibimo vietos irimas; intarpo irimas (Monchoux, 1995). BEM analizė parodė, kad Mises‘o įtempiai ekvatoriaus srityje yra didžiausi ir sukelia plastiškumo reiškinį. Tuo tarpu intarpų viršūnėse įtempiai yra daug mažesni ir nesukelia grafito ir matricos dekohezijos (atkibimo).

Mažų plyšių atsiradimo procesas prasideda nuo pat ciklinio apkrovimo pradžios ir pasiekia maksimumą po 100–150 tūkst. ciklų. Tačiau artėjant 10^6 ciklų, mažų plyšių kiekis artėja prie tam tikros ribos, po kurios nebedidėja. Atsiradus mažiems plyšiams, galimi du atvejai: arba jie plis ir sukels medžiagos irimą, arba neplis. Antrasis atvejis gali būti susietas su atsparumo riba, kai mažų plyšių neplitimas yra svarbesnis nei jų atsiradimas. Plastinėje zonoje plyšio viršūnėje po cikline apkrova atsiranda vidiniai liekamieji gniuždymo įtempiai. Esant apkrovai, žemesnei nei tam tikra riba, irimo paviršiai lieka suspausti ir plyšys neplinta. Šis reiškinys aiškina neplintančių plyšių atsiradimą. Nemažai autorių tyrė mažų plyšių neplitimą esant įtempiams, mažesniems nei patvarumo riba. Literatūroje sutinkama prielaida, kad, kai mikrostruktūros sandarą galima vertinti kaip nevienalytę (pvz., rutulinių grafito intarpai matricoje), mažo plyšio atsiradimą ir plitimą galima tirti irimo mechanikos pagrindu. Gaunamos pleišėjimo slenksčio mažiems plyšiams reikšmės yra 2–3 mažesnės už mikroskopu stebimas reikšmes.

1.5.2. Trumpųjų plyšių atsiradimas ir plitimas

Jeigu maži plyšiai apibūdinami kaip besivystantys vieno grūdo ribose, tai trumpieji plyšiai išeina iš atskiro grūdo ribų ir plinta medžiagos mikrostruktūros

lygyje Kai mažo plyšio ilgis pasiekia intarpo dydį ir cikliškai apkrautoje sityje susidaro daugelis mažais plyšiais pažeistų grūdų, maži plyšiai ima plisti per matricą ir jungtis su gretimų intarpų mikroplyšiais į trumpus plyšius. Šio proceso metu plyšys kartais nustoja plisti, kol gretimų plyšių augimo poveikis nesudaro sąlygų tolimesniam plitimui. Trumpųjų plyšių plitimo procesui turi įtaką daugelis veiksnių: atstumai tarp gretimų plyšių židinių, grūdų tarpusavio išsidėstymo ypatumai, mikrostruktūros sandara. Didesnio nei dislokacijos masto struktūrinių darinių (mikrostruktūros barjerų – tarpgrūdelinių sienelių, sukeliančių plastiškumo efektą; intarpų) vaidmuo yra dvejopas: iš vienos pusės, jie yra silpnos vietos ir tampa plyšių ir irimo šaltiniu; iš kitos – stabdo irimą. Dėl sudėtingai vykstančio besikeičiančios krypties irimo proceso šioje nuovarginio plyšio augimo zonoje stebimas labai sudėtingas lūžio paviršiaus reljefas

Kai medžiagoje yra tuštumų, jos daro papildomą įtaką trumpųjų plyšių augimui, nes gali būti vertinamos kaip iš anksto egzistuojantys plyšiai. Kritiniu tuštumos dydžiu laikomas ~100 μm, nes tokios ir didesnės tuštumos aplinkoje yra daug didesnė tikimybė plintančio trumpojo plyšio atsiradimui.

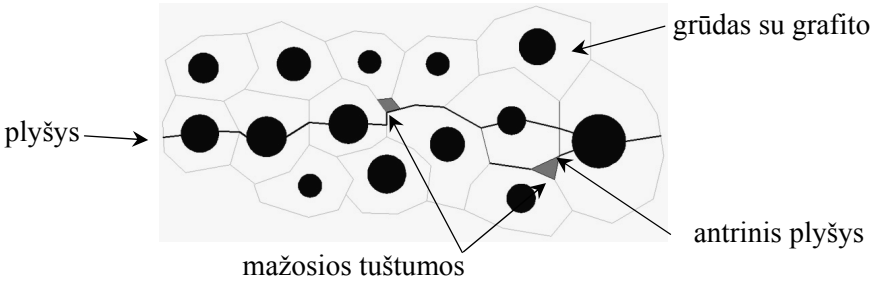
Trumpųjų plyšių plitimas lydymas pakartotino plyšio augimo stabdymo ir pagreitėjimo procesu. Literatūroje sutinkama fraktografinė analizė rodo, kad atsiradusių trumpųjų plyšių plitimas vyksta pagal grūdelinį irimo mechanizmą (Monchoux, 2000). Tačiau kai kada aptinkami ir tarpgrūdelinio trūkio pėdsakai, kai irimas vyksta grūdų pasienio sluoksnyje. Pažymėtina ir tai, kai austemperizuotam ketui dažnai pastebimas mažų plyšių stabdymas smulkesnės matricos mikrostruktūrinių barjerų dėka.

Žinoma, kad trumpiems plyšiams pleišėjimo slenkstis mažėja mažėjant plyšio ilgiui ir didelę įtaką slenksčio reikšmėms turi plyšio užsivėrimo efektas. Plyšio užsivėrimas atsitinka dėl liekamųjų plastinių deformacijų plastinėje zonoje arti plyšio viršūnės. Tiesinėje irimo mechanikoje naudojama efektyvaus įtempių intensyvumo koeficiento ΔK_{eff} sąvoka, kai nagrinėjama tik ta ciklo dalis, kuriai esant, plyšys yra visiškai atsivėręs. Grūdas, kuriame atsirado mažas plyšys, neturi ilgą laiką trunkančių plastinių deformacijų poveikio ir neužsidaro tiek, kiek užsidaro didesnio dydžio plyšys. Taigi, kai mažas plyšys užsidaro nevisiškai, įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės yra didesnės ir plyšio plitimo greitis taip pat yra didesnis.

1.5.3. Ilgųjų plyšių plitimas

Vykstant nuovarginiam irimui, ilgasis plyšys auga atsirandančių jo viršūnėje mažų plyšių sąskaita, kurie, besijungdami tarpusavyje, sudaro kritinio dydžio mažą plyšį, kuris savo ruožtu jungiasi su magistraliniu plyšiu. Stipriajam ketui su feritine, perlitine-feritine, perlitine bei beinitine struktūra būdingas irimo mechanizmas yra grūdelinis skilimas. Esant cikliniam apkrovimui, periodiškai susidaro nauji irimo paviršiai. Jeigu nuovarginio plyšio plitimo greitis atitinka

vidutinį kinetinės diagramos ruožą, kai kuriose medžiagose (pvz., aliuminyje ir kiek rečiau – stipriajame ketuje) irimo paviršiuje stebimos nuovarginės juostos arba griovelių juostos. Daugelis atsirandančių mažų plyšių židinių sukelia augančių besijungiančių mažų plyšių frontą, kuris jungiasi su ilguoju plyšiu. Esant medžiagoje įvairios kilmės tuštumoms, magistralinis plyšys gali jungtis su jomis. Tuštumos taip pat dažnai tampa antrinių plyšių atsiradimo židiniu (1.16 pav.). Šie antriniai plyšiai gali jungtis su magistraliniu plyšiu, tapti šuoliško plyšio plitimo priežastimi bei turėti įtaką magistralinio plyšio plitimo krypčiai bei greičiui.



1.16 pav. *Nuovarginis irimas stipriajame ketuje su tuštumomis*

Šioje nuovarginio irimo stadijoje susiformavęs magistralinis plyšys stabiliai plinta medžiagoje, kol įtempių intensyvumo koeficientas plyšio viršūnėje nepasiekia ciklinio tąsumo ribos, kai irimas ima vykti staigiai. Neretai aptinkami tarpgrūdelinio trūkio pėdsakai, kai irimas vyksta per grūdų tarpusavio atsiskyrimą grūdų sienelių paviršiumi. Taip atsitinka, jeigu grūdo forma ir padėtis magistralinio plyšio atžvilgiu yra palanki būtent tokiam irimo mechanizmui.

1.6. Stipriojo ketaus ciklinio stiprumo skaičiavimo problematika

Šiuolaikiniai mokslo ir technologijų pasiekimai leidžia padidinti resursą, nustatytą projektavimo metu taikant tradicinius reikalavimus ir pagrįstą ankstesnėmis skaičiavimų ir bandymų metodikomis. Šiam tikslui pasiekti reikia išspręsti eilę uždavinių, tarp kurių yra defektų poveikio konstrukcijos elemento resursui ir stiprumui įvertinimas. Tokie skaičiavimai turi būti grindžiami papildomais kompleksiniais analitiniais, skaitiniais ir eksperimentiniais tyrimais, kurie leistų detaliau ištirti medžiagos su defektais ciklinio stiprumo neapibrėžtumus.

Konstrukcinių elementų iš stipriojo ketaus ciklinis stiprumas priklauso nuo

daugelio veiksnių, kurie turi būti įvertinami taikant eksperimentinius duomenis projektavimo metu. Gamybos etape stengiamasi, kad stiprusis ketus turėtų didesnį perlito kiekį ir tolygesnę mikrostruktūrą su aukštu mažesnio dydžio grafito intarpų kiekiu, būtų be karbidų, stingimo tuštumų ir porėtumo, mikrostruktūros anomalijų. Specialus liejinio aušinimas ir tinkamas terminis apdorojimas pagerina mikrostruktūrą ir ciklinį stiprumą (Harding, 2007; Zanardi, 2005).

Didelių matmenų konstrukcijų elementuose plyšiai ypač pavojingi, kai jų dydis artimas kritiniam, nes suirimas dėl sukauptos tampriosios energijos įvyksta labai greitai. Šiuo metu išskiriami du pagrindiniai požiūriai į ilgaamžiškumo skaičiavimą – determinuotas ir tikimybinis (Yaacoub Agha, Berangei, Billardon et al., 1998). Taikant determinuotą požiūrį, naudojami turimi duomenys apie medžiagų atsparumą pleišėjimui, techninių sistemų apkrovimą ir defektus. Resurso prognozavimas atliekamas naudojant pleišėjimo saugos koeficientus. Liekamasis resursas nustatomas skaičiuojant atsiradusių arba galimų plyšių saugų dydį. Saugos koeficientai gali būti grindžiami determinuotai, remiantis nuovarginio plyšio plitimo bandymų rezultatais; skaičiavimuose naudojami ribiniai dydžiai: įtempių intensyvumo koeficientas, deformacijų intensyvumo koeficientas, plyšio atsivėrimas arba *J*-integralas. Liekamojo resurso prognozavimui galima taikyti ir determinuotą, ir tikimybinį skaičiavimo metodus. Tačiau, kai analizuojamos konstrukcijos yra išskirtinės, pvz., didelių gabaritų malūnai, statistinių duomenų gali pritrūkti. Todėl determinuotas požiūris yra perspektyvus, ypač derinant jį kartu su diagnostinėmis priemonėmis (metalo būvio analize, defektų nustatymu ir pan.).

Taikant tikimybinę skaičiavimo metodiką, projektavimo metu galimų defektų įvertinimas grindžiamas statistiniais medžiagų mechaninių savybių, apkrovų, poveikių ir defektoskopijos rezultatų tyrimais. Porėtumo atveju plačiai taikomi tikimybiniai metodai plyšio atsiradimui. Pirmas bandymas (Weibull, 1939) buvo paremtas tikimybiniu požiūriu į plyšį, esant cikliniam tolygiam apkrovimui. Pradiniai metalo defektai modeliuoti plyšiais, kurių dydis ir orientacija yra atsitiktiniai dydžiai (Batdorf, Crose, 1974). Evans ir Landon (1983) nagrinėjo kitą modelį taikydami panašias prielaidas. Plyšio stabilaus augimo modeliavimo bandymai yra atlikti panaudojant stochastines plyšio augimo lygtis (Sobczyk, 1986). Siekiant įvertinti konstrukcinio elemento ciklinį stiprumą, būtina žinoti pradinį defektų būvį ir jų savybių kitimą. Taip galima gauti apibendrintą plyšio atsiradimo tikimybės išraišką, kur tiesiogiai būtų įvertintas defektų pasiskirstymas.

Literatūroje sutinkama plyšio atsiradimo stipriajame ketuje, įvertinant pradinių plyšių pasiskirstymą, analizė. Laikoma, kad vienintelis plyšio šaltinis yra defektai; taigi, grafito intarpų įtaka plyšio atsiradimui nėra nagrinėjama. Iš kitos pusės, plyšio plitimas gali būti vertinamas iš trumpų plyšių plitimo pozicijų. Remiamasi plyšio plitimo dėsniais, gaunamais eksperimentais. Aptariami plyšio plitimo dėsningumai įvertinant defektų įtaką.

Stiprusis ketus dėl savo ypatingos vidinės sandaros gali būti vertinamas kaip nevienalytė medžiaga, kurioje grafito formos rutulinės intarpai yra trapūs su sąlyginai nedideliu sukibimu su stipresne matrica, o tuštumos yra erdvinės arba artimos plyšiui. Daroma prielaida, kad mažo plyšio augimo metu defekto plotas auga be formos pasikeitimų; taigi, redukuotas spindulys a yra vienintelis reikšmingas rodiklis, nagrinėjant mažo plyšio plitimo dėsningumą.

Defektai traktuojami kaip plyšiai, kurių geometrinė forma įvertinama bedimensiu koeficientu Y. Tada įtempių intensyvumo koeficientas:

$$K = Y\sigma\sqrt{a}\,, \tag{1.20}$$

čia σ – nominalūs normaliniai įtempiai.

Koeficiento Y reikšmės priklauso nuo pradinio defekto geometrijos. Atstumas nuo defekto iki konstrukcinio elemento paviršiaus taip pat gali būti įvertintas šiuo rodikliu.

Daugelyje praktinių situacijų galima tvirtinti, kad defekto dydis apsiriboja tam tikru dydžiu a_M. Ciklinės apkrovos atveju, ciklinių įtempių slenkstis gali būti apibrėžtas kaip mažiausia įtempių reikšmė, žemiau kurios plyšys neatsiranda (t. y. plyšio atsiradimo tikimybė yra lygi nuliui). Ciklinis įtempių slenkstis σ_{th} yra susijęs su ribiniu įtempių intensyvumo koeficientu K_{th}. Šio ryšio išraiška gali būti užrašyta taip:

$$\sigma_{th}(a_M) = \frac{K_{th}(a_M)}{Y\sqrt{a_M}}\,. \tag{1.21}$$

Šis dėsnis gali būti taikomas tais atvejais, kai tiriamas plyšio plitimas yra arti pleišėjimo slenksčio ribos. Daugiaciklio stiprumo atveju, per ilgą laiką plyšio židinio matmuo didėja nereikšmingai. Taip daroma prielaida, kad ribinio intensyvumo koeficiento K_{th} vystymasis priklauso tik nuo pradinio tuštumos dydžio a_0. Tačiau, kai plyšio dydis kinta tarp 10 ir 500 μm, atitinkančios K_{th} reikšmės priklauso nuo a_0 labai nedaug.

Taikant išdėstytą metodiką konkretaus stipriojo ketaus su tuštumomis cikliniam stiprumui tirti, keliasdešimtyje nuovarginių lūžių optiniu būdu nustatoma defektų forma bei dydis ir, panaudojus šiuos duomenis, - koeficientai, naudojami aukščiau pateiktose lygtyse. Nustatomos medžiagos mechaninės savybės: santykinė proporcingumo riba $\sigma_{0,2}$, stiprumo riba σ_u, tamprumo modulis E, kietumas, pleišėjimo slenkstis K_{th} ir smūginis tąsumas K_c. Skaičiavimų rezultatas – analitine formulė, aprašanti ΔK kitimą $da/dN - \Delta K$ diagramoje ir įvertinanti tuštumų įtaką.

Realūs konstrukciniai elementai, kurių dydis smarkiai viršija laboratorinių bandinių dydį, pvz., kalnakasybos įrenginių detalės, turi pastebimai žemesnį ciklinį stiprumą. Nagrinėjant stambiagabaričių konstrukcinių elementų stiprumą, verta atsižvelgti į šį reiškinį, vadinamą didumo efektu. Pataisos, naudojamos

stambių konstrukcinių elementų projektavimui, pateikiamos techninėje literatūroje. Murakami išskiria tokias pagrindines dydžio efekto priežastis: įtempių pasiskirstymo skirtumai įvairaus dydžio konstrukciniams elementams; didelių gabaritų detalių mikrostruktūriniai skirtumai; ciklinio stiprumo bandymų statistinių duomenų sklaida.

1.7. Skaičiuojamųjų metodų apžvalga

Skaičiuojamieji metodai yra plačiai taikomi nuovarginio irimo tyrimuose ir inžineriniuose ciklinio stiprumo skaičiavimuose. Jie leidžia nustatyti įvairius irimo mechanikos rodiklius, tarp jų ir įtempių intensyvumo koeficientą. Plyšio plitimo uždaviniui spręsti naudojama eilė sukurtų skaičiuojamųjų metodų. Vienas iš sunkumų, su kuriuo susiduriama sprendžiant nuovarginio stiprumo uždavinį, yra teisingas apkrovimo rodiklių nustatymas, siekiant gauti patikimesnius ir artimus realiems skaičiavimų rezultatus. Labiausiai paplitęs būdas – cikliškai kintančios apkrovos taikymas. Tačiau tikrieji konstrukciniai elementai dažnai dirba esant gana sudėtingam apkrovimo ciklui, kurį yra sudėtinga pakartoti. Sprendimas suskirstyti apkrovimo ciklus daro skaičiavimus sudėtingesniais.

Vis platesnis problemų ratas, kurių tyrimui yra taikomi skaičiuojamieji metodai, yra pagrįstas jų plačiu taikymu pramonės procesų tyrimui. Nors tiesinės irimo mechanikos uždaviniai yra suformuluoti pakankamai paprastai, matematines formuluotes ir jų sprendimas yra sudėtingi dėl matematinių sunkumų nagrinėjant ir sprendžiant įvairias lygtis, ypač erdvinio uždavinio atveju. Šių uždavinių sprendimui yra sukurti įvairūs metodai, iš kurių galima išskirti šias kryptis:

Baigtinių elementų metodas

Labiausiai paplitęs ir šiuo metu vis dar vystomas mechanikos uždavinių sprendimo metodas yra baigtinių elementų metodas. Irimo mechanikoje, kaip ir kitose inžinerinėse disciplinose, baigtinių elementų metodas buvo ir yra plačiai vystomas ir taikomas. Šis metodas turi daug privalumų. Jis turi aiškią mechaninę prasmę ir gali būti taikomas sudėtingos geometrinės formos kūnams.

Sprendžiant tiesinės irimo mechanikos uždavinius, susiduriama su tikslių įtempių intensyvumo koeficiento reikšmių nustatymo problema. Nors šis metodas pakankamai aiškiai aprašo plyšį, tačiau turi dvi esmines problemas. Pirma, singuliari poslinkių lauko plyšio viršūnėje prigimtis verčia naudoti labai tankų tinklą, norint tiksliai atvaizduoti medžiagos elgesį. Siekiant patikslinti skaičiavimo rezultatus, galima naudoti papildomus mazgus artimiausiuose plyšio viršūnei kraštiniuose elementuose. Tačiau norint teisingai atkurti singuliarų lauką plyšio viršūnėje, tinkamesni yra singuliarūs elementai. Šie elementai, turintys papildomus mazgus kraštinių ketvirčiuose arba perstumtus mazgus,

leidžia tiksliau atkurti poslinkių singuliarumą ir gauti tikslesnius skaičiavimo rezultatus, net esant retesniam baigtinių elementų tinklui.

Diskrečiųjų elementų metodas

Diskrečiųjų elementų metodas gali būti taikomas irimo mechanikos uždaviniams spręsti. Terpė yra vaizduojama diskretiniu pavidalu, jos elementai yra absoliučiai standūs diskretiniai elementai, susieti tarpusavio sąveikos jėgomis, pridėtomis sąlyčio taškuose.

Šis metodas taip pat tinka trumpųjų plyšių modeliavimui. Tarpgrūdelinių ryšių nutraukimas dėl ribinio dydžio defektų atsiradimo gali būti atvaizduojamas kaip gretimų elementų tarpusavio sąveikos nutraukimas. Tai leidžia ypač sėkmingai modeliuoti trapųjį irimą, kas yra sunkiai realizuojama BEM.

Betinkliai metodai

Labiausiai iš betinklių metodų, taikomų skaičiuojamojoje irimo mechanikoje, paplitęs yra laisvųjų Galerkino elementų metodas, pasiūlytas Belyčko. Pagrindinis šių metodų privalumas yra tai, kad nėra būtina diskretizuoti plyšį. Kontinuumas yra atvaizduojamas dalelėmis (arba mazgais), turinčiomis tam tikrą įtakos spindulį. Tokie tiesinės ir netiesinės irimo mechanikos uždavinių sprendimai duoda įdomių rezultatų. Tačiau dėl sudėtingų skaičiavimų jo taikymas kol kas yra ribotas.

Kraštinių elementų metodas

Šis metodas kol kas nėra dažnai taikomas irimo mechanikos erdvinių uždavinių sprendimui. Sprendžiami stačiakampių ir pusiau elipsinių normaliai apkrautų plyšių tampraus-plastinio stačiakampio paviršiuje. Įtempių intensyvumo koeficientai atitinkamiems tampriems uždaviniams yra nustatomi ribotai. Singuliarus sprendinio elgesys plyšio viršūnėje vertinamas nebuvo. Istoriniu požiūriu, šį metodą naudojantys programiniai paketai labiau taikomi dinaminiams uždaviniams spręsti. Yra žinomi vidinio elipsinio plyšio sprendimai, sutankinant tinklą K_I skaičiavimams plyšio viršūnėje. Šiose darbuose naudojamas programinis paketas reikalauja labai didelių skaičiavimo galingumų.

Prie skaitinių metodų priskirtini ir skaitinių metodų ir jų algoritmų kūrimas ir tobulinimas, taip pat jų kompiuterinė realizacija. Jie pasižymi universalumu ir gali būti plačiai naudojami įvairiems uždaviniams spręsti.

Irimo mechanikos uždavinio sprendimą sudaro tiesinio tampraus arba tampraus-plastinio uždavinio statinio sprendimas ir jo rezultatų apdorojimas papildomomis programinėmis priemonėmism, siekiant apskaičiuoti dominančius irimo rodiklius. Išanalizavus išvardytus skaičiavimo metodus ir atsižvelgiant į palyginti nedidelę plastinę zona plyšio viršūnės aplinkoje, buvo pasirinktas BEM.

Šiame darbe įtempių intensyvumo koeficiento nustatymo kompaktiniame bandinyje su defektų erdvinio uždavinio sprendimui pasirinkta programa ANSYS.

1.8. Apibendrinimas. Uždavinių formulavimas

Nuovarginio irimo procesas stipriajame ketuje priklauso nuo daugelio technologinių ir eksploatacinių veiksnių. Defektų, gaunamų gamybos technologinio proceso eigoje, analizė rodo, kad nevienalyčiai dariniai, ertmės, porėtumas ir kiti struktūros pažeidimai yra neišvengiami liejant stambias detales. Liejimo tuštumos yra vienas dažniausių gamybos defektų, jų įtaka hipercikliam stiprumui yra mažai ištirta.

Atlikta mokslinės literatūros apžvalga rodo, kad stipriojo ketaus su liejimo tuštumomis atsparumo cikliniam apkrovimui tyrimų nepakanka tam, kad būtų objektyviai vertinamas stambiagabaričių liejinių su defektais stiprumas ir ilgaamžiškumas. Eksperimentinių, analitinių ir skaitinių tyrimų visuma, skirta stipriojo ketaus su tuštumomis daugiacikliam stiprumui, leistų pagrįsti didelio gabarito detalių ciklinio stiprumo skaičiavimo metodus.

Tolimesniam tyrimui keliami šie uždaviniai:

1. Nustatyti tiriamų stipriojo ketaus rūšių statines mechanines ir ciklinio stiprumo savybes.
2. Eksperimentiškai nustatyti skirtingų stipriojo ketaus rūšių su liejimo tuštumomis pleišėjimo slenkstį.
3. Įvertinti liejimo tuštumų įtaką įtempių intensyvumo koeficiento intervalo ΔK ir plyšio plitimo greičio da/dN priklausomybei, atsižvelgiant į kintančius bandinio skerspjūvio geometrinius rodiklius.
4. Atlikti bandinių lūžių fraktografinę analizę ir ištirti liejimo tuštumų poveikį nuovarginio plyšio plitimui.
5. Ištirti įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymą bandinyje su plyšio pavidalo defektu.
6. Pasiūlyti stambiagabaričių konstrukcinių elementų su liejimo tuštumomis stiprumo skaičiavimo metodiką, pagrįstą bandinių tyrimo rezultatų analize.

2

Eksperimentinio tyrimo metodika

Šiame skyriuje pateikiama atlikto eksperimentinio tyrimo metodika. Aprašomi necentrinio tempimo kompaktinių bandinių paruošimas bei bandymų metodika atsparumo nuovarginio plyšio susidarymui ir plitimui. Aprašomos tyrimui naudotos bandymo mašinos ir įranga.

2.1. Eksperimento metodika

Eksperimentinė irimo mechanika, kaip irimo mechanikos pagrindinė dalis, tiria plyšių atsiradimo ir plitimo procesus kūnuose, veikiant mechaninėms apkrovoms, fizikiniams laukams ir aplinkai. Šios irimo mechanikos dalies eksperimentinė bazė yra įtempių ir deformacijų būvio plyšio viršūnėje analizės metodai, plyšio dydžio ir plitimo greičio metodai, fraktografiniai irimo paviršiaus tyrimo metodai siekiant nustatyti irimo mechanizmus ir irimo kinetiką, fizikinis išorinių eksploatacijos veiksnių įtakos modeliavimas. Prie taikomųjų eksperimentinės irimo mechanikos tyrimų priskirtinas konstrukcinių medžiagų rodiklių nustatymas atsparumo plyšio susidarymui ir plitimui, esant sąlygoms, modeliuojančioms realų fizikinį ir mechaninį poveikį konstrukcijoms.

Plintančio plyšio ilgio ir greičio matavimo principai pagrįsti plyšio sąveika su medžiagomis arba fizikiniais laukais, kuriamais nepriklausomai nuo irimo

proceso arba atsirandančiais dėl išorinės apkrovos. Tarp labiausiai paplitusių matavimo būdų reikėtų paminėti: optinį ir vizualų; tampraus paslankumo ir akustinės emisijos; elektros varžos ir elektros potencialų skirtumo; ferografijos ir magnetinį miltelinį; rentgeninį ir elektroninį mikroskopinį; skysčių; fraktografinį; pneumatinį.

Šiuo metu sukurta eilė metodų, leidžiančių įvertinti atsparumą plyšio susidarymui ir plitimui, kurie yra pagrįsti kūno su plyšiu ribinės pusiausvyros uždavinio sprendimu kartu su įtempių ir deformacijų būvio plyšio viršūnėje analize. Mechaninių bandymų metodika leidžia įvertinti atsparumą pleišėjimui esant įvairiems apkrovimo tipams ir irimo būdams. Jie apjungia atsparumo pleišėjimui rodiklių nustatymą metalams, virintinėms jungtims, bimetalams ir plonasienėms medžiagoms esant statiniam, cikliniam ir dinaminiam apkrovimui, valkšnumo, relaksacijos ir plyšio sustojimo būklei.

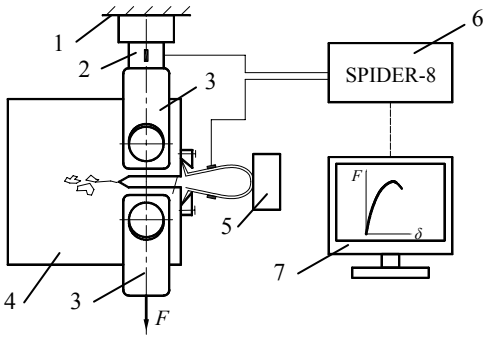
Atsparumo pleišėjimui rodikliai papildo kitus medžiagos mechaninės elgsenos rodiklius, nusakančius jo atsparumą irimui. Jie gali būti naudojami: medžiagų gavybos technologinių procesų tobulinimui; medžiagų lyginimui renkantis jas konstrukcinių elementų gamybai; konstrukcijų atsparumo ir ilgaamžiškumo skaičiavimams įvertinant jų eksploatacijos sąlygas, geometrinę formą ir defektų įtaką; konstrukcijų irimo ir avarijų analizei.

Sudėtingų inžinerinių sistemų gyvavimo laiko užtikrinimas yra aktuali inžinerinio mokslo problema. Konstrukcijų eksploatavimo moksliniai metodiniai klausimai reikalauja taikyti tokius stiprumo bei resurso kriterijus, kurie galėtų nusakyti konstrukcijų perėjimą prie ribinio (grėsmingo ir neleistino personalui ir aplinkai) būvio. Nagrinėjant įrenginius, kurių eksploatacijos laikas yra 25–50 metų (pvz., mineralų malūnus ir pan.), viena svarbiausių problemų tampa ciklinis stiprumas esant dideliam ciklų skaičiui. Būtina įvertinti ne tik eksploatavimą normaliomis, bet kartais ir ekstremaliomis sąlygomis.

Daugiaciklio apkrovimo sąlygomis konstrukcinių medžiagų irime skiriamos 2 pagrindinės stadijos. Pirmoje (po inkubacijos periodo) atsiranda ir vystosi mikronevienalytiškumai, kol vienas ar keli iš jų nepasiekia tam tikro kritinio dydžio, tampančio dominuojančiu ilguoju plyšiu. Antroje irimo stadijoje vyksta tolimesnis ilgojo plyšio augimas, kuris baigiasi konstrukcinio elemento laikančiosios galios praradimu, kartu su visišku suirimu. Antrosios stadijos indėlis į bendrą proceso trukmę kinta plačiose ribose ir priklauso nuo medžiagos prigimties, mikro- ir makrostruktūros, apkrovos rodiklių, kūno dydžio ir formos. Ypatingą reikšmę šiam procesui turi konstrukciniai, technologiniai ir struktūriniai įtempių koncentratoriai. Tačiau visada reikia atsižvelgti į tai, kad konstrukcijų elementai dažniausiai turi įvairaus lygio defektų, tarp jų ir plyšį. Veikiant darbinėms apkrovoms arba atsitiktinių perkrovų atveju tokie defektai sukelia plyšių vystymąsi ir konstrukcinių elementų irimą esant nominaliems įtempiams žemiau takumo arba patvarumo ribos. Atliekant bandinių su defektais ir bandinių be defektų nuovarginių bandymų rezultatų palyginamąją analizę, galima

kiekybiškai įvertinti tokių defektų įtaką konstrukcinių elementų cikliniam stiprumui.

Bandymo eigoje registruojami jėgos dydis, ciklų skaičius, plyšio atsivėrimas ir dydis. Bandinio formos kitimas fiksuojamas matuojant plyšio atsivėrimą ties bandinio kraštais, naudojant puslaidininkinį tenzometrinį jutiklį. Kompaktinio bandinio su liejimo tuštumomis nuovarginio stiprumo bandymo schema pateikta 2.1 paveiksle. Kompiuterinė matavimo sistema registruoja kintamosios jėgos dydį F ir plyšio atsivėrimą δ, o jų tarpusavio priklausomybės diagrama matoma monitoriaus ekrane. Analoginis (elektros srovės) signalas, proporcingas jėgos dydžiui, ateina iš dinamometro, o signalas, proporcingas plyšio atsivėrimui, - iš specialaus tenzometro. Atsiveriant plyšiui, didėja atstumas tarp bandinio įpjovos kraštų, kuris matuojamas naudojant tenzometro tampriuosius elementus su ant jų priklijuotais tenzometriniais jutikliais.

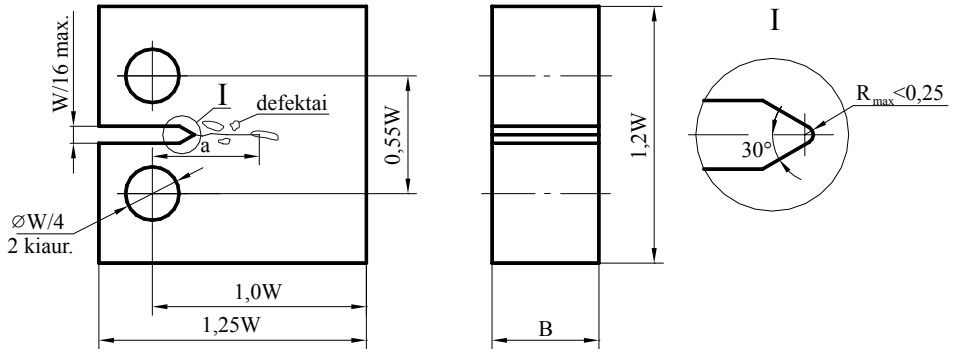


1 – bandymo mašinos korpusas;
2 – dinamometras;
3 – griebtai;
4 – kompaktinis bandinys su plyšiu;
5 – plyšio atsivėrimo tenzometras;
6 – analoginis-skaitmeninis keitiklis SPIDER-8;
7 – kompiuteris

2.1 pav. *Bandymo schema*

Plyšio plitimo greičio *da/dN* priklausomybės nuo įtempių intensyvumo koeficiento intervalo ΔK eksperimentiniam tyrimui panaudoti kompaktiniai necentrinio tempimo bandiniai. Taip gaunami kiekybiniai atsparumo plyšio augimui rodikliai, kurių vienas pagrindinių – pleišėjimo slenkstis ΔK_{th}. Standartas numato, kad plyšio neplitimo riba yra, kai *da/dN* santykis pasiekia 10^{-10} m/ciklą. Šių tyrimų ypatumas yra tai, kad pleišėjimo slenkstis nustatytas žemesnei *da/dN* reikšmei (maždaug iki $5 \cdot 10^{-12}$ m/ciklą), siekiant ištirti nuovarginį stiprumą, kai konstrukcijos eksploatavimo laikas viršija 25 metus.

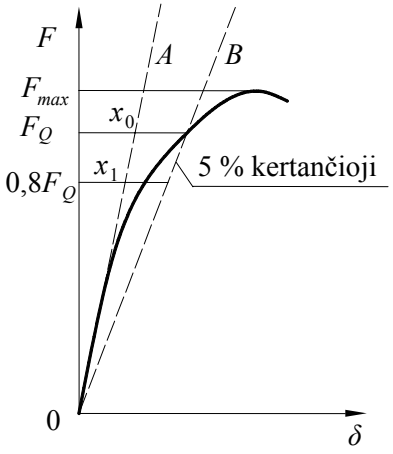
Pleišėjimo slenksčiui nustatyti taikoma reglamentuojama metodika (ASTM E-647-00) yra pakeista ir pritaikyta necentrinio tempimo bandiniams su defektais (CT), parodytų 2.2 paveiksle, tyrimui. Pagal standartą įvairiais metodais (optiniu, ultragarsiniu, magnetiniu ar kt.) nustatyti bandiniai su defektais yra nerekomenduojami eksperimentiniams bandymams. Apkrovimo jėga keičiama priklausomai ne tik nuo plyšio dydžio ir ciklų skaičiaus, bet ir nuo plyšio fronto ir defekto tarpusavio padėties. Pakeista bandinių su defektais bandymo rezultatų apdorojimo metodika.



2.2 pav. *CT bandinys*

2.1.1. Apkrovos parinkimas

Apkrovimo jėga neturi sukelti neleistinų plastinių deformacijų plyšio viršūnėje, nes tokiu atveju tiesinės irimo mechanikos prielaidų taikymas būtų nepagrįstas. Priklausomai nuo plastinės deformacijos dydžio, taikomi papildomi apribojimai. Plyšio atsivėrimo diagramoje F-δ braižoma liestinė OA, kuri atitinka tamprųjį deformavimą. Po to braižoma kertančioji tiesė OB, turinti 5 % mažesnį polinkio kampą, nei liestinė OA. Apkrovos ir plyšio atsivėrimo priklausomybę vaizduojanti kreivė susikerta kritinės apkrovos taške F_Q, kuris atitinka plyšio augimą 2 %. Siekiant išvengti neleistinai didelės apkrovos, kuri sukeltų per didelę plastinę deformaciją plyšio viršūnėje, apkrovos jėga ribojama dydžiu $0{,}8F_Q$, kai dydis x_1 yra nedidesnis už x_0 (2.3 pav.).



2.3 pav. *Apkrovimo jėgos parinkimo grafikas*

Bandymo metu apkrovimo jėga mažinama, siekiant nustatyti pleišėjimo slenkstį. Bandiniai su tuštumų sankaupa verčia papildomai mažinti jėgos dydį, nustatyta bandiniams be defektų.

2.1.2. Necentriškai tempiamų kompaktinių bandinių su tuštumomis pleišėjimo slenksčio nustatymas

Plyšio augimo matavimams naudojamas sąlyginai paprastas stebėjimo būdas – optinio mikroskopo pagalba. Rezultatai fiksuojami 0,1 mm tikslumų iš abiejų bandinio pusių, skaičiuojant vidurkinę reikšmę. Jeigu pastebimas tuneliavimo efektas, plyšio gylys skaičiuojamas per kelis taškus, siekiant įvertinti plyšio fronto kreivumą. Papildomai plyšio augimo registravimas atliekamas liuminescenciniu magnetiniu, dažų pėdsakų ir ultragarsiniu metodu.

Paruoštame CT bandinyje išauginamas išankstinis plyšys, kurio gylis turi būti ne mažesnis nei 0,10 W. Tuo siekiama sumažinti įpjovos kaip įtempių koncentratoriaus įtaką ir išauginti tolygų pradinį nuovarginį plyšį.

Pleišėjimo slenksčio nustatymo procedūra prasideda nuo bandinio apkrovimo tomis sąlygomis, kuriomis buvo išaugintas išankstinis plyšys. Mažinant pridedamą jėgą ΔF, tuo pačiu mažinamas įtempių intensyvumo koeficiento skirtumas ΔK. Taip atliekama, kol gaunama ΔK reikšmė prie dominančio da/dN arba kol gaunama žemiausia ΔK reikšmė. Standartas numato, kad laipsniškai mažinant jėgą ΔF, žingsnio dydis neturi viršyti 10 %, o plyšio augimas tarp šių žingsnių turėtų būti nemažesnis kaip 0,50 mm. Artėjant prie pleišėjimo slenksčio, jėgos pokyčiai tampa labai maži. Esant labai mažam plyšio plitimo greičiui, nuovarginis plyšys plinta šuoliais. Toks šuoliškas augimas susijęs su plastiškumo praradimu ir mažų plyšių atsiradimu viršūnėje. Kai mažų plyšių skaičius pasiekia kritinį, įvyksta šuoliškas plyšio plitimas. Plyšio gylio prieaugis gali sudaryti kelių grūdų dydį. Arti pleišėjimo slenksčio plyšio augimas 0,1 mm įvyksta maždaug per 0,5–3 mln. ciklų. Pleišėjimo slenkstis nustatomas naudojant tokią jėgos reikšmę, kai plyšio gylio augimas neberegistruojamas. Plyšio plitimo greitis nustatomas braižant liestinę eksperimentinei da-dN kreivei, atvaizduojančiai eksperimento metu gautus duomenis.

Įtempių intensyvumo koeficiento skaičiavimams naudota formulė:

$$\left.\begin{aligned} K &= \frac{F}{B\cdot\sqrt{W}}, \\ f(\lambda) &= \left[(2+\lambda)/(1-\lambda)^{3/2}\right]\varphi(\lambda),\ \lambda = a/W, \\ \varphi(\lambda) &= 0{,}866 + 4{,}64\lambda - 13{,}32\lambda^2 + 14{,}72\lambda^3 - 5{,}6\lambda^4. \end{aligned}\right\} \quad (2.1)$$

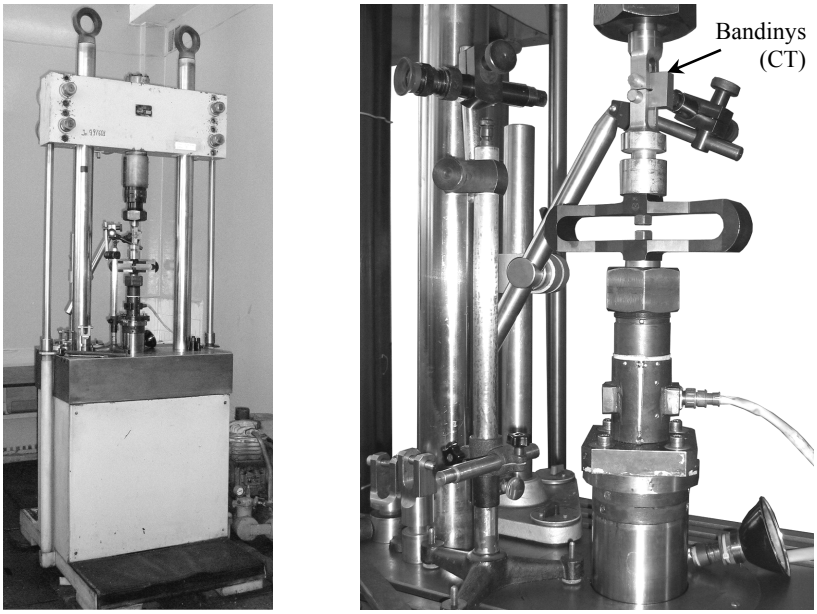
čia F – tempimo jėga, B – bandinio storis, W – bandinio bazinis atstumas, a – plyšio ilgis.

Gavus pakankamai įtempių intensyvumo koeficiento intervalo duomenų, atliktas kompaktinio bandinio su plyšiu statinio irimo bandymas, siekiant nustatyti irimo tąsumą K_{IC}, kuris kiekybiškai įvertina medžiagos savybes priešintis trapiajam suirimui. Naudota ASTM E 399-83 standarte pateikta metodika.

Reikalingas ciklų skaičius vienam bandiniui siekia: austemperizuotam ketui – nuo 11,4 iki 20,3 mln. ciklų, stipriajam perlitiniam ketui – nuo 10 iki 19,6 mln. ciklų. Tyrimai atlikti esant teigiamam asimetriniam apkrovimų ciklui prie $R \approx 0{,}09$.

2.2. Bandymų įranga

Bandymai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų atsparumo katedros Stiprumo mechanikos laboratorijoje, naudojant bandymų įrangą, pateiktą 2.4 paveiksle. Naudojamos universalios bandymų mašinos URS 20/6000 ir URS 50/50, skirtos medžiagos mechaninių savybių nustatymui, nuovarginio atsparumo bandymams tempimu gniuždymu ir lenkimu, esant normaliai temperatūrai ir kintamo arba pastovaus ženklo ašinei arba lenkimo apkrovai.



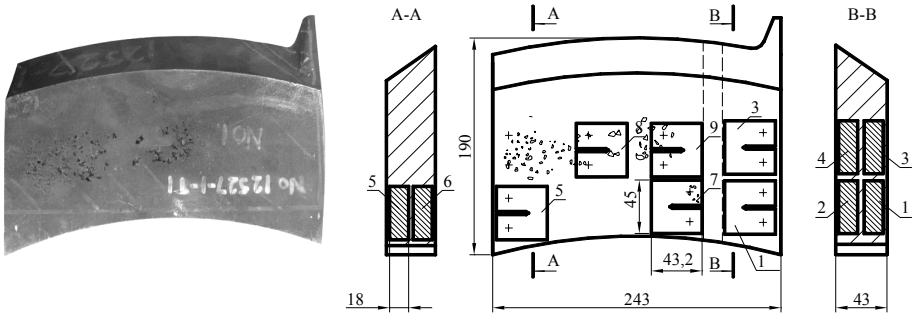
2.4 pav. *Ciklinių bandymų mašina URS 20/6000 ir CT bandinio apkrovimo įtaisas*

Bandymo mašinos ir įranga leidžia nustatyti norimus ciklinės apkrovos rodiklius bei sukurti bandymo režimo programą, kuri atitiktų realaus konstrukcinio elemento apkrovimo istoriją per jo eksploatavimo laiką. Reglamentuojamų reikalavimų standartas numato, kad apkrovimo jėgos dydis turi būti registruojamas ±2 % tikslumu. Naudojamos bandymo mašinos tenkina šią sąlygą ir registruoja jėgą 1 % tikslumu. Bandymai atlikti kambario temperatūroje. Plyšio gylis matuotas mikroskopu МИК-1 (×25–50). Plyšio prasivėrimas matuotas tenzometru DDS-10-1 (bazė 10 mm, tikslumas ±1,5 %). Bandymų duomenys registruojami kompiuterine matavimo sistema su analoginiu skaitmeniniu keitikliu SPIDER-8 kartu su duomenų registravimo ir tvarkymo programa KATMAN-EXPRESS. Preliminari liejimo tuštumų formos, matmenų ir išsidėstymo analizė atlikta ultragarsiniu metodu.

Bandinių medžiagos mikrostruktūros tyrimai daryti UAB „Kauno Energetikos remontas" Metalų ir suvirinimo tyrimų centro laboratorijoje. Lūžių nuotraukos skenuojančiu elektroniniu mikroskopu fotografuotos Lietuvos energetikos instituto Medžiagų tyrimų ir bandymų laboratorijoje.

2.3. Bandinių aprašymas

Tyrimui paruoštos 2 lietos plokštės iš skirtingų stipriojo ketaus rūšių – austemperizuoto ir stipriojo perlitinio ketaus. Austemperizuoto ketaus plokštė pagaminta Prancūzijoje („Ferry Capitain Comp." liejykloje) iš medžiagos, skirtos didelių krumpliaračių gamybai. Iš plokštės išpjauti kompaktiniai necentrinio tempimo bandiniai be tuštumų ir su tuštumomis laisvai pasiskirsčiusiomis bandinio tūryje. Perlitinio ketaus plokštė – Australijoje („Hoffman Comp." liejykloje) kartu su stambiagabaritėmis korpusinėmis detalėmis. Perlitinio ketaus plokštė ir bandinių išpjovimo schema pateikti 2.5 paveiksle. Šių plokščių cheminė sudėtis ir mechaninių savybių rodikliai pilnai atitinka realių konstrukcinių elementų rodiklius.



2.5 pav. *Paruoša-plokštė (kairėje) ir CT bandinių išpjovimo schema (dešinėje)*

Statinių mechaninių savybių nustatymui buvo pagaminti cilindriniai tempimo bandiniai (skersmuo 10 mm, bandomasis ilgis 30 mm). Tamprumo modulis E, stiprumo riba σ_u, sąlyginė takumo riba $\sigma_{0,2}$, santykinis pailgėjimas A_t, santykinis skerspjūvio susitraukimas ψ nustatyti eksperimentiškai, atlikus tempimo bandymą pagal ASTM E111-82 arba LST EN 10002-1/2003 naudojant bandymo mašiną TIRA test 2300.

Iš austemperizuoto ketaus plokštės paruošti 6 kompaktiniai bandiniai, kurių pagrindiniai matmenys $B = 25_{-1}$ ir $W = 50$ mm. 3 bandiniai turi vidines liejimo tuštumas, kai kur išeinančias į paviršių.

Iš perlitinio ketaus plokštės pagaminti 9 kompaktiniai bandiniai ($B = 18$ mm ir $W = 36$ mm). Tarp 9 bandinių 3 turi liejimo tuštumų paviršiuje ir tūryje.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Priklausomybės tarp plyšio plitimo greičio ir įtempių intensyvumo koeficiento intervalo sudarymui plyšio greitis mažinamas iki $v \approx 5 \cdot 10^{-12}$ m/ciklą tam, kad gautume pleišėjimo slenksčio reikšmes, kurios gali būti panaudotos stiprumo skaičiavimams hiperciklinėje srityje, siekiant padidinti įrenginių ilgaamžiškumą.
2. Reglamentuojama pleišėjimo slenksčio tyrimo metodika yra pakeista ir patobulinta taip, kad būtų tinkama medžiagos su liejimo tuštumomis tyrimui.
3. Bandinių gamybai panaudotos paruošos, lietos kartu su didelio gabarito detalėmis, atkartoja realių konstrukcijų elementų medžiagos mechaninių savybių rodiklius. Nuovarginis irimas nevienalyčiuose bandiniuose atspindi irimo proceso ypatumus, atsirandančius plintant plyšiui realiuose elementuose.
4. Necentrinio tempimo (CT) bandiniuose plyšio plitimui matuoti taikomi optiniai, liuminescenciniai magnetiniai, dažų pėdsakų ir ultragarsiniai metodai yra pagrįsti siekiant tiksliau nustatyti plyšio plitimą skerspjūvyje su defektais.
5. Siekiant nustatyti liejimo tuštumų poveikį cikliniam stiprumui, naudojami medžiagos ir nevienalytės medžiagos bandiniai.

3

Liejimo tuštumų įtakos plyšio susidarymui ir plitimui eksperimentinis tyrimas

Šiame skyriuje aptariami nevienalyčio stipriojo ketaus nuovarginio irimo eksperimentinio tyrimo eiga ir rezultatai. Pateikiama medžiagos mikrostruktūros analizė, statinės mechaninės savybės. Atliekama patvarumo eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė, nagrinėjama defektų įtaka nuovarginio plyšio plitimui. Analizuojamas rezultatų skirtumas stipriajam ketui su defektais ir be defektų.

Skyriaus medžiaga publikuota autoriaus straipsniuose [1A–5A].

3.1. Mikrostruktūra ir mechaninės savybės

Nevienalytiškumas detalės tūryje, kuris mažiau pastebimas plienuose, yra reikšmingas stipriojo ketaus savybėms, nes šios medžiagos mikrostruktūra yra pakankamai sudėtinga. Didelių gabaritų liejiniams yra technologiškai sudėtinga užtikrinti vienodas aušinimo sąlygas ir greitį, o kartu gauti vienalytę struktūrą. Aptinkama daug mikrostruktūros anomalijų ir defektų, kurie turi įtaką mechaninėms savybėms, o ypatingai – patvarumui.

Nustatant ketaus rūšį, reikia atsižvelgti į tai, kad daugumos šalių standartuose reglamentuojamos tik mechaninės stipriojo ketaus savybės, bet nenurodoma jo tiksli cheminė sudėtis. Tačiau kiekvienoje liejykloje,

priklausomai nuo technologinio proceso ypatumų, gaunamos mikrostruktūros ir mechaninės savybės šiek tiek skiriasi. Cheminės sudėties ypatumai (nedidelis žalingų priemaišų kiekis, švarumas nuo karbidų ir tarpmetalinių junginių) yra ypač svarbūs daugiaciklio stiprumo požiūriu, nes daro didelę įtaką ankstyvuose nuovarginio plyšio vystymosi etapuose. Mikrostruktūros ypatumai taip pat veikia atsparumo ciklinėms apkrovoms rodiklius.

3.1.1 Austemperizuotas ketus

Tyrimo objektas – austemperizuoto stipriojo ketaus plokštė, pagaminta kartu su didelio gabarito liejiniais (austenitizacija 950 ºC, austemperizacija 400 ºC, išlaikymas 50 min.). Tiriamo stipriojo ketaus bandinių cheminė sudėtis pateikta 3.1 lentelėje. Didesnis nei įprasta nikelio kiekis leidžia padidinti leistinąjį sienelės storį stambesnių detalių gamyboje.

3.1 lentelė. *Austemperizuoto ketaus cheminė sudėtis (%)*

C	Mn	Si	Mg	Cr	Cu	Mo	W	Ni
3,3	0,62	2,6	0,045	0,125	1,19	0,03…0,08	0,60	3,52

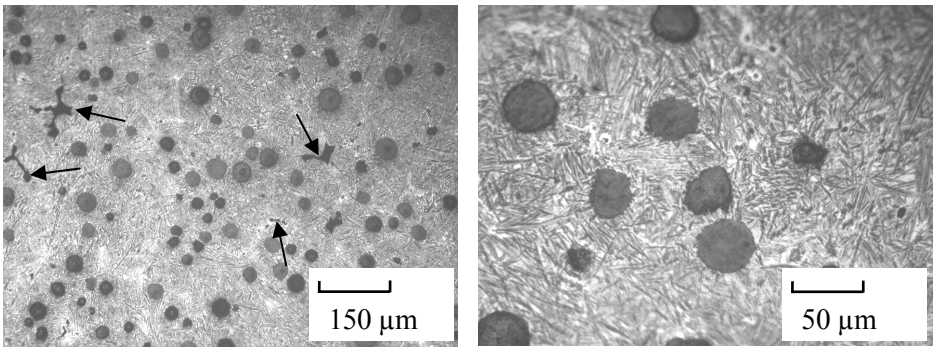
Mechaninių savybių nustatymui buvo pagaminti cilindriniai tempimo bandiniai. Nustatytos statinės mechaninės savybės pateiktos 3.2 lentelėje. Pagal standarte EN 1564 numatomas mechanines savybes šis ketus yra artimas stipriajam ketui EN-GJS-1000-5.

3.2 lentelė. *Austemperizuoto ketaus statinių mechaninių savybių rodikliai*

Bandiniai	E, GPa	σ_{pr}, MPa	$\sigma_{0,2}$, MPa	σ_u, MPa	A, %	BHN
1	152	422	661	954	1,95	356
2	148	437	649	995	2,4	360
3	147	438	673	933	1,8	363

Mikrostruktūros analizė rodo, kad ketus turi tipinę austemperizuotam ketui matricą, kurią sudaro martensito ir beinito mišinys kartu su liekamuoju austenitu ir ferito priemaišomis (3.1 pav.). Tokia matrica literatūroje anglų kalba dažnai vaidinama „ausferitu“ (angl. „ausferite“) ir užtikrina kiek aukštesnius šio ketaus plastiškumo rodiklius. Grafitas turi formą, artimą taisyklingai apvaliai. Grafito dydis – 20...50 μm, jų pasiskirstymas yra gana tolygus. Grafito intarpų koncentracija siekia 300 vnt/cm^2. Tai yra aukštas rodiklis, kuris turėtų mažinti stingimo tuštumų atsiradimo galimybę. Grafito intarpai apsupti siauro metalinio

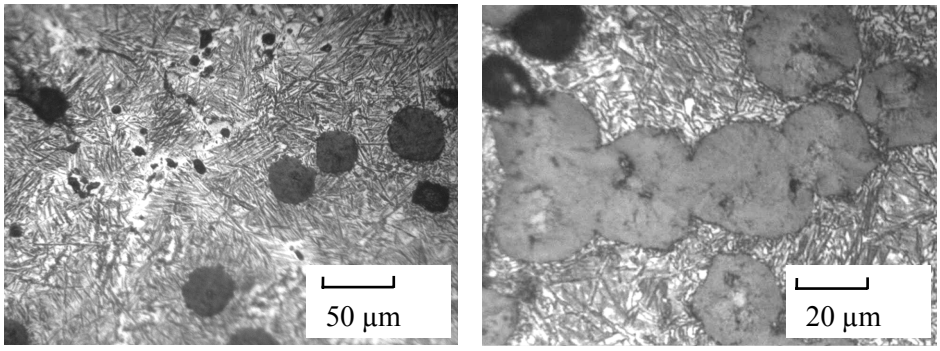
apvalkalo, kuris yra prisotintas silicio junginių. Metalinis pagrindas yra adatinis (beinitas, martensitas) su nedideliu liekamojo austenito kiekiu. Minimalus ferito kiekis tokiame ketuje yra būdingas ir pagrįstas terminio apdirbimo ypatumais. Smulkus struktūros grūdas užtikrina aukštas medžiagos stiprumo savybes. Tiriamoji struktūra priskirtina prie taip vadinamo „aukštojo“ beinito, kuris gaunamas prie aukštesnių terminio apdirbimo temperatūrų. Konstrukciniai elementai iš tokio ketaus pasižymi aukštu stiprumu bei smūginiu tąsumu ir palyginti dideliu santykiniu pailgėjimu.



3.1 pav. *Austemperizuoto ketaus mikrostruktūra. Liekamasis austenitas (šviesūs dariniai matricoje), aukštasis beinitas (tamsesnės adatos formos dariniai matricoje), stingimo tuštumos (parodytos rodyklėmis)*

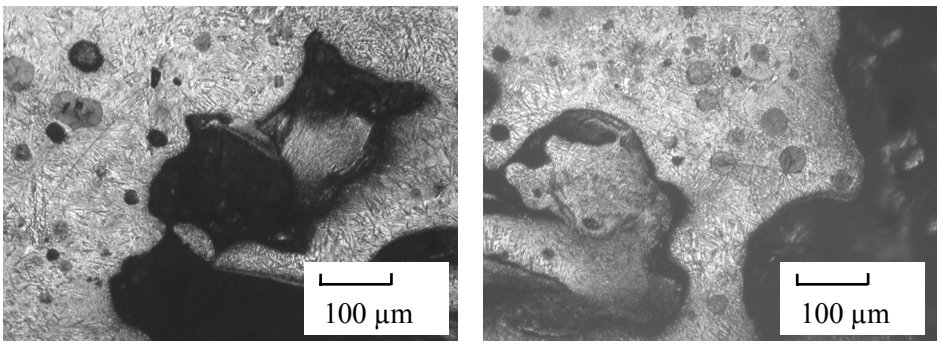
Mikrotuštumos (3.2 paveikslo kairėje) matricoje turi ypatingą svarbą nagrinėjant rutulinio grafito ketaus irimo procesą. Struktūroje pasitaiko mikrotuštumų, kurių dydis yra nuo 10 iki 80 µm. Pažymėtina, kad kuo mažesnės yra mikrotuštumos, tuo taisyklingesnė yra jų forma. Tačiau kai kur aptinkamos daug didesnės mikrotuštumos, kurių dydis viršija grafito intarpų dydį. Šios tuštumos prisideda prie spartesnio trumpų plyšių augimo ir gali daryti didesnę įtaką nei patys grafito intarpai. Tokių defektų buvimas mažina medžiagos ciklinį stiprumą. Tuštumos atsirado tarp grafito intarpų baigiamojoje liejimo stingimo fazėje, kai tūriniai pokyčiai yra didžiausi. Aptiktos ir tuštumų grandinės tarpgrūdelinėje erdvėje (3.2 paveikslo kairėje). Nuovarginis plyšys yra linkęs plisti per tokias ertmių sankaupas. Ši mikrostruktūros anomalija sudaro sąlygas vietiniam irimo mechanizmo pasikeitimui nuo grūdelinio prie tarpgrūdelinio.

Prie mikrostruktūros anomalijų priskiriamos ir grafito intarpų grandinių atvejis (3.2 paveikslo dešinėje). Ją sudaro keletas labai arti esančių arba susijungusių grafito intarpų. Dėl žemų grafito mechaninių rodiklių, tokia anomalija palygintina su didesnėmis stingimo tuštumomis. Ji sudaro sąlygas didesnių įtempių atsiradimui tokios anomalijos aplinkoje ir tampa trumpų plyšių šaltiniu.



3.2 pav. *Mikrostruktūros anomalijos austemperizuotame ketuje. Kairėje: mikrotuštumos matricoje. Dešinėje: kelių grafito intarpų susijungimas*

Ypatingą dėmesį reikėtų atkreipti į bandinių su tuštumomis mikrostruktūros analizę. Nustatyta bandinių su tuštumomis mikrostruktūra tuštumose pateikta 3.3 paveiksle.



3.3 pav. *Mikrostruktūra aplink tuštumas*

Tuštumos aplinkoje mikrostruktūra yra panaši į pagrindinio metalo. Tai yra būdinga vidinėms tuštumoms, nes aušinimo sąlygos liejinio viduje yra tolygesnės nei paviršiuje. Kai kur aptinkamos mažos tuštumos ir struktūros kryptingumo pėdsakai. Pažymėtina, kad grafito branduoliai aptikti ir tuštumos pakraštyje. Toks mikrostruktūros pastovumas reiškia, kad nuovarginis irimas tuštumose gali vykti pakankamai tolygiai. Tuštuma yra labai sudėtingos formos ir sudaryta iš gretimų ertmių, atskirtų plonomis sienelėmis. Tuštumų paviršiuje aptikti dendritiniai dariniai. Kartu tai sudaro sąlygas atsirasti vietiniam tarpgrūdeliniam irimo mechanizmui.

3.1.2. Stiprusis perlitinis ketus

Nustatyta perlitinio ketaus cheminė sudėtis pateikta 3.3 lentelėje. Lyginant su austemperizuotu ketumi, perlitinis ketus turi daugiau anglies, mažiau vario, nikelio, molibdeno, mangano. Magnio ir silicio kiekiai yra apytiksliai vienodi.

3.3 lentelė. *Stipriojo perlitinio ketaus cheminė sudėtis (%)*

C	Mn	Si	Mg	Cu	Cr	Mo	Ni
3,7	0,15	2,94	0,08	0,24	0,036	0,02	0,14

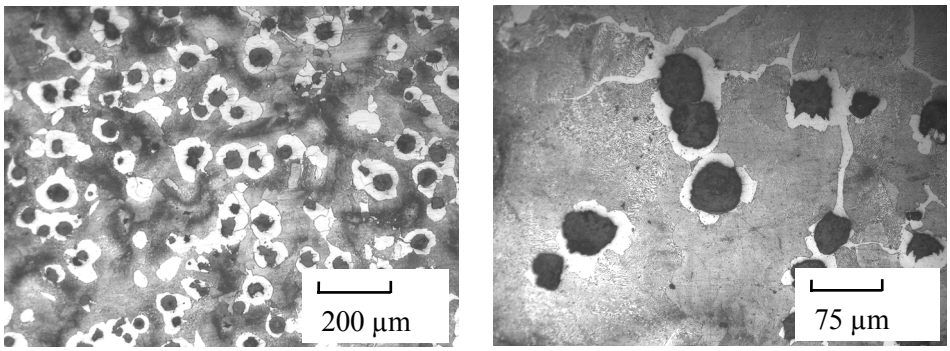
Statinių mechaninių savybių nustatymui buvo pagaminti 3 cilindriniai tempimo bandiniai. Nustatyti statiniai mechaninių savybių rodikliai pateikti 3.4 lentelėje. Jie pastebimai skiriasi nuo austemperizuoto ketaus rodiklių. Tai sietina su mikrostruktūros skirtumais. Tiriamas stiprusis perlitinis ketus yra artimas standartinei rūšiai EN-GJS-500-7, tačiau yra mažiau tąsus.

3.4 lentelė. *Stipriojo perlitinio ketaus statiniai mechaninių savybių rodikliai*

Bandiniai	E, GPa	σ_{pr}, MPa	$\sigma_{0,2}$, MPa	σ_u, MPa	ψ, %	BHN
1	194	295	405	515	3,0	240
2	191	280	396	505	4,2	220
3	194	292	380	490	3,0	210

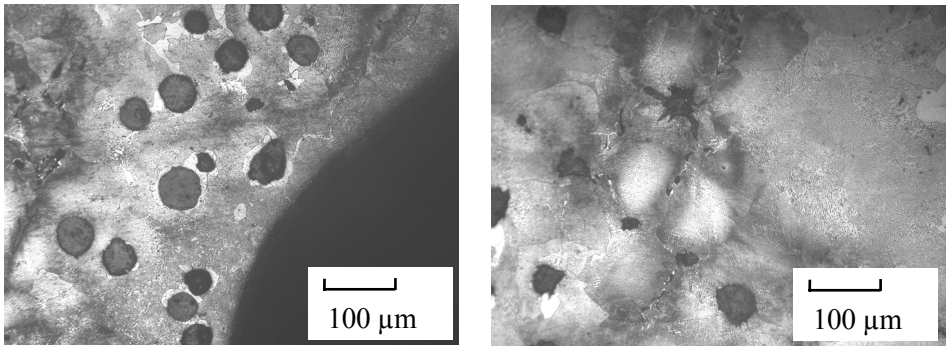
Bendri stipriojo perlitinio ketaus mikrostruktūros vaizdai pateikti 3.4 paveiksle. Ketus turi perlitinę matricą su artimais apvalios formos grafito intarpais, kurie yra apsupti grafito sluoksniu (nuotraukose – baltas apvalkalas). Šis tipinis grafito intarpų vaizdas dažnai vadinamas buliaus akimi (*angl*. "bull's eye"). Nedidelis ferito apvalkalas yra naudingas, nes gerina ketaus mechanines savybes: trapus ir minkštas grafito intarpas apsuptas tąsesniu ferito sluoksniu, kuris slopina trumpus ir ilgus plyšius. Nei grafito intarpų ir jų apvalkalų forma, nei jų pasiskirstymas nėra pakankamai tolygūs, sutinkami nepakankamai taisyklingos rutulinės formos intarpai. Tai sietina su inokuliacijos ir sferoidizacijos proceso sunkumais, kuriuo metu stengiamasi sukurti kuo tolygesnį vienodo dydžio intarpų pasiskirstymą. Matyt, sferoidizacijos procesas nėra pakankamai tobulas arba nėra užbaigtas. Kai kur ferito yra tarp grūdų. Feritas yra tąsesnė fazė ir sietinas su tikėtinu irimo mechanizmo pokyčiu nuo skilimo prie koalescencijos.

Kai kurie grafito intarpai yra pernelyg arti vienas kito arba net sukimba. Intarpų koncentracija siekia apie 150 vnt/cm^2. Jų dydis yra nuo 30 iki 100 μm ir kartų su kiek žemesne nei nurodoma standartuose koncentracija, o tai lemia kiek žemesnius mechaninius rodiklius.



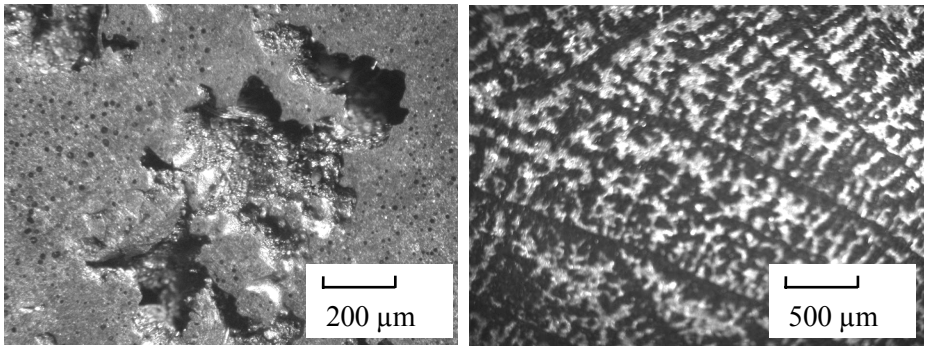
3.4 pav. *Perlitinio ketaus mikrostruktūra: pilkas fonas – perlito matrica, tamsiai pilki intarpai – grafito intarpai, balta – ferito apvalkalai*

Tarpgrūdelinių karbidų išsiskyrimas (3.5 pav.) vyksta dėl pridėtinių metalų (Mo, Ni, Ti, V) cheminės reakcijos su anglimi ir didina medžiagos trapumą. Šie trapūs junginiai atsiranda grūdų pasienio sluoksnyje ir mažina tarpgrūdeilinio sukibimo stiprumą, tuo didindami tarpgrūdelinio skilimo atsiradimo tikimybę.



3.5 pav. *Mikrostruktūros anomalijos stipriajame perlitiniame ketuje. tarpgrūdelinių karbidų pėdsakai (tamsesnės sritys)*

Gana reta mikrostruktūros anomalija rasta tuštumos aplinkoje. Čia mikrostruktūra įgauna dendritinę orientaciją (3.6 paveikslo dešinėje). Taip atsitinka dėl atbulinės silicio mikrolikvacijos, dėl kurios ašinė dendritinės struktūros dalis yra prisotinama silicio. Tokia mikrostruktūros anomalija pastebimai mažina mechanines savybes, nes čia atsiranda nepilnai suformuotų grūdų sritis.



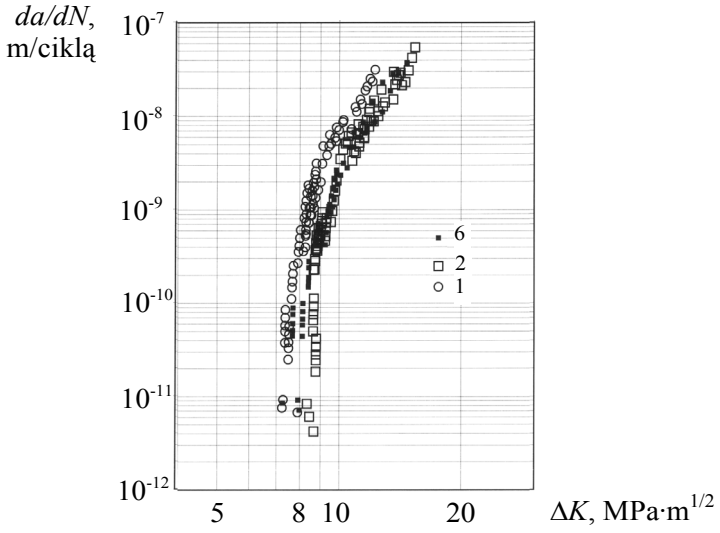
3.6 pav. *Dendritiniai dariniai tuštumos aplinkoje. Kairėje – dendritai tuštumos paviršiuje. Dešinėje – dendritų krypties mikrostruktūros anomalija*

3.2. Atsparumo nuovarginio plyšio susidarymui ir plitimui eksperimentinis tyrimas

Siekiant ištirti liejimo tuštumų įtaką medžiagos cikliniam stiprumui, atlikti necentrinio tempimo bandymai pagal sukurtą metodiką, kuri plačiau yra aprašyta 2 skyriuje. Dalis bandinių neturi liejimo tuštumų; tokiu būdu nustatoma medžiagos be defektų $da/dN - \Delta K$ priklausomybė. Kiti bandiniai, pagaminti iš tos pačios plokštės, turi tuštumų bandinių paviršiuje ir/arba tūryje. Atlikus bandymus, gaunama medžiagos su defektais $da/dN - \Delta K$ priklausomybė. Lyginant medžiagos be defektų ir medžiagos su defektais nuovarginių bandymų rezultatus, siekiama nustatyti konkrečių defektų įtaką, o atlikus eilę bandymų – bendrą defektų poveikio tendenciją.

3.2.1 Austemperizuotas ketus

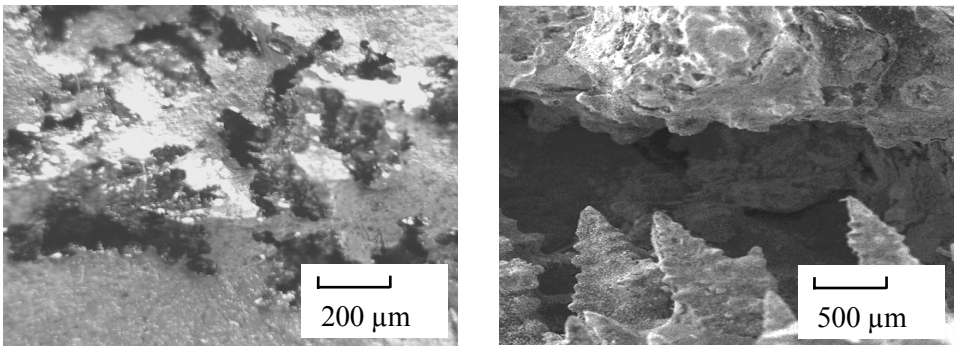
Bandinių grupę sudaro 6 bandiniai, tarp jų – 3 bandiniai, kurių tūryje ir paviršiuje aptikta nevientisumų – stingimo tuštumų (bandiniai 3, 4, 5). Plyšio plitimo greičio ir įtempių intensyvumo koeficiento intervalo priklausomybės bandiniams be tuštumų pateiktos 3.7 paveiksle.



3.7 pav. *Priklausomybė tarp plyšio plitimo greičio ir įtempių intensyvumo koeficiento intervalo ketaus 1 bandiniams be tuštumų (1, 2, 6)*

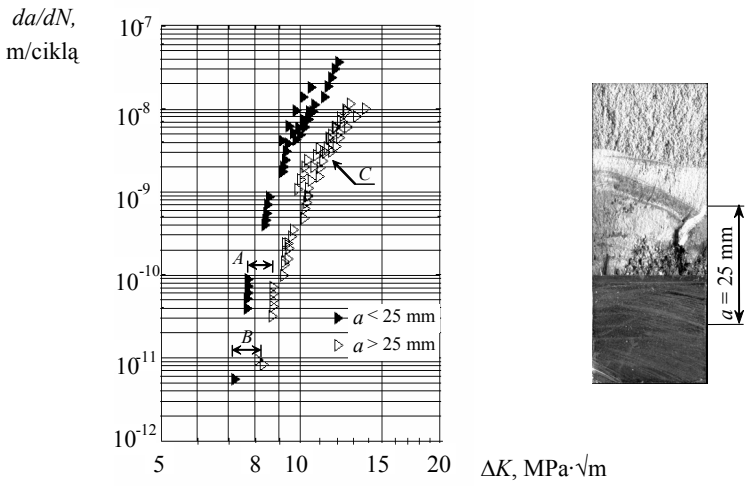
Nustatytas bandinių be tuštumų pleišėjimo slenkstis ΔK_{th} siekia 7,4...8,7 MPa·m$^{1/2}$ prie $da/dN = 10^{-10}$ m/ciklą. Esant $da/dN = 10^{-11}$ m/ciklą ir mažiau, pleišėjimo slenkstis ΔK_{th} siekia 7,2...8,6 MPa·m$^{1/2}$. Šie rezultatai turi pastebimą skirtumą, kuris gali kilti dėl vietinių mikrostruktūros skirtumų bei liekamųjų įtempių. Tam tikras ΔK_{th} reikšmių išsibarstymas esant plyšio plitimo greičiui žemiau 10^{-10} m/ciklą yra aiškinamas *da/dN* jautrumu mažiems ΔK svyravimams, mikrostruktūros ir liekamųjų įtempių poveikiu, plyšio viršūnės geometrijos pokyčiais, matavimo tikslumo sunkumais. Pleišėjimo slenkstis prie žemesnio nei 10^{-10} m/ciklą plitimo greičio sumažėja apie 3 %. Nors ir palyginti nedidelis, šis skirtumas turi įtaką hiperciklinio stiprumo skaičiavimams.

Atlikus ultragarsiniu metodu preliminarią tuštumų paiešką, nustatyta, kad austemperizuoto ketaus bandiniai 3, 4 ir 5 turi viduje ir arti paviršiaus tuštumų, kurios užima tik nedidelę bandinio skerspjūvio dalį lyginant su perlitinio ketaus bandiniais. Šių tuštumų atsiradimo priežastis – tūriniai pokyčiai liejinio stingimo metu. Tai byloja sudėtingas tuštumų paviršius, sudarytas iš dendritinių darinių (3.8 pav.). Tuštumų sankaupą sudaro daugelis netaisyklingos formos gretimų ertmių, kai kur besijungiančių ar atskirtų plonomis sienelėmis.



3.8 pav. *Stingimo tuštumos su dendritiniu paviršiumi austemperizuoto ketaus bandiniuose*

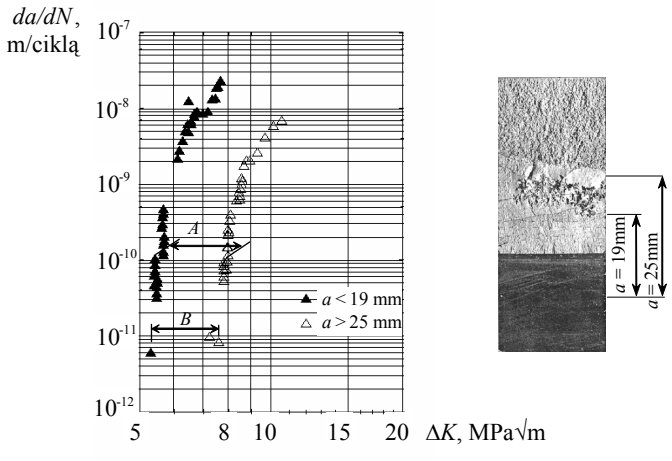
Pagal gautas reikšmes sudarytos priklausomybės tarp plyšio plitimo greičio ir įtempių intensyvumo koeficiento bandiniams su defektais (3.9, 3.10 ir 3.11 pav.). Nagrinėjant bandinius su tuštumomis (3, 4, 5), bandymų rezultatai suformavo 2 reikšmių grupes. Pirmąją grupę sudarė pleišėjimo slenksčio reikšmės, gautos kol plyšys pasiekė defektą (juodos žymės grafinėse priklausomybėse). Antroji grupė – reikšmės, gautos kai plyšys plito jau už defekto ribų (baltos žymės). Skirtumai tarp reikšmių pažymėti *A* prie $da/dN = 10^{-10}$ m/ciklą ir *B* prie $da/dN = 10^{-11}$ m/ciklą.



3.9 pav. *Priklausomybė tarp plyšio plitimo greičio ir įtempių intensyvumo koeficiento intervalo bandiniui 3 su defektais*

Bandinio 3 ribinis įtempių intensyvumo koeficientas prie $da/dN = 10^{-10}$ m/ciklą yra $\Delta K_{thd} = 7{,}6$ MPa·m$^{1/2}$ (plyšys vystosi defekto srityje, plyšio gylis $a < 25$ mm) ir $\Delta K_{thd} = 8{,}7$ MPa·m$^{1/2}$, kai plyšio gylis $a > 25$ mm. Esant mažesniam plyšio plitimo greičiui, $\Delta K_{thd} = 7{,}2$ MPa·m$^{1/2}$ defekto srityje ir $\Delta K_{thd} = 8{,}3$ MPa·m$^{1/2}$.

Bandinio 4 ribinis įtempių intensyvumo koeficiento intervalas prie $da/dN = 10^{-10}$ m/ciklą yra $\Delta K_{thd} = 5{,}5$ MPa·m$^{1/2}$ (plyšio gylis $a < 19$ mm) ir $\Delta K_{thd} = 7{,}8$ MPa·m$^{1/2}$, kai plyšio gylis $a > 25$ mm. Esant plyšio plitimo greičiui $da/dN = 10^{-11}$ m/ciklą ir mažiau, pleišėjimo slenkstis siekia $\Delta K_{thd} = 5{,}3$ MPa·m$^{1/2}$ prieš defektą ir $\Delta K_{thd} = 7{,}3...7{,}6$ MPa·m$^{1/2}$.



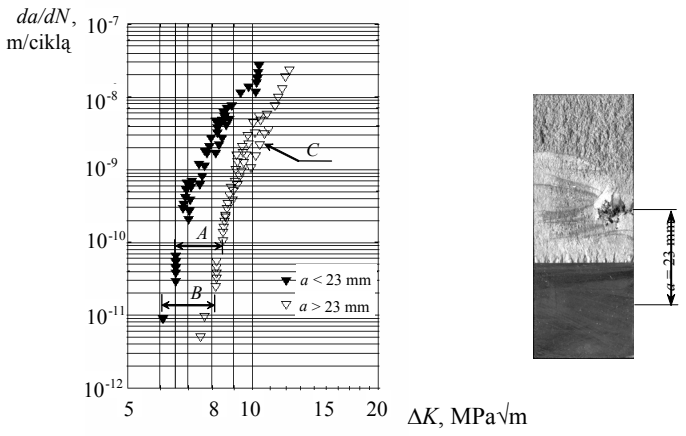
3.10 pav. *Priklausomybė tarp plyšio plitimo greičio ir įtempių intensyvumo koeficiento intervalo bandiniui 4 su defektais*

Ribinis įtempių intensyvumo koeficiento intervalas prie plyšio plitimo greičio $da/dN = 10^{-10}$ m/ciklą yra $\Delta K_{thd} = 6{,}9$ MPa·m$^{1/2}$ (plyšio gylis $a < 23$ mm) ir $\Delta K_{thd} = 8{,}5$ MPa·m$^{1/2}$, kai plyšio gylis $a > 23$ mm. Esant mažesniam plyšio plitimo greičiui ($da/dN = 10^{-11}$ m/ciklą ir mažiau), pleišėjimo slenkstis, atitinkamai, siekia $\Delta K_{thd} = 6{,}2$ MPa·m$^{1/2}$ prieš defektą ir $\Delta K_{thd} = 7{,}5...7{,}7$ MPa·m$^{1/2}$.

Visiems austemperizuoto ketaus bandiniams su tuštumomis būdinga tai, kad ir prieš tuštumą, ir po tuštumos pleišėjimo slenkstis prie žemesnių nei 10^{-10} m/ciklą plyšio plitimo greičių yra pastebimai mažesnis už bandinių be tuštumų (skirtumas sudaro nuo 6 % iki 15 %). Didžiausi skirtumai yra bandinyje 5, kur kartu stebimas ir didesnis nei kituose bandiniuose nuovarginio plyšio fronto iškraipymas. Tai sietina su žymesniu mikrostruktūriniu netolygumu tuštumos aplinkoje.

C sritį, pažymėtą 3.9 ir 3.11 paveiksluose, sudaro artimos įtempių

intensyvumo koeficiento intervalo reikšmės, gautos prie vienodo plyšio plitimo greičio, bet esant skirtingam plyšio gyliui. Šių reikšmių skirtumas byloja apie mikrostruktūros nevienalytiškumą.



3.11 pav. *Priklausomybė tarp plyšio plitimo greičio ir įtempių intensyvumo koeficiento intervalo bandiniui 5 su defektais*

Pastebėta, kad įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės, plyšiui nepraėjus tuštumos, yra pastebimai mažesnės už reikšmes, gautas plyšiui praėjus tuštumą. Analizuojant įtempių intensyvumo koeficiento intervalo reikšmių skirtumus prieš ir po tuštumos (dydžiai *A* ir *B*, pažymėti 3.9, 3.10 ir 3.11 paveiksluose) bei norint įvertinti tuštumų įtaką bandinių skerspjūvio plotui ir įtempių intensyvumo koeficiento reikšmėms, sudaryta 3.5 lentelė.

Dydžių *A* ir *B* skirtumas rodo, kad prie mažesnių plyšio plitimo greičių ΔK išsibarstymas yra didesnis, nes didesnę įtaką turi mikrostruktūros ypatumai ir didėja jautrumas plyšio plitimo nestabilumui. Plyšys auga šuoliškai ir tik tada, kai atsiranda pakankamai trumpų plyšių išankstinio irimo zonoje, plyšio viršūnėje.

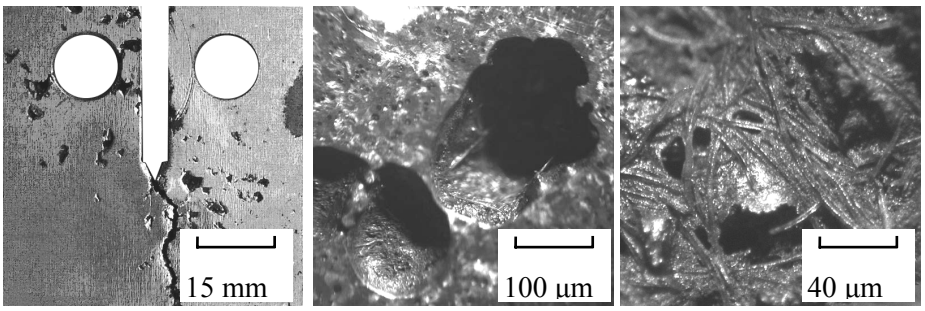
Analizuojant bandinių lūžius, taip pat atkreiptas dėmesys į nuovarginių ir staigaus irimo sričių plotų santykį bei defektų dalį nuovarginėje srityje. Pleišėjimo slenksčio reikšmes lyginamos prie $da/dN = 10^{-10}$ m/ciklą. Rezultatų analizė leidžia daryti išvadą, kad tuštuma turi tiesioginį poveikį bandinio pleišėjimo slenksčio reikšmėms. Iš 3.5 lentelės matome, kad bandiniams su defektais pleišėjimo slenksčio reikšmės po defekto apytiksliai atitinka medžiagos be defektų reikšmes. Tačiau bandinio skerspjūvio ploto sumažėjimas dėl tuštumų nėra vienintelė pleišėjimo slenksčio sumažėjimo priežastis. Siekiant detaliau ištirti plyšio plitimą per defektą, buvo atlikti papildomi analitiniai bei skaitiniai tyrimai.

3.5 lentelė. *Austemperizuoto ketaus įvairių lūžio dalių plotų dydžiai, jų santykiai ir pleišėjimo slenksčio reikšmės prie da/dN = 10^{-10} m/ciklą*

Bandinys	3	4	5
Defekto ploto dalis, mm^2 / % nuo viso lūžio ploto,	100 / 10,4 %	60 / 6 %	28,6 / 3 %
Staigaus irimo srities plotas, mm^2 / % nuo viso lūžio ploto	408 / 41 %	462 / 49 %	340 / 35,6 %
Nuovarginė sritis, mm^2 / % nuo viso lūžio ploto	586 / 59 %	482 / 51 %	615 / 64,4 %
Defekto dalis, % nuo lūžio nuovarginės dalies	17,1	12,5	8,4
ΔK_{thd} iki defekto, MPa·$m^{1/2}$	7,7	5,5	6,9
ΔK_{thd} po defekto, MPa·$m^{1/2}$	8,7	7,8	8,5
Medž. be defektų ΔK_{th}, MPa·$m^{1/2}$	7,4...8,7		

3.2.2 Stiprusis perlitinis ketus

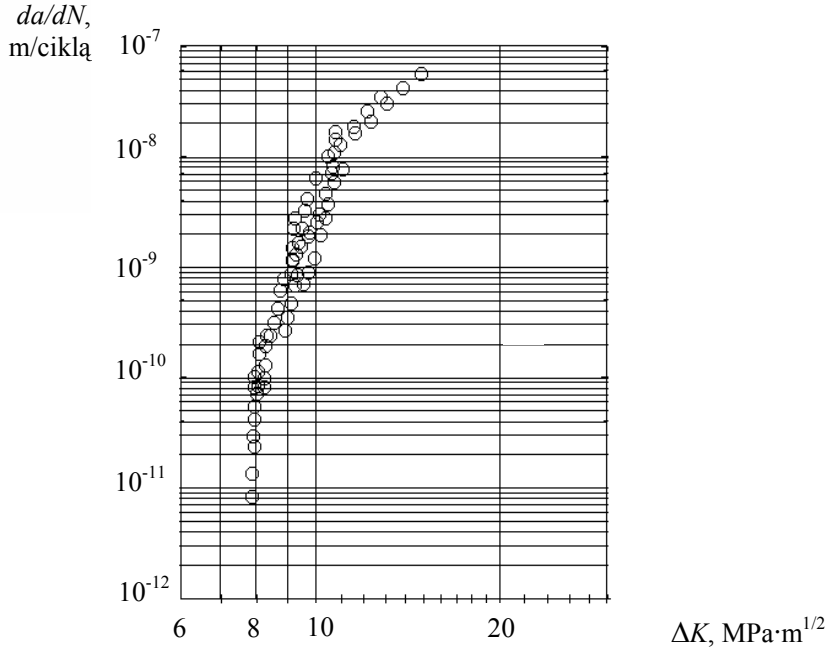
Nuovarginio stiprumo bandymams buvo pagaminti 6 necentrinio tempimo bandiniai be liejimo tuštumų. Papildomai 3 bandiniai išpjauti iš medžiagos su stingimo tuštumomis (3.12 paveiksle pateiktas vieno bandinio su tuštumomis vaizdas). Stingimo tuštumos, esančios perlitinio ketaus bandinių paviršiuje ir tūryje, atsirado dėl dvejopos priežasties. Tiriant tuštumas šio ketaus bandiniuose, pastebėta, kad dalis jų turi gana taisyklingą formą, būdingą dujų burbuliukams, atsiradusiems dėl išsiskyrusių dujų arba pagautiems skysto metalo liejimo metu (3.12 paveikslo centre). Kita dalis turi labai sudėtinga formą su dendritiniu paviršiumi (3.12 paveikslo dešinėje), o tai yra būdinga tuštumoms, atsiradusioms dėl tūrinių pokyčių stingstant liejiniui. Galima padaryti prielaidą, kad perlitiniame ketuje tuštumos atsirado veikiant skirtingiems mechanizmams. Skirtingai nuo austemperizuoto ketaus bandinių, perlitinio ketaus bandiniuose tuštumos sudarė kiek didesnę bandinių dalį.



3.12 pav. *Tuštumos kompaktinio bandinio paviršiuje ir tūryje*

Pagaminti ir išbandyti 6 necentrinio tempimo bandiniai be tuštumų (bandiniai 1–6). Reglamentuojamoje metodikoje numatoma, kad nuovarginis plyšys turi paaugti 3–4 mm nuo įpjovos viršūnės; tik tada išvengiama įpjovos kaip įtempių koncentratoriaus poveikio. Nustatant stipriojo perlitinio ketaus pleišėjimo slenkstį, bandiniai 1–5 nevisiškai atitiko šį reikalavimą dėl eksperimento atlikimo sunkumų. Nustatyta, kad ši medžiaga yra ypatingai reikli apkrovimo jėgos dydžiui; nuovarginio plyšio augimas reikalauja didesnio nei įprasta ciklų skaičiaus. Nuovarginio plyšio augimas vyksta šuoliškai ir nenuspėjamai. Viršijus tinkamą apkrovimo jėgos reikšmę, kuri yra sunkiai nustatoma, bandiniai linkę suirti staiga. Išbandžius šiuos bandinius nustatytas pleišėjimo slenkstis yra ΔK_{th} = 8,0...9,2 MPa·m$^{1/2}$ prie $v = 10^{-10}$ m/ciklą ir ΔK_{th} = 7,8...9,2 MPa·m$^{1/2}$ prie $v = 10^{-11}$ m/ciklą ir mažiau.

Siekiant patikslinti eksperimentų rezultatus, atliktas papildomo bandinio 6 eksperimentinis tyrimas. Šis bandinys visiškai atitinka reglamentuojamos metodikos reikalavimus išankstinio nuovarginio plyšio paruošimui. Jo matmenys – kaip ir kitų perlitinio stipriojo ketaus bandinių. Nustatyta priklausomybė tarp plyšio plitimo greičio ir įtempių intensyvumo koeficiento intervalo perlitinio ketaus bandiniui 6 be tuštumų pateikta 3.13 paveiksle.

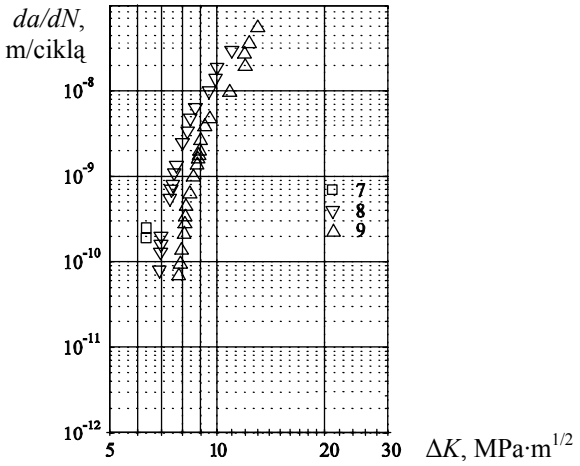


3.13 pav. *Priklausomybė tarp plyšio plitimo greičio ir įtempių intensyvumo koeficiento intervalo stipriojo perlitinio ketaus bandiniui 6 be defektų*

Nustatytas pleišėjimo slenkstis perlitiniam ketui be tuštumų sankaupų yra ΔK_{th} = 8,0...8,2 MPa·m$^{1/2}$, esant $da/dN = 10^{-10}$ m/ciklą. Esant žemesniam plyšio plitimo greičiui ($da/dN = 8 \cdot 10^{-11}$ m/ciklą), pleišėjimo slenkstis (ribinis įtempių intensyvumo koeficiento intervalas) siekia ΔK_{th} = 7,8 MPa·m$^{1/2}$.

Bandiniuose 7, 8, 9 vizualiai ir ultragarsiniu būdu aptiktos tuštumos bandinių paviršiuje ir gylyje. Kadangi jos užėmė beveik visą bandinių skerspjūvį (priešingai negu austemperizuoto ketaus bandiniuose, kur tuštumos buvo lokalios), bandymo eiga šiek tiek skyrėsi, nes nebuvo galimybės atskirti ir palyginti viename bandinyje zonų, kur nuovarginis plyšys plito iki ir po tuštumų. Perlitinio ketaus bandinių su tuštumomis atsparumo nuovarginio plyšio susidarymui bandymų rezultatai pateikti 3.14 paveiksle.

Nustatytas pleišėjimo slenkstis medžiagai su tuštumų sankaupa ΔK_{thd} = 6,3…7,9 MPa·m$^{1/2}$ esant $da/dN = 10^{-10}$ m/ciklą. Pleišėjimo slenksčio prie žemesnių plyšio plitimo greičių nustatyti nepavyko.



3.14 pav. *Priklausomybė tarp plyšio plitimo greičio ir įtempių intensyvumo koeficiento intervalo stipriojo perlitinio ketaus bandiniams su tuštumomis*

Lyginant bandinių be tuštumų ir su tuštumomis rezultatus, pastebėta, kad pleišėjimo slenksčio reikšmės skirtumas, esant $da/dN = 10^{-10}$ m/ciklą, sudaro nuo 1,3 iki 25%. Siekiant ištirti šį skirtumą, atlikti papildomi analitiniai tyrimai.

3.3. Bandinių lūžių fraktografinė analizė

Kietų kūnų irimo paviršiai (lūžiai) turi svarbią informaciją apie irimo mechanizmą, kinetiką ir priežastis. Daugelis žinių apie irimą yra gautos tiriant

irimo paviršius. Pagrindinę informaciją apie irimo procesus duoda fraktografiniai tyrimai: stebėjimas, registravimas, matavimas ir lūžių analizė. Lūžių tyrimas pagrįstas šviesos, elektroninės ir rentgeno spindulių fraktografijos metodais. Lūžių makrosandara tiriama šviesos mikroskopais. Lūžių mikrosandarai tirti šiuo metu naudojama nemažai fraktografinių metodu, tarp kurių labiausiai yra paplitęs skenuojančio elektroninio mikroskopo taikymas, kai irimo paviršius stebimas tiesiogiai. Dažniausiai naudojamas priartinimas nuo 50 iki 5000 kartų. Papildomi kompiuterinio vaizdo apdorojimo būdai išplečia fraktografinių tyrimų galimybes. Darbe pateikti tyrimai yra atlikti Lietuvos energetikos institute Medžiagų tyrimų ir bandymų laboratorijoje.

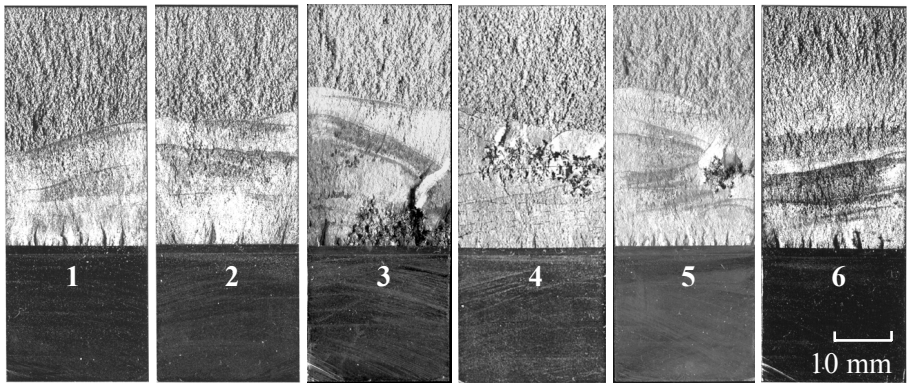
Yrant realioms konstrukcijoms, susidaro daug mikro- ir makroplyšių, besišakojančių ertmių ir plastiškai deformuotų zonų. Makroplyšys ieško pažaidų ir silpnų taškų medžiagoje, kuri yra veikiama aplinkos, temperatūros bei fizikinių laukų, kurie greitina ar lėtina irimo procesą.

Ketus su rutuliniu grafitu yra nevientisa dvifazė medžiaga su skirtingų mechaninių savybių fazėmis. Skirtingų mikrostruktūros dedamųjų savybės ir elgsena esant tampriai-plastinei deformacijai, jų tarpusavio išsidėstymo ir sąveikos ypatumai atlieka svarbų vaidmenį medžiagos irimui. Įvertinant sandaros netolygumą mikroskopiniu požiūriu, šie veiksniai ir jų nukrypimas nuo vidurkio bei papildomų lokalinių veiksnių poveikis tampa svarbūs tiriant irimą mikroskopiniame lygyje. Pažeidimų kaupimasis ir irimas tokiose nehomogeninėse medžiagose, kaip stiprusis ketus, priklauso nuo netolygaus įtempių ir deformacijų pasiskirstymo, kylančio nuo mikrostruktūros nevienalytiškumo. Defektų aplinkoje aptiktos mikrostruktūros anomalijos (grafito intarpų grandinės, dendritinė struktūra) ir mikrotuštumos, kurios kartu sudaro sąlygas mažų plyšių vystymuisi plyšio viršūnės aplinkoje, o kartu tai sumažina struktūros atsparumą plyšio plitimui.

Kaip nustatyta, tiriamos stipriojo ketaus rūšys turi skirtingą mikrostruktūrą. Tai daro įtaką bandinių irimo paviršių fraktografiniams požymiams. Irimo mechanizmo ypatumai aiškina tiriamų ketaus rūšių ciklinio stiprumo skirtumus. Lūžių su tuštumomis fraktografiniai tyrimai atlikti siekiant ištirti tuštumų poveikį nuovarginio irimo procesui ir irimo ypatumus tuštumose.

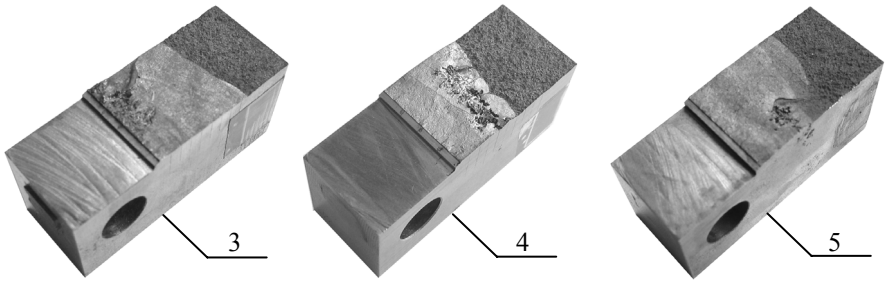
3.3.1 Austemperizuotas ketus

Austemperizuoto ketaus bandinių be tuštumų ir su tuštumomis lūžiai pateikti 3.15 paveiksle. Čia aiškiai matomos nuovarginio ir statinio irimo sritys. Tiriami nuovarginiai lūžiai turi būdingus I apkrovimo formos trapaus nuovarginio irimo požymius. Bandinys neturi didelių plastiškumo požymių – skerspjūvio pokyčių arba šlyties „lupų“ (*angl*. „shear lips“).



3.15 pav. *Austemperizuoto ketaus bandinių lūžiai*

Trapų irimą atitinka ir aiškiai suformuota irimo plokštuma, atitinkanti bandinio simetrijos plokštumą bei statmena didžiausiems tempimo įtempiams. Tiriamų bandinių lūžiuose dėl medžiagos savybių didelio tuneliavimo efekto nėra, ir kai kuriuose bandiniuose be defektų (pvz., bandinys 2) plyšys yra beveik statmenas paviršiui. Tačiau magistralinio plyšio frontas kai kuriuose lūžiuose be defektų yra gana kreivas – galima daryti prielaidą, kad medžiaga nėra pakankamai vienalytė.

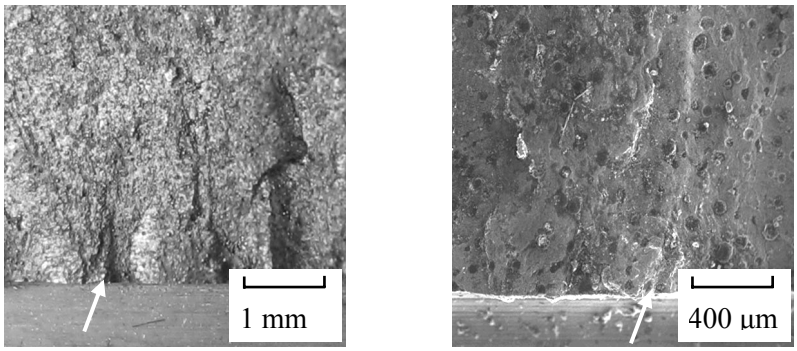


3.16 pav. *Austemperizuoto ketaus bandinių su tuštumomis bandinių vaizdai*

Lūžiuose su tuštumomis ryškiai matoma, kad tuštuma iškraipo plyšio plitimą. Pažymėtina tai, kad tuštuma netampa staigaus irimo priežastimi: magistralinis plyšys dažnai greičiau plinta defekto link, jungiasi su juo, tačiau po defekto plinta lėčiau nei srityje be defekto (bandinys 5). Nuovarginės srities plotas sudaro nuo 50 iki 70 % bendro lūžio ploto. Tolimesnei detaliai fraktografinei analizei parinktas bandinys 5, turintys tuštumą. Palyginus su kitais lūžiais, šio bandinio lūžis turi gerai pastebimus plyšio kreivumo pėdsakus, atsiradusius dėl defekto įtakos.

Nuovarginio plyšio plitimui turi įtaką eilė veiksnių, kurie keičia plyšio susiformavimo ir plitimo mechanizmą. Prie tokių veiksnių reikia priskirti vietinius mikrostruktūros pokyčius, įtempių intensyvumo koeficiento skirtumo kitimą, įtempių būvio kitimą. Įvairios kilmės defektai daro šių veiksnių poveikį daug sudėtingesnį.

Plyšio atsiradimo srityje (3.17 pav.) ypatingą vaidmenį turi medžiagos mikrostruktūra. Ši sritis pasižymi būdingais atsirandančių ir besivystančių plyšių pėdsakais. Kompaktiniame bandinyje pagaminta įpjova pasižymi tam tikru nedideliu suapvalinimo spinduliu, kurio dydis neturi viršyti standarto leistinos reikšmės. Esant žymiems įtempiams koncentratoriuje, mažų plyšių užuomazgomis tampa struktūriniai nevienalytiškumai. Stipriajam ketui tai yra patys intarpai bei įvairūs mikrostruktūros defektai: grafito intarpų kolonijos, grandinės, mikrotuštumos ir pan. Irimas vyksta pagal grūdelinį irimo mechanizmą. Vienas ar keli maži plyšiai, esantys palankesnėse sąlygose, kerta savo, o vėliau ir kitų grūdų ribas ir perauga į trumpą plyšį. Irimas, kuris pradinėje fazėje buvo daugmaž tolygiai pasiskirstęs per visą įpjovos-koncentratoriaus aplinką, paverčiamas kelių plyšių plitimu.

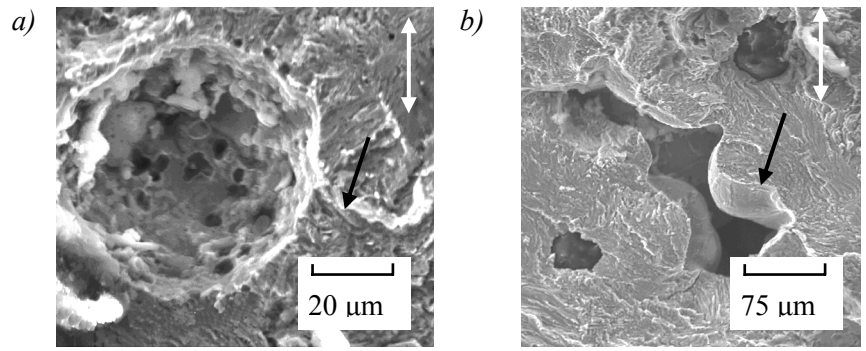


3.17 pav. *Plyšio atsiradimo sritis. Rodyklės parodo trumpųjų plyšių židinius*

Kai mažo plyšio ilgis pasiekia grafito intarpo dydį (vidutiniškai nuo 20 iki 80 μm), mažas plyšys ima plisti per matricą ir jungtis su mikroplyšiais, esančiais gretimuose grūduose, sudarydamas trumpą plyšį. Jo plitimui turi įtakos ir mikrostruktūros barjerai – grūdų paviršiuose esantys karbidai ir segregacijos dariniai. Šis procesas kartais nustoja vystytis, kol gretimų trumpų plyšių augimas nesudaro sąlygų tolimesniam plyšio plitimui. Plyšiui pasiekus apie 0,5 mm dydį, mikrostruktūros įtaka trumpiems plyšiams susilpnėja, nors jų plitimą vis dar veikia grafito intarpai. Plyšiai ilgėja ir vystosi į bandinio gylį individualiose statmenose įpjovai plokštumose, kur plinta šiek tiek skirtingomis kryptimis. Dėl tokio nestabilaus plitimo, šioje nuovarginio plyšio augimo zonoje stebimas labai sudėtingas lūžio paviršiaus reljefas, kurį sudaro daugelis skirtingo aukščio ir ilgio

paviršių, atsiradusių plintant trumpiems plyšiams į bandinio gylį.

Stabilaus plyšio plitimo sritis suformuojama veikiant grūdeliniam irimo mechanizmui. Kai ciklinė apkrova nesukelia didelių įtempių (t. y. $\sigma_{max} < \sigma_{0,2}$), trumpieji plyšiai atsiranda rutulinio grafito branduolių ir mikrotuštumų vidurinėje dalyje („ekvatoriuje“), statmenai apkrovos krypčiai (3.18 pav.). Augant mažų plyšių ilgiui, šlyties mechanizmu augantys mikroplyšiai persiorientuoja į didžiausių normalinių įtempių veikimo plokštumą. Ikikritinio augimo stadijoje mažo plyšio atsiradimas visada susijęs su mikroplastine kūno deformacija, net ir esant trapiam makroskopiniam irimui. Kai apkrova yra didesnė ($\sigma_{max} < \sigma_{0,2}$), irimas prasideda ir grafito rutulio poliuose. Taip atsitinka dėl maksimalios įtempių koncentracijos ir medžiagos savybių. Kadangi pats grafito intarpas yra palyginti minkštas (E = 27 GPa) ir mažai priešinasi trumpųjų plyšių susidarymui, tai trumpasis plyšys atsiranda intarpui artimoje matricoje. Vietinių įtempių koncentracija tarp intarpo ir paviršiaus sukelia plastines deformacijas, dėl kurių matricos medžiaga suyra. Artėjant magistralinio plyšio frontui, trumpieji plyšiai vystosi srityje, statmenoje didžiausiems normaliniams įtempiams ir vėliau jungiasi su magistraliniu plyšiu. Suirus grūdui, matomi grafito branduoliai, kurie dažnai suyra ir ištrupa, palikdami grūdo irimo paviršiuje duobutes. Čia kai kur stebimi mažų plastinių deformacijų pėdsakai. Atitrūkimo pėdsakai – keteros aplink grafito intarpą, turinčios aštrias briaunas. Grafito intarpo dugne matomi segregacijos pėdsakai, veikiantys mažų plyšių susidarymą aplinkoje.



3.18 pav. *Mikroplyšiai grafito intarpo ekvatoriuje (a) ir mikrotuštumos (b) aplinkoje (pažymėta juodomis rodyklėmis). Balta rodyklė dešiniame viršutiniame paveikslų kampe parodo didžiausių įtempių kryptį*

Vėliau trumpieji plyšiai tarpusavyje jungiasi ir suformuoja magistralinį plyšį. Jie jungiasi įvairiai orientuotomis plokštumomis, kurios suformuoja nevienodo aukščio irimo paviršių. Kai šios linijos galutinai susijungia į magistralinį plyšį, irimo paviršiaus aukščio skirtumas išnyksta. Susiliejus trumpiems plyšiams į vieną magistralinį, irimą įmanoma aprašyti priklausomybėmis, kai plyšio plitimo

greitis siejamas su įtempių intensyvumo koeficientu.

Magistralinis plyšys plinta veikiant grūdeliniam skilimo irimo mechanizmui, kai esant kintamai tempimo jėgai, skilimas vyksta kristalografinėmis plokštumomis. Irimo paviršių sudaro daugelis mažų plokštumų, atsiradusių grūdo skilimo metu. Tarp jų pastebimas nedidelis aukščio skirtumas.

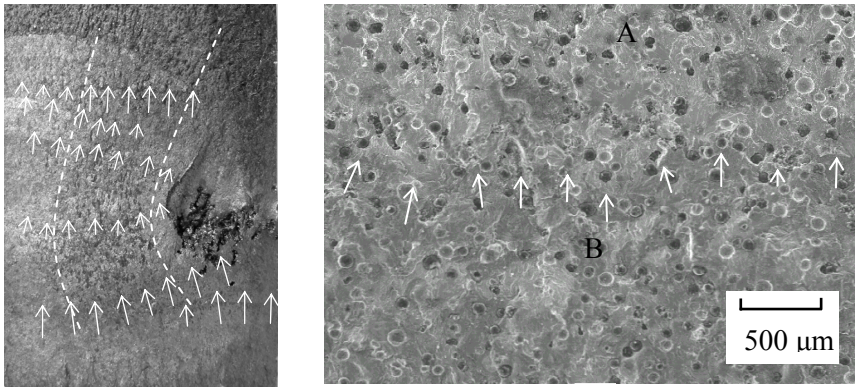
Plyšio stabdymo linijos atsiranda, kai, sumažinus ciklinę išorinę apkrovą, mažėja plyšio augimo žingsnis. Tai mikroskopiniame lygyje pasireiškia šiurkštumo ir spalvos pokyčiu. Šis procesas literatūroje aiškinamas įvairiai ir grindžiamas irimo proceso kristalografiniais ypatumais mikrolygyje. Taip plyšio sustojimo linijos siejamos su žemesnėmis ΔK reikšmėmis. Aptiktos plyšio sustojimo linijos visiškai atitinka tokį nuovarginį irimo pobūdį, kai įtempiai yra vieno ženklo, o plyšio atsiradimo vieta yra viena koncentruota įpjova.

Nagrinėjant bandinius su defektais, ypatingą dėmesį reikėtų atkreipti į plyšio stabdymo linijų formą, nes ji byloja apie plyšio plitimo krypties ir plitimo greičio kitimą (3.19 paveikslo kairėje). Matome, kad irimo pradžioje lūžio dešinėje plyšys plinta defekto link greičiau. Galima padaryti prielaidą, kad tai yra tuštumos įtaka, dėl kurios plyšys tuštumoje plinta greičiau nei srityse be defektų.

Paviršius yra lygus, išskyrus tuštumos aplinką. Plisdama defektu plyšio kryptis iš vienos pusės yra beveik statmena šoniniam bandinio paviršiui, o iš kitos - kerta defektą. Po defekto kairėje srityje plyšys plinta kiek greičiau negu dešinėje srityje. Siekiant ištirti šį reiškinį, buvo atlikti papildomi skaitiniai tyrimai.

Lūžyje aptikta sritis su pastebima pluoštine struktūra, kur lūžio paviršių formuoja kryptingos irimo plokštumos (3.19 paveikslo kairėje, tarp baltų brūkšninių kreivių). Tai yra dėl mikrostruktūros nevienalytiškumo aplink defektą. Literatūroje (Ежов, Герасимова, Каток, 2005) tai apibūdinama „mediniu“ lūžiu, kuris atsiranda, kai, stingstant liejiniui, atsiranda metalo struktūros kryptingumas. Liejant didelių gabaritų detales, dažnai technologiškai sunku išlaikyti vienodą metalo stingimo greitį, kas sudaro sąlygas kryptingai struktūrai susidaryti. Irimo paviršiuje išilgai irimo krypties matomos kryptingos linijos. Šio požymio nereikia priskirti prie radialinės krypties irimo linijų, kurios yra būdingos beinito ir martensito mikrostruktūrai, nes tokiu atveju būtų aptikta kitokia linijų išdėstymo schema.

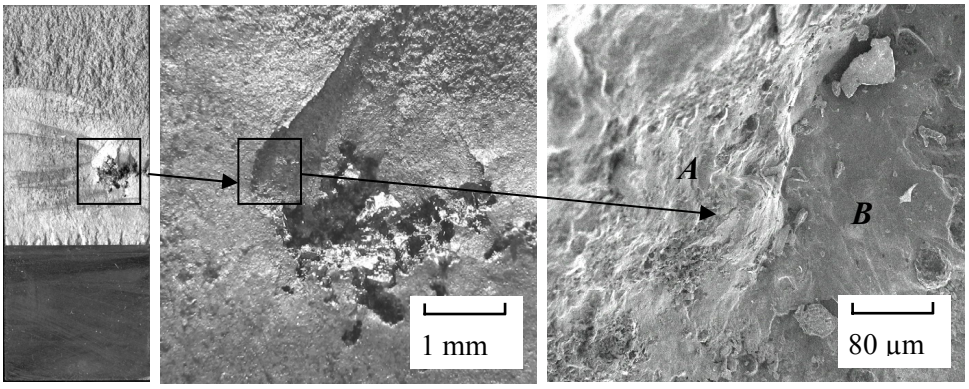
3.19 paveikslo dešinėje, viršuje, matome šviesesnę sritį *A*, kuri atitinka greitesnį plyšio plitimą, ir tamsesnę sritį *B*, kuri atitinka lėtesnį plyšio plitimą ir plyšio stabdymą, nustatant ribinį įtempių koeficiento intervalą. Tamsesnė irimo paviršiaus spalva sietina su oksidų išsiskyrimu, esant reikšmėms, artimoms pleišėjimo slenksčiui ΔK_{th} bei ciklo asimetrijos koeficientu R, artimu nuliui. Kiek lygesnis paviršius plyšio stabdymo zonoje aiškinamas daug mažesniu plyšio plitimo greičiu. Lūžio srityse, kur galioja tiesinė $da/dN - \Delta K$ priklausomybė ir plyšio plitimo greitis yra aukštesnis, irimo paviršiui būdingas didesnis šiurkštumas dėl skilimo plokštumų atsiradimo. Tai patvirtina ir kiti austemperizuoto ketaus nuovarginį irimą tyrę autoriai (Greno, Otelui, Boeri, 1999).



3.19 pav. *Nuovarginio irimo sritis austemperizuoto ketaus bandinyje: kairėje - bendras vaizdas (baltos rodyklės pabrėžia plyšio stabdymo linijas ir plyšio fronto formą); dešinėje - plyšio stabdymo linija*

Įvairūs nevienalytiškumai – porėtumas, vidiniai plyšiai, intarpai, segregacijos ir pan. – dažnai tampa nuovarginio irimo priežastimi. Stingimo tuštumos dažnai turi sudėtinga struktūrą ir susideda iš daugelio gretimų tuštumų, kuriose yra nepilnai sukibusių grūdų ir dendritinių darinių. Stingimo tuštuma ir mikrostruktūros nevienalytiškumai jos aplinkoje turi įtaką plyšio plitimui ir atsirandančio irimo paviršiui. Tai pasireiškia sudėtingesne irimo paviršiaus geometrine forma, antrinių plyšių susidarymu, irimo mechanizmo pokyčiu.

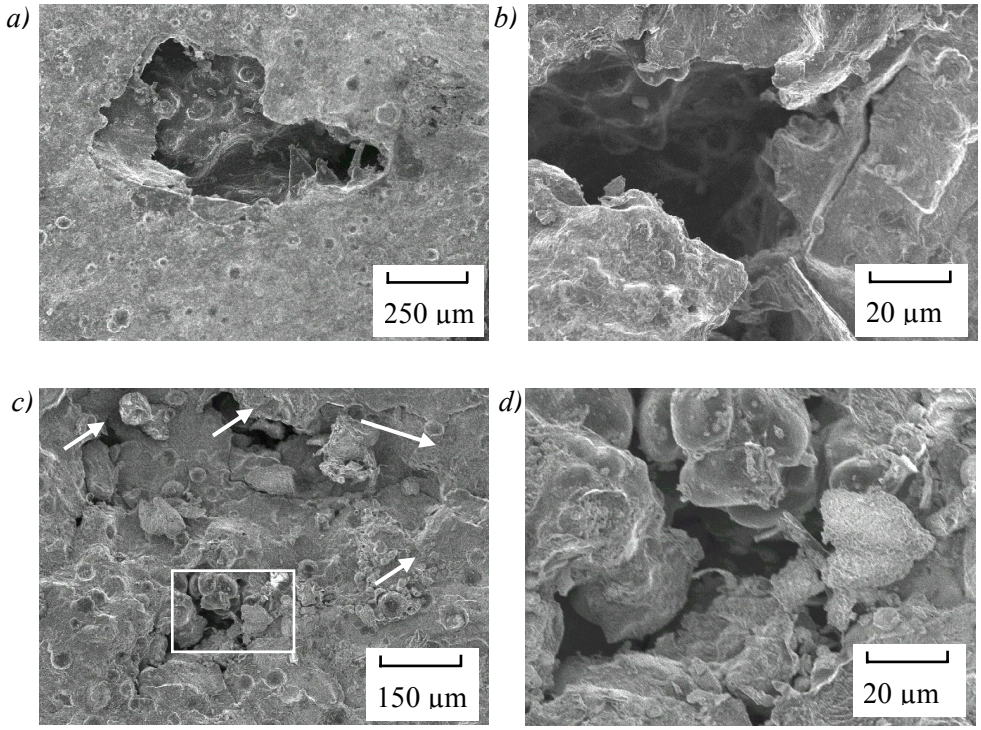
Nagrinėjant irimo paviršių defekto aplinkoje, pastebėtas pirmos tipinės irimo formos pasikeitimas į antrąją (3.20 pav.). Tai sietina su struktūros nevienalytiškumu defekto aplinkoje: gretimi metalo sluoksniai sukibo nepakankamai.



3.20 pav. *Irimo mechanizmo pasikeitimas tuštumos aplinkoje*

Šiame bandinyje aptiktas irimo mechanizmo pasikeitimas, kai *A* srityje (3.20 paveiklo dešinėje) turime tarpgrūdelinį (nelygus blizgus paviršius), o dešinėje (*B* srityje) – grūdelinį skilimą (labiau plokščias, matinis).

3.21 paveiksle, kaip ir irimo paviršiaus srityse be defektų, stebimas grūdelinis irimas skilimu. Šalia tuštumų aptinkami laipsniško plyšio plitimo laipteliai bei kelių trumpų plyšių augimo bei susiliejimo pėdsakai.

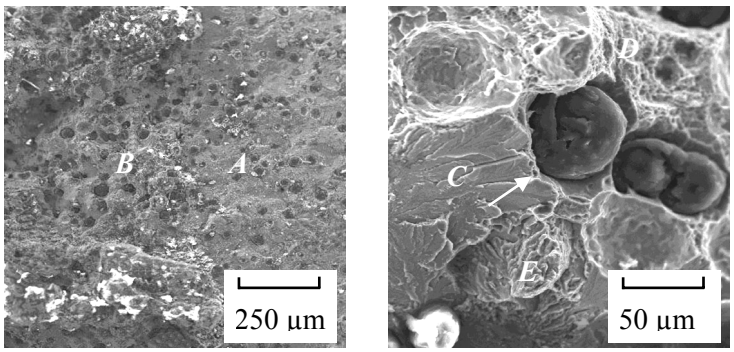


3.21 pav. *Irimo paviršius tuštumų aplinkoje: a) stingimo tuštuma su dendritais paviršiuje; b) antrinis plyšys mikrotuštumos aplinkoje; c, d) mišrus irimo paviršius (stačiakampė zona pateikta didesniu priartinimu dešinėje)*

Sudėtingas irimo paviršiaus vaizdas tuštumos aplinkoje patvirtinamas antrinio plyšio pėdsaku (3.21 pav., b). Grūdelinis irimas vyksta medžiagos grūdais, tačiau kai kur irimo paviršius susilieja su tuštumų paviršiumi.

Lyginant su nuovarginio irimo zona, staigaus irimo zonoje pastebimas daug didesnis šiurkštumas ir aukščio skirtumai tarp gretimų irimo paviršiaus taškų (3.22 paveikslo kairėje). Staigaus irimo srityje stebimas mišrus trapus grūdelinis ir tarpgrūdelinis irimas. Balti dariniai – vėlesnės korozijos pėdsakai lūžio paviršiuje. Iš literatūros žinoma, kad, esant mažesnei austenitizacijos temperatūrai ir trumpesniam išlaikymui, staigaus irimo zonoje galima aptikti vis daugiau tąsaus irimo pėdsakų.

3.22 paveikslo dešinėje matomi išlikę ištrupėję grafito intarpai matricoje. Besikečianti irimo plokštumos orientacija byloja apie reikšmingą grūdų kristalografinės plokštumos orientacijos poveikį. *C* srityje matome skilimo plokštumą, kuri susiformavo veikiant tam pačiam irimo mechanizmui, kaip ir nuovarginio irimo srityje. *D* srityje, esančioje irimo paviršiaus viršūnėse, stebimas tąsus irimas, vykstantis pagal koalescencijos (tuštumų susiliejimo) mechanizmą. Šis mechanizmas, kai irimas vyksta susidarant duobutėms, kai kur matomas ir grafito intarpų aplinkoje (balta rodyklė). *E* srityje matome tarpgrūdelinį skilimą.

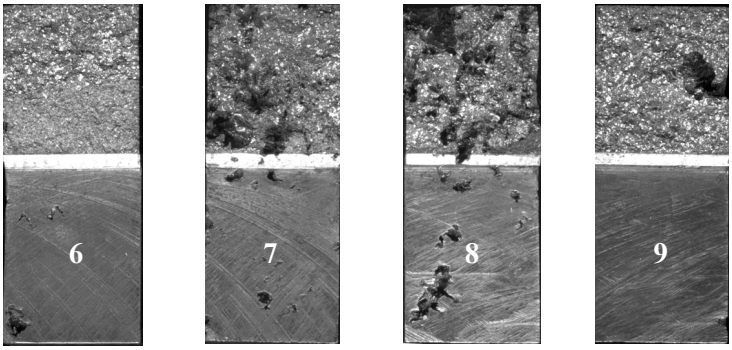


3.22 pav. *Staigaus irimo sritis: kairėje – perėjimas tarp nuovarginio (A) ir staigaus (B) irimo sričių; dešinėje – mišrus irimas (srityje C – skilimas, srityje D – koalescencija)*

3.3.2. Stiprusis perlitinis ketus

Bandinio be defekto (bandinys 3) ir trijų bandinių su liejimo tuštumomis (7, 8, 9) lūžių vaizdai pateikti 3.23 paveiksle. Bandinyje be tuštumų matomos aiškiai skiriamos nuovarginė ir statinio irimo sritys, kurios skiriasi paviršiaus šiurkštumu bei blizgesiu. Bandiniuose su tuštumomis šios sritys yra sunkiau atskiriamos dėl daug sudėtingesnio irimo paviršiaus.

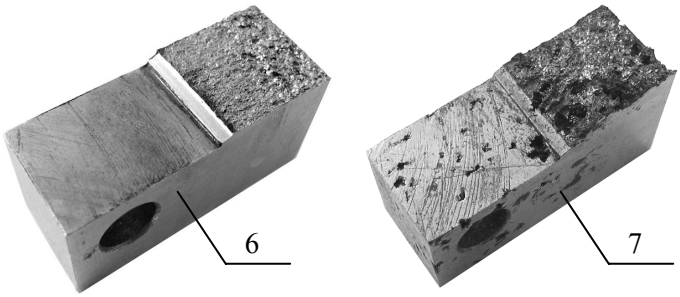
Bandiniuose su tuštumomis plyšio atsiradimas ir plitimas priklauso nuo daugelio sunkiai nusakomų veiksnių. Pradinėje stadijoje (kai plyšio gylis yra 2–3 mm) plyšys susidaro srityje, kur įpjova veikia kaip svarbus įtempių koncentratorius. Tolimesniam plyšio plitimui didelę įtaką turi medžiagos mikrostruktūros ypatumai. Tuštumos ir mikrostruktūrinio nevienalytiškumo anomalijos aplink jas keičia įtempių būvį plintančio plyšio viršūnėje. Defektų forma, jų išsidėstymas, mikrostruktūros netolygumai defektų aplinkoje veikia plyšio plitimą. Kaip rezultatą matome labai sudėtingą irimo paviršių su daugeliu skirtingo dydžio ir tarpusavio orientacijos plokštumomis.



3.23 pav. *Stipriojo perlitinio ketaus bandinių lūžių vaizdai*

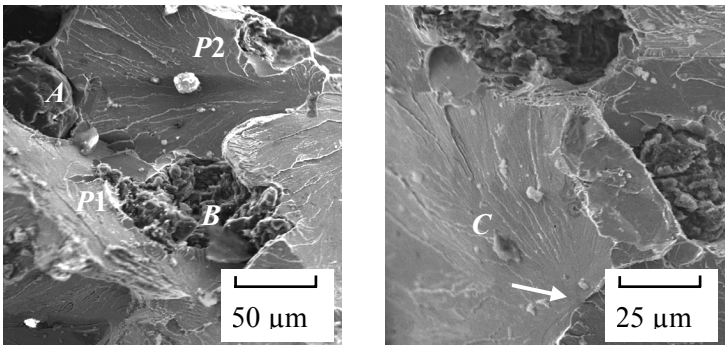
Plyšio trajektorija kinta ne tik bandinio paviršiuje, bet ir bandinio tūryje. Plyšys pasiekia tuštumas sudėtinga trajektorija taip, kad kai kurios dalelės aplink defektą visiškai nuskyla. Svarbią įtaką turi mechaninių savybių netolygumas mikrostruktūroje, esant labai mažiems plyšio plitimo greičiams ir įtempių intensyvumo koeficiento intervalui artėjant prie pleišėjimo slenksčio ΔK_{th}. Toks jautrumas reiškia, kad kai plyšys plinta per sritis su skirtingomis mechaninėmis savybėmis, kinta įtempių būvis, o tipinė irimo forma gali pakisti nuo normalaus atotrūkio iki šlyties.

Stipriojo perlitinio ketaus suirusių bandinio 6 (be tuštumų) ir bandinio 7 (su tuštumomis) pusių nuotraukos pateiktos 3.24 paveikle. Bandinyje be tuštumų irimo paviršius apytiksliai yra bandinio simetrijos plokštumoje. Bandinyje su tuštumomis dėl plyšio plitimo per silpniausias vietas (tuštumas) ir mikrostruktūros nevienalytiškumo suformuotas irimo paviršius yra labai sudėtingas ir asimetriškas. Nuovarginis plyšys kirto tuštumas, taip tuštumų vidinis paviršius prisidėjo prie irimo paviršiaus. Tuštumos yra chaotiškai pasiskirsčiusios bandinio tūryje ir paviršiuje. Jų dydis, forma bei išsidėstymas yra labai įvairūs. Tuštumų paviršiuje matomi dendritiniai dariniai.



3.24 pav. *Stipriojo perlitinio ketaus suirusių bandinių pusių vaizdai: kairėje – be tuštumų; dešinėje – su tuštumomis*

Apkrovimo režimo skirtumai veikia bandinį trumpą laiką arba tūkstančiais ciklų ir nulemia sudėtingą plyšio augimo trajektoriją, zigzago formos augimą bei kintantį plitimo greitį. Galima pastebėti, kad defektas daro įtaką plyšio trajektorijai nuo pat atsiradimo ir pastebimai veikia plyšio trajektoriją įpjovos aplinkoje. SEM nuotraukoje, padarytoje nuovarginio irimo srityje (3.25 paveikslo kairėje), matomas nesuiręs grafito branduolys (*A*) ir suskilęs bei ištrupėjęs branduolys (*B*).



3.25 pav. *Nuovarginio irimo sritis. Irimo mechanizmas – grūdelinis skilimas. Balta rodyklė rodo grūdo skilimo pradžią*

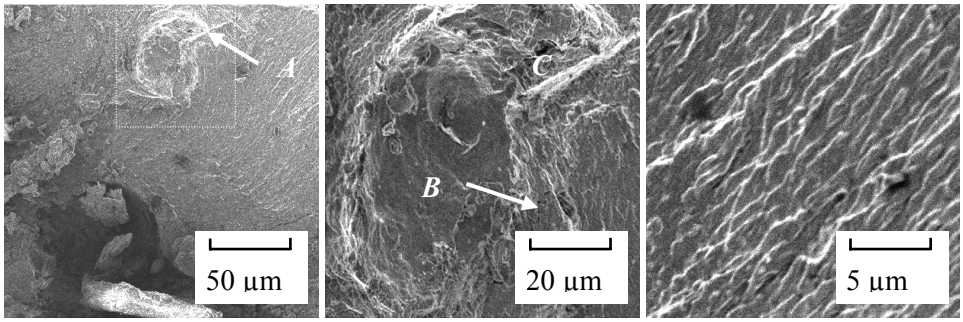
Grafito branduolių forma nėra visiškai taisyklingai apvali, tai patvirtino ir mikrostruktūros tyrimas. Matomi grūdelinio suirimo mechanizmo pėdsakai – plokštumos (*P*1, *P*2), atsiradusios suirus grūdui kristalografinėse plokštumose. Atskiri grūdai atrodo turintys kontūrą dėl lokalinio skilimo krypties kitimo. Šių plokštumų orientacija yra skirtinga pereinant nuo vieno grūdo prie kito, suformuojant palyginti nedidelio šiurkštumo matinį irimo paviršių. Plokštumų dydis atitinka grūdo dydį (vidutiniškai 150–300 µm). Irimo plokštumos kitimas nuo vieno grūdo prie kito sukelia bendrą netolygų, chaotišką irimo paviršiaus vaizdą. Tačiau esant pakankamam didinimui (3.25 paveikslo dešinėje), galima išskirti daugelį detalių, būdingų skilimui, pvz., vėduoklės formos raštą.

Grūdo irimo plokštumose aptinkama grūdelinio trūkio reljefo linijų, kurių orientacija atitinka lokalinio plyšio plitimo kitimo kryptį šiame grūde, primenančią vėduoklę. Jie prasideda viename grūdo sienelės taške ir plinta grūdu radialine kryptimi. Lokali plyšio plitimo kryptis priklauso nuo grūdų kristalografinių plokštumų orientacijos ir gali gana smarkiai skirtis nuo bendros makroplyšio plitimo krypties. Nedidelis aukščio skirtumas suformuoja „terasos“ vaizdą. Toks vaizdas yra būdingas grūdeliniam irimui skilimu, kai išankstinis skilimas ir trumpi plyšiai atsiranda artinantis plyšio frontui. Šios „terasos“ yra mažo aukščio laipteliai tarp skirtingų vietinių skilimo fasečių, esančių vienoje bendroje skilimo plokštumoje. Tokie laipteliai yra skilimo išilgai antrinėms

skilimo plokštumoms rezultatas ir siekiant energijos minimumo, jie jungiasi tarpusavyje plyšio plitimo kryptimi. Laiptelių aukštis priklauso nuo tempimo įtempių ir skilimo plokštumos krypčių nesutapimo tam tikro grūdo ribose. Grūdas, neturintis tokių skilimo pėdsakų, gali būti orientuotas statmenai tempimo įtempiams, tai palengvina irimą vienoje pagrindinėje plokštumoje, statmenoje tempimo įtempiams. *C* intarpas (3.25 paveikslo dešinėje) yra paviršiaus užteršimo rezultatas, korozijos pėdsakas arba intermetalinis intarpas.

Tiriant nuovarginio irimo paviršių tuštumų aplinkoje (3.26 pav.), pastebėtas sudėtingas irimo paviršiaus vaizdas su vietinės irimo krypties ir irimo mechanizmo pokyčiais bei antriniais plyšiais. Stingimo tuštumos paviršiaus vaizdas – chaotiški, galutinai nesuformuoti grūdai ir dendritiniai dariniai.

A rodyklė pažymėtas radialinis plyšys, kurio susidarymo mechanizmas aptartas 2 skyriuje. Augant plyšiui aplink grafito intarpą, kartais susidaro ir antriniai plyšiai (*B* rodyklė). Grafito aplinkoje chaotiškai pasiskirsčiusios fasetės kai kur yra atskirtos izoliuotomis duobutėmis. Tačiau deformacijos laipsnis, šioms mikroporoms susiliejant, neužtikrina didesnio plastiškumo, ir bendras irimo pobūdis išlieka makrotrapiu. Nuovarginių vagelių sritis (3.26 paveikslo dešinėje) būdinga vidutinio plyšio plitimo greičio ruožui ΔK – *da/dN* diagramoje. Tai reiškia, kad irimas tuštumos aplinkoje nebūtinai vyko staigiai. Tuštumos aplinkoje plyšys plinta sudėtingai – galimas ir tolygus plyšio plitimas, kai greta nėra nevienalytės mikrostruktūros. Ši vietinė plyšio plitimo kryptis skiriasi nuo bendrosios.

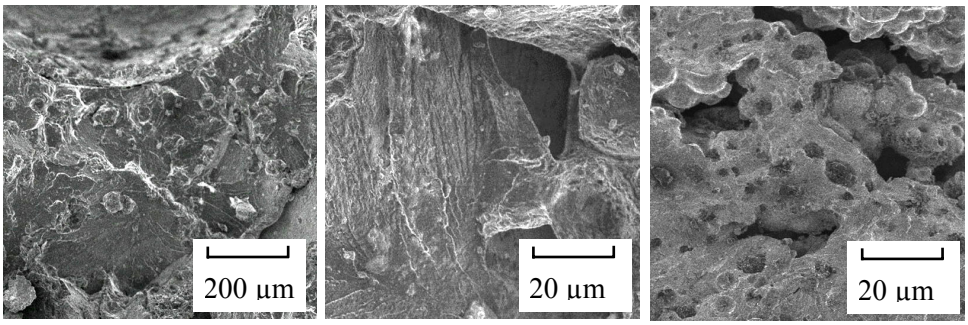


3.26 pav. *Nuovarginis irimas tuštumos aplinkoje. Kairėje: bendras vaizdas. Centre: irimas aplink grafito intarpą. Dešinėje: nuovarginės vagelės.*

Vietinė plyšio plitimo kryptis pastebimai skiriasi nuo bendrosios. Tai byloja apie mikrostruktūros netolygumą ir irimo tipinės formos kitimą tuštumos aplinkoje. Bendras irimo mechanizmas – grūdelinis skilimas. Gerai matomi suirę ir likę matricoje grafito branduoliai. Rodyklė parodo sritis, kur irimo paviršius

sutampa su grūdo paviršiumi (irimo mechanizmas tampa mišrus dėl tarpgrūdelinio irimo atsiradimo)

Liejimo tuštumos yra trumpųjų plyšių židinys (3.27 paveikslo kairėje, trumpieji plyšiai pažymėti balta rodykle). Dėl sunkiai nusakomų vietinių mechaninių savybių vietomis stebimas irimo mechanizmo pokytis nuo vyraujančio skilimo iki koalescencijos (3.28 paveikslo kairėje ir centre). Tačiau yra ir sričių, kur pastebimų skirtumų nerasta (3.28 paveikslo dešinėje).



3.27 pav. *Stipriojo perlitinio ketaus bandinių irimo paviršius liejimo tuštumų aplinkoje*

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Nustatytas pleišėjimo slenkstis medžiagai be tuštumų: austemperizuotam ketui ΔK_{th} = 7,4...8,7 MPa·m$^{1/2}$ prie $v = 10^{-10}$ m/ciklą ir ΔK_{th} = 7,2...8,6 MPa·m$^{1/2}$ prie $v = 10^{-11}$ m/ciklą ir mažiau; atitinkamai, perlitiniam ketui ΔK_{th} = 8,0...8,2 MPa·m$^{1/2}$ ir ΔK_{th} = 7,8...7,9 MPa·m$^{1/2}$.
2. Nustatyta, kad pleišėjimo slenkstis medžiagoje su tuštumomis kinta: austemperizuotam ketui ΔK_{thd} = 5,3...7,2 MPa·m$^{1/2}$ prie $v = 10^{-12}$ m/ciklą ir ΔK_{thd} = 5,5...7,7 MPa·m$^{1/2}$ prie $v = 10^{-10}$; stipriajam perlitiniam ketui ΔK_{thd} = 6,3…7,9 MPa·m$^{1/2}$ prie $v = 10^{-10}$ m/ciklą.
3. Fraktografinė analizė rodo, kad tuštumos turi įtaką irimo procesui: pagreitina plyšio plitimą, iškraipo magistralinio plyšio plitimo frontą, ertmių aplinkoje atsiranda antriniai plyšiai, kinta irimo kryptis ir mechanizmas.

4

Plyšio pavidalo defekto įtakos analitinis ir skaitinis tyrimas

Šiame skyriuje pristatomas defekto įtakos įtempių intensyvumo koeficientui ir pleišėjimo slenksčiui analitinis ir skaitinis tyrimas. Liejimo tuštumų sankaupą dažnai sudaro daugybė netaisyklingos formos mažų tuštumų, atskirtų sienelėmis su įvairia mikrostruktūra ir sunkiai nustatomomis mechaninėmis savybėmis. Toks medžiagos nevientisumas vienareikšmiškai turi tam tikrą neigiamą įtaką konstrukcinio elemento cikliniam stiprumui. Liejimo tuštuma iš esmės gali būti vertinama kaip tam tikras iš anksčiau egzistuojantis plyšys. Skaitiniam ir analitiniam tyrimui tuštumos modeliuojamos kaip plyšio pavidalo defektas.

Bandinių su tuštumomis pleišėjimo slenksčio sumažėjimas tiriamas analitiškai, remiantis mažėjančių geometrinių rodiklių prielaida. Pateikiamas tuštumų įtakos $da/dN - \Delta K$ priklausomybei analitinis tyrimas. Plyšio pavidalo defekto poveikio įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymui CT bandinyje tyrimas atliktas pasitelkus analitinį ir skaitinį baigtinių elementų metodą naudojantį programinį kompleksą ANSYS.

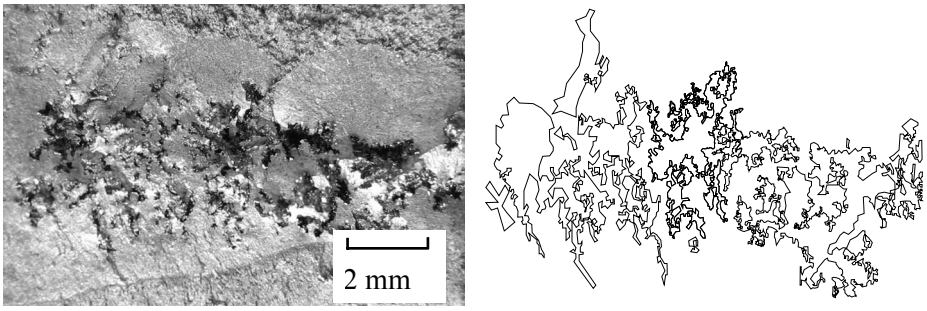
Skyriaus medžiaga publikuota autoriaus straipsniuose [1A–5A].

4.1. Skerspjūvio su tuštumomis geometrinių rodiklių *da/dN*-Δ*K* priklausomybei tyrimas

4.1.1 Skerspjūvio su tuštumomis geometriniai rodikliai

Tuštuma gali būti nagrinėjama iš irimo mechanikos pozicijų ir modeliuojama skaitiniais metodais. Laikoma, kad toks plyšys auga tada, kai įtempių intensyvumo koeficientas tuštumos pakraštyje viršija pleišėjimo slenkstį. Galima taikyti irimo mechanikos požiūrį ir kriterijus siekiant ištirti tokių defektų įtaką liejinio cikliniam stiprumui. Analizuojant sudėtingą įtempių ir deformacijų būvį, atsirandantį skerspjūvyje su ertme, reikia atsižvelgti į tai, kad liejimo tuštumos turi tiesioginę įtaką skerspjūvio geometriniams rodikliams. Tačiau šios įtakos įvertinimą apsunkina labai sudėtinga tuštumų forma, kuri neleidžia naudoti gerai žinomų formulių. Šiame darbe šiam tikslui pritaikyta skaičiuojamoji technika.

Siekiant įvertinti tuštumų įtaką skerspjūvio geometriniams rodikliams, bandinio lūžio paviršius yra optiškai nuskaitomas ir paverčiamas dvimačiu kompiuteriniu vaizdu. Priklausomai nuo lūžio, nuskaitymo skiriamosios gebos, defekto kontūro nustatymo tikslumas gali siekti 0,01mm. Skeneriu gaunamas neiškraipytas lūžio skerspjūvio rastrinis vaizdas su aiškiai matomais tuštumų kontūrais. Tolimesniems skaičiavimams realus lūžio skerspjūvis vertinamas kaip skerspjūvio be defektų ir pačių defektų skirtumas. Skaičiuojant tuštumų pėdsakai traktuojami kaip dvimačių uždarų sričių aibė, pateikta 4.1 paveikslo dešinėje.

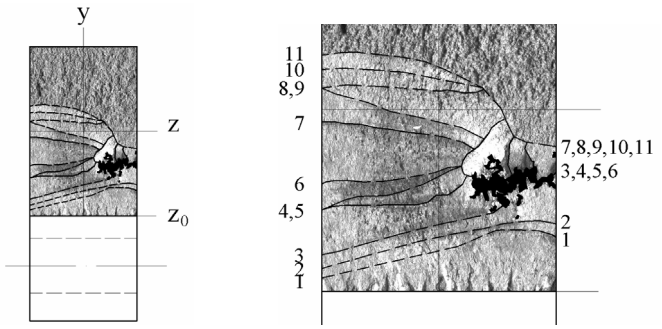


4.1 pav. *Tuštumų sankaupos kontūro nustatymas: kairėje – tikras tuštumos vaizdas; dešinėje – tuštumos ribos kompiuteriniame modelyje*

Darbui pasirinktas AutoCAD programinis paketas. Vizualiai tiriant bandinio lūžį mikroskopu ir didinamuoju stiklu, nustatomas tuštumų kiekis *n* ir jų kontūrai, kurie yra pažymimi skaičiuojamajame modelyje uždaromis kreivėmis. Šis etapas yra sudėtingas, nes reikalauja kruopštaus kontūro taškų nustatymo. Automatinis defekto ploto atpažinimas yra techniškai sudėtingas ir sudarytų

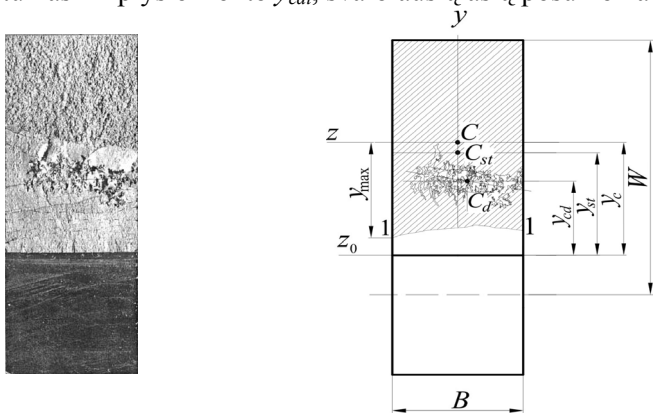
atskiro kompiuterinės technologijų uždavinį, todėl šiame darbe nebuvo nagrinėjamas.

Taip sudaryta skaičiuojamoji schema, kuri pateikta 4.2 paveiksle. Skaičiavimo schemoje paryškinamos plyšio stabdymo linijos (4.2 paveikslo dešinėje). Po linijų analizės bandinyje jos yra iš eilės sužymimos skaičiais ("1-1", "2-2" ir t. t.). Pastebėta, kad linijos susijungia defekto aplinkoje (dešinėje), o srityje be defektų linijos lieka atskiros (kairėje). Plyšio gylio matavimo rezultatai kairėje ir dešinėje taip pat turi pastebimų skirtumų. Ši operacija patikslina plyšio matavimo gylį, atliktą bandymo metu.



4.2 pav. *Austemperizuoto ketaus bandinio 4 su tuštumų sankaupa geometrinių rodiklių skaičiavimo schema: kairėje - bendras lūžio vaizdas su paryškintu defektu; dešinėje - plyšio stabdymo linijos (paryškintos)*

Autoriaus siūloma papildoma paprograme vartotojui leidžiama pasirinkti defekto kontūrą. Skaičiavimų rezultatas – tuštumų sankaupos ploto geometriniai rodikliai: *i*-tosios tuštumos plotas A_{di}, inercijos momentas I_{di}, defekto ploto centro padėtis ir jo atstumas iki plyšio fronto y_{cdi}, svarbiausių ašių posūkio kampas ir kt.



4.3 pav. *Geometrinių rodiklių skaičiavimo schema*

Nurodžius viso skerspjūvio kontūrą, apribotą iš vienos pusės plyšio frontu, o iš kitų – bandinio šonais, skaičiuojami bandinio skerspjūvio, nevertinant tuštumų, geometriniai rodikliai. Nustatomas skerspjūvio plotas A_{st} ir inercijos momentas I_{st}. Bandiniuose su tuštumomis nuovarginio plyšio fronto iškraipymas būna gana didelis, todėl paprogramės naudojimas yra naudingas ir didina skaičiavimų tikslumą. Tuo atveju, kai plyšys yra statmenas bandinio paviršiui, galima skaičiuoti pagal formules:

$$A_{st} = (W - a)B\,, \tag{4.1}$$

$$I_{st} = \frac{B(W-a)^3}{12}\,, \tag{4.2}$$

čia W – bazinis bandinio atstumas, a – plyšio ilgis; B – bandinio plotis.

Nustačius defektų plotų centrų atstumą iki pasirinktos ašies z_0 y_{cdi} ir skerspjūvio be defektų atstumą y_{sti} iki z_0, skaičiuojama skerspjūvio ploto centro C ordinatė y_c pagal formulę:

$$y_C = \frac{A_{st} - \sum A_{di} y_{Cdi}}{A_{st} - \sum A_{di}}\,, \tag{4.3}$$

čia A_{di} – i-tojo defekto plotas, y_{Cdi} – i-tosios tuštumos centro ordinatė.

Reikia patikrinti, kad viso skerspjūvio statinis momentas surasto centro atžvilgiu būtų lygus nuliui. Naudojama formulė:

$$S_z = \int y_i dA_i = \left(A_{st} - \sum A_{di}\right)\left(y_{st} - y_{cd}\right)) = 0\,. \tag{4.4}$$

Skaičiuojamas skerspjūvio su tuštumomis ašinis inercijos momentas:

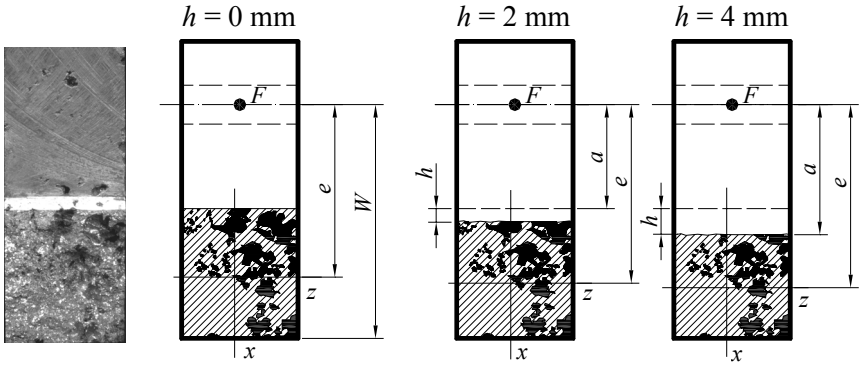
$$I_{zd} = I_{st} + A_{st}\left(y_c - y_{st}\right)^2 - \left(\sum I_{di} + \sum A_{di}\left(y_c - y_{cd_i}\right)^2\right). \tag{4.5}$$

Nustačius atstumą nuo tikrojo skerspjūvio centro C iki labiausiai nutolusio skerspjūvio taško $y_{\max}$, skaičiuojamas skerspjūvio atsparumo momentas, įvertinant neigiamą tuštumų įtaką:

$$W_{zd} = \frac{I_{zd}}{\left|y_{\max}\right|}\,. \tag{4.6}$$

Pateikta geometrinių rodiklių skaičiavimo metodika yra pritaikyta visiems bandiniams su tuštumomis. Atlikti skaičiavimai parodė, kad didžiausias tuštumų poveikis yra perlitiniam ketui. Nagrinėjant bandinio 7 skerspjūvio geometrinius rodiklius, sudaryta skaičiavimo schema, pateikta 4.4 paveiksle. Joje pažymėti plyšio gylis a, atstumas iki skerspjūvio centro e, jėgos pridėties taškas F. Skaičiavimų patogumui įvedamas santykinis plyšio gylis h, kuris skaičiuojamas nuo įpjovos viršūnės. Jis kinta nuo 0 iki 4 mm. Nagrinėjami atvejai, kai plyšys

paauga kas 0,5 mm; schemoje pateikti atvejai, kai h = 0; 2; 4 mm. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 4.1 lentelėje.



4.4 pav. *Geometrinių rodiklių skaičiavimo schema stipriojo perlitinio ketaus bandiniui 7*

Nustatyta, kad skerspjūvio be defektų ir skerspjūvio su tuštumomis geometrinių rodiklių santykiai siekia: A_{teor}/A_d = 1,34, I_{teor}/I_{zd} = 1,43, $W_{z\,teor}/W_{zd}$ = 1,42. Tai rodo, kad tuštumų sankaupa smarkiai sumažina bandinio skerspjūvio geometrinius rodiklius.

4.1 lentelė. *Stipriojo perlitinio ketaus bandinio 7 su tuštumomis skerspjūvio geometriniai rodikliai*

h, mm	Neįvertinant defektų			Įvertinant defektus		
	A_{teor}, mm^2	$I_{z\,teor}$, mm^4	$W_{z\,teor}$, mm^3	A_d, mm^2	I_{zd}, mm^4	W_{zd}, mm^3
0	356,4	11640	1176	265,8	8126	859
0,5	347,4	10780	1118	258,4	7405	807
1,0	338,4	9967	1060	252,1	6710	667
1,5	329,4	9192	1005	250,0	6118	623
2,0	320,4	8460	951	241,0	5675	597
2,5	311,4	7767	898	236,8	5329	582
3,0	302,4	7112	847	233,1	5045	573
3,5	293,4	6496	797	228,6	4723	558
4,0	284,4	5916	749	222,6	4323	529

Austemperizuoto ketaus bandinių geometriniai rodikliai kinta: plotas mažėja iki 8 %, atsparumo momentas – iki 23 %.

4.1.2 Įtempių intensyvumo koeficiento nevienalyčiuose bandiniuose analitinis tyrimas

Atlikta bandinių su tuštumomis skerspjūvio geometrinių rodiklių analizė leidžia teigti, kad tuštumos pastebimai mažina skerspjūvio plotą A bei atsparumo momentą W. Šie du dydžiai yra svarbūs nagrinėjant nominalius įtempius, kylančius necentrinio tempimo bandinio plyšio viršūnėje. Nominalūs įtempiai plyšio viršūnėje nuo ašinės jėgos N ir lenkimo momento M skaičiuojamu pagal formulę:

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{M}{W}. \tag{4.1}$$

Realūs įtempiai skerspjūvyje su tuštumomis yra didesni dėl mažesnių geometrinių rodiklių. Taikome skerspjūvio su tuštumomis geometrinių rodiklių skaičiavimo metodiką. Panaudoję bandymo metu registruotas jėgos F reikšmes, galima paskaičiuoti įtempius bandinio su tuštumomis plyšio viršūnėje:

$$\sigma_d = \frac{F}{A_d} + \frac{M}{W_d} = \frac{F}{A_d} + \frac{F \cdot \left(y_{ip} + y_c\right)}{W_d}, \tag{4.2}$$

čia y_{ip} – atstumas nuo jėgos pridėties taško iki įpjovos, y_c – tikrojo skerspjūvio centro padėtis (skaičiuojamoji schema pateikta 3.13 paveiksle)

Įtempių intensyvumo formulę (3.1), taikomą reglamentuojamoje metodikoje, galima užrašyti šia forma:

$$\begin{aligned} K &= \frac{F}{B\sqrt{W}}\left(\frac{2+\lambda}{(1-\lambda)^{3/2}}\right)\varphi(\lambda) = \frac{F}{B\sqrt{W}}\left(\frac{(2+\lambda)(1-\lambda)^{1/2}}{(1-\lambda)^2}\right)\varphi(\lambda) = \\ &= \frac{F}{B\sqrt{W}}2W\left(\frac{(2+\lambda)(1-\lambda)^{1/2}}{(1-\lambda)^2 2W}\right)\varphi(\lambda). \end{aligned} \tag{4.3}$$

Nominalūs įtempiai plyšio viršūnėje skaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma = \frac{2F}{BW}\frac{2+\lambda}{(1-\lambda)^2}. \tag{4.4}$$

Įstatę išraišką (4.4) į (4.3), gauname įtempių intensyvumo koeficiento formulę, naudojant nominalius įtempius plyšio viršūnėje:

$$K = 0{,}5\sigma W^{1/2}(1-\lambda)^{1/2}\varphi(\lambda). \tag{4.5}$$

Įvertinus tuštumų įtaką skerspjūvio geometriniams rodikliams bandiniui su

tuštumomis, gauname įtempių intensyvumo koeficiento skaičiavimo formulę:

$$K_d = 0{,}5\,\sigma_d\, W^{1/2}(1-\lambda)^{1/2}\varphi(\lambda). \tag{4.6}$$

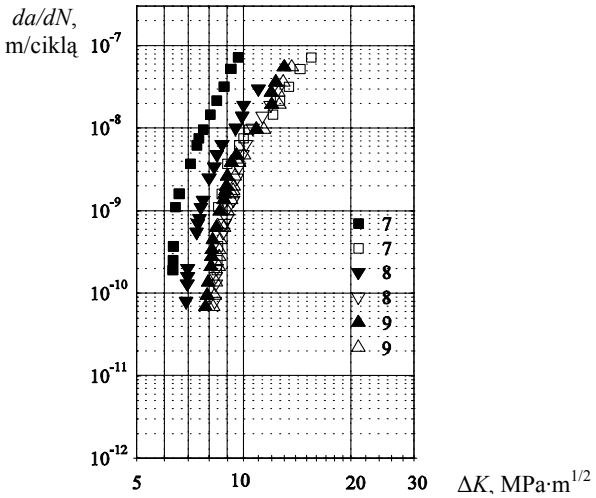
Kai pasiekiamas pleišėjimo slenkstis, ribinio įtempių intensyvumo koeficiento intervalas skaičiuojamas pagal formulę:

$$\Delta K_{thd} = 0{,}5\,\Delta\sigma_{thd}\, W^{1/2}(1-\lambda)^{1/2}\varphi(\lambda), \tag{4.7}$$

čia ΔK_{thd} – pleišėjimo slenkstis medžiagai su defektu; $\Delta\sigma_{thd}$ – ribiniai tikrieji įtempiai plyšio viršūnėje.

Taikant formulę (4.6) bandymo metu gautoms K reikšmėms, gaunama nemažai patikslintų įtempių intensyvumo koeficiento K_d reikšmių, kurios atspindi kintančią tuštumų įtaką įtempių koeficiento intervalui. Šios reikšmės skaičiuojamos esant skirtingiems plyšio gyliams ir plitimo greičiams, fiksuotiems bandymo metu. Taip eksperimentiškai gautoje da/dN – ΔK priklausomybėje atidedamos naujos, patikslintos ΔK reikšmės.

Pritaikius šią metodiką stipriojo perlitinio ketaus bandinių su tuštumomis (7, 8, 9) rezultatams, gauta patikslinta da/dN – ΔK priklausomybė, pateikta 4.5 paveiksle. Išanalizavus priklausomybes, pastebėta, kad patikslintos reikšmės yra artimos ΔK reikšmėms, gautoms eksperimentiškai medžiagai be tuštumų. Patikslintas pleišėjimo slenkstis yra ΔK_{thd} = 8,2...8,4 MPa·m$^{1/2}$, o medžiagos be defektų – ΔK_{thd} = 8,0...8,2 MPa·m$^{1/2}$.



4.5 pav. *Stipriojo perlitinio ketaus bandinių 7, 8, 9 su tuštumomis plyšio plitimo greičio ir įtempių intensyvumo koeficiento intervalo priklausomybės: ■, ▼, ▲ – reikšmės, gautos pagal formulę (2.1); □, ∇, Δ - patikslintos reikšmės pagal formulę (4.6)*

Tai patvirtina išvadas, suformuluotas po austemperizuoto ketaus bandymų analizės, kad tuštumų įtaka įtempių intensyvumo koeficientui pasireiškia, bet neapsiriboja mažėjančiais skerspjūvio geometriniais rodikliais.

4.2. Įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymas nevienalyčiuose bandiniuose

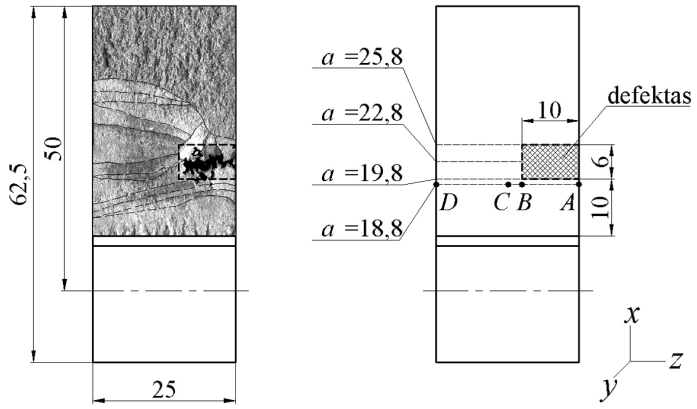
Nevienalyčio konstrukcinio elemento skaičiuojamosios eksploatacijos trukmės užtikrinimas susijęs su galimų nuovarginių plyšių atsiradimo ir plitimo analize. Atliekant eksperimentinius tyrimus, aktualus yra plyšio plitimo tyrimas CT bandinyje su defektu. Analizuojant irimo procesą bandinyje su defektu, svarbus įtempių intensyvumo koeficiento nustatymo uždavinys tam tikruose būdinguose skerspjūvio taškuose. Toks tyrimas paaiškintų plyšio plitimo ypatumus bandinyje su tuštuma.

Tolimesniems skaitiniams ir analitiniams tyrimams taikoma kvazistatinio uždavinio prielaida, kai neatsižvelgiama į kintantį apkrovimo jėgos pobūdį. Laikoma, kad modelyje naudojama apkrovimo jėgos reikšmė atitinka didžiausią apkrovimo ciklo metu pridedamą jėgą F_{max}, kuri nustatoma remiantis eksperimento metu užfiksuotomis jėgos F ir ciklo asimetrijos koeficiento R reikšmėmis. Palyginimui laikoma, kad jėgos reikšmė nekinta visose plyšio gyliuose ir atitinka pradiniame plyšio gylyje nustatytą reikšmę.

4.2.1 Analitinis tyrimas

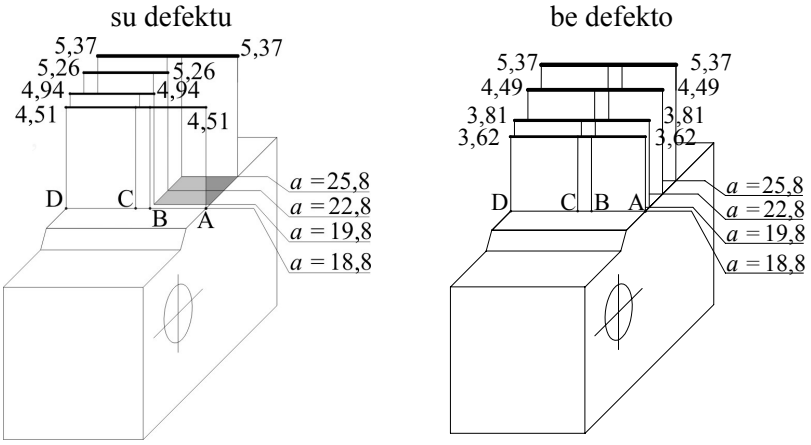
Siekiant ištirti įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymą ir jo kitimą plyšiui plintant bandinyje su defektu, pritaikyta ankščiau aprašyta metodika, įvertinanti geometrinių rodiklių įtaką įtempių intensyvumo koeficientui.

Analitiniam ir skaitiniam tyrimui pasirinktas austemperizuoto ketaus bandinys 5 su tuštuma. Po tuštumos dydžio ir padėties analizės padaryta prielaida, kad bendri sankaupos gabaritai neviršija 10×6 mm, o atstumas nuo tokio dirbtinio defekto krašto iki įpjovos viršūnės yra 10 mm (skaičiuojamoji schema pateikta 4.6 paveiksle). Pasirinktos kelios būdingos plyšio gylio reikšmės, kai a = 18,8; 19,8; 22,8 ir 25,8 mm kartu su keliais būdingais taškais (A, B, C ir D), kuriuose būtų lyginamos įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės. Vėliau ta pati schema buvo naudota bandinio su plyšio defekto skaitiniuose tyrimuose naudojant BEM (4.2.2 skirsnis).



4.6 pav. *Bandinio su dirbtiniu defektu skaičiuojamoji schema*

Apkrovimo jėga visose padėtyse yra vienoda, vertinant įtempių intensyvumo koeficiento didėjimą plintant plyšiui. Jos reikšmė parinkta pagal bandymo metu užfiksuotą jėgą esant plyšio gyliui a = 18,8 mm (F_{max} = 3000 N). Skaičiavimo rezultatai pateikti 4.7 paveiksle, palygintas bandinio su dirbtiniu defektu ir bandinio be defekto įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymas palei plyšio frontą. Matome, kad defektas pastebimai padidina įtempių intensyvumo koeficiento reikšmes. Didesnis skirtumas (iki 22,9 %) yra pradinėje plyšio plitimo stadijoje (plyšio gylis a = 19,8 mm), kai įtaką turi skerspjūvio geometrinių rodiklių sumažėjimas bei trumpesnis plyšio frontas ir kartu didesni įtempiai plyšio viršūnėje.



4.7 pav. *Įtempių intensyvumo pasiskirstymas bandinyje, įvertinus defekto įtaką skerspjūvio geometriniams rodikliams*

Pažymėtina, kad gautos įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės, esant tam pačiam plyšio gyliui, yra vienodos per bandinio storį. Tai aiškinama tuo, kad geometrinių rodiklių įtakos skaičiavimas neatspindi sudėtingo įtempių ir deformacijų būvio, atsirandančio bandinio gylyje ir defekto aplinkoje. Iš kitos pusės, skaičiavimuose įvertinamas tik skerspjūvio centro padėties pasikeitimas y ašies kryptimi (dydis y_c skaičiuojamojoje schemoje), todėl neatsižvelgiama į defekto padėtį bandinyje z ašies kryptimi.

Šie skaičiavimai yra reikšmingi siekiant ištirti įtempių intensyvumo koeficiento kitimą bandinyje su defektais ir be jų. Tikslesnį rezultatą leistų pasiekti skaitinių metodų taikymas, todėl atliktas papildomas skaitinis tyrimas.

4.2.2 Skaitinis tyrimas

Bandinyje su defektu atsiranda sudėtingas įtempių ir deformacijų būvis, kurio tyrimui gali būti efektyviai taikomas BEM. Siekiant ištirti defekto įtaką įtempių ir įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymui, sukurtas erdvinis necentrinio tempimo bandinio modelis. Stipriajame ketuje plastinių deformacijų srities dydis, lyginant su bendru plyšio ilgiu, yra palyginti mažas (šių tyrimų naudojamuose bandiniuose plastinė zona neviršija 40 μm). Todėl galima laikyti, kad stipriojo ketaus atveju nagrinėjamas tiesinis kvazitrapus uždavinys.

Analitinis įtempių intensyvumo koeficiento nustatymas daugumai realių konstrukcinių elementų yra problematiškas dėl dažnai sudėtingos detalių ir plyšio geometrinės formos. Todėl skaitinis įtempių intensyvumo koeficiento nustatymas yra plačiai paplitęs ir vis dar aktualus skaičiavimo metodų uždavinys. Taikant skaičiuojamuosius metodus, neretai susiduriama su skaičiavimo rezultatų patikrinimo ir palyginimo problema.

Literatūroje sutinkama nemažai analitinių formulių, leidžiančių apskaičiuoti didžiausią įtempių intensyvumo koeficiento reikšmę esant idealizuotai kūno ir plyšio geometrinei formai. Tačiau analitinis įtempių intensyvumo koeficiento nustatymas aplink defektą yra labai sudėtingas. Defektais galima laikyti plokščius plyšius arba tuštumas, esančias kūno viduje arba paviršiuje. Plyšiai, esantys kūno paviršiuje arba tūryje, sukelia didesnius įtempius nei tuštumos. Didesni yra ir įtempių intensyvumo koeficientai. Idealizuotoms tuštumoms būdingas tam tikras paviršiaus užapvalinimo spindulys. Tačiau tiriamuosiuose bandiniuose aptiktos tuštumos turi kur kas sudėtingesnę formą ir kai kurie jų kraštai yra artimi plyšiui. Todėl tyrimui buvo pasirinktas modelis su plyšio defektu.

Baigtinių elementų metodas yra taikomas irimo mechanikos parametrų skaičiavimams plyšio aplinkoje. Šis metodas leidžia nustatyti įtempių ir poslinkių pasiskirstymo lauką plyšio aplinkoje ir taikyti irimo mechanikos dėsningumus, įvertinant plyšio būvį. Skirstomi tiesioginiai ir netiesioginiai K_I

skaičiavimo būdai. Prie pirmųjų priskirtinas skaičiavimas per poslinkius arba įtempius. Prie antrųjų – naudojant *J*-integralą arba atpalaiduojamos energijos kiekį *G*. Šiame darbe naudojami 3 skaitiniai įtempių intensyvumo koeficiento skaičiavimo būdai:

- plyšio kraštų poslinkių aproksimacijos būdas;
- naudojantis standartine ANSYS įtempių intensyvumo koeficiento skaičiavimo funkcija KCALC;
- įtempių intensyvumo koeficiento nustatymas remiantis *J*-integralo skaičiavimu.

4.2.2.1. Įtempių intensyvumo koeficiento nustatymas poslinkių metodu

Tampriojo kūno poslinkiai plyšio aplinkoje nusakomi priklausomybėmis (2.1–2.3), kurias pateiksime kiek kitaip:

$$\left.\begin{aligned} u &= \frac{K_I}{4G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\left((2\mu-1)\cos\frac{\theta}{2}-\cos\frac{3\theta}{2}\right)-\frac{K_{II}}{4G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\left((2\mu+3)\sin\frac{\theta}{2}-\sin\frac{3\theta}{2}\right)+\mathrm{O}(r),\\ v &= \frac{K_I}{4G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\left((2\mu-1)\sin\frac{\theta}{2}-\sin\frac{3\theta}{2}\right)-\frac{K_{II}}{4G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\left((2\mu+3)\cos\frac{\theta}{2}-\cos\frac{3\theta}{2}\right)+\mathrm{O}(r),\\ w &= \frac{K_{III}}{G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\sin\frac{\theta}{2}+\mathrm{O}(r), \end{aligned}\right\} \quad (4.8)$$

čia u, v, w – poslinkiai vietinėje Dekarto koordinačių sistemoje x, y ir z kryptimis atitinkamai, r, θ – koordinatės vietinėje cilindrinėje koordinačių sistemoje; G – šlyties modulis, K_{I}, K_{II}, K_{III} – įtempių intensyvumo koeficientai įvairioms deformavimo formoms (plyšio tipams); ν – Puasono koeficientas; $O(r)$ – aukštesnės eilės nariai; μ – įtempių ir deformacijų būvį įvertinantis koeficientas, lygus:

$$\mu = \begin{cases} 3-4\nu & \text{triašiam įtempių būviui,} \\ \dfrac{3-\nu}{1+\nu} & \text{dviašiam įtempių būviui.} \end{cases} \quad (4.9)$$

Panaikinus aukštos eilės narius ir kai $\theta = 180^{\circ}$, lygčių (4.8) forma yra :

$$u = \frac{K_I}{4G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}(1+\mu),$$
$$v = \frac{K_{II}}{2G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}(1+\mu), \tag{4.10}$$
$$w = \frac{2K_{III}}{G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}.$$

Nagrinėjant I tipinę irimo formą, domina tik pirmoji lygtis. Nagrinėdami simetrinį plyšį, užrašome:

$$K_I = \sqrt{2\pi}\,\frac{2G}{1+\mu}\,\frac{|\Delta u|}{\sqrt{r}}, \tag{4.11}$$

čia Δu – plyšio paviršiaus taškų poslinkis.

Nežinomas daugiklis dešinėje dalyje (4.11) yra ieškomas per priklausomybę:

$$\frac{|\Delta v|}{\sqrt{r}} = A + Br\,. \tag{4.12}$$

Siekiant nustatyti parametrus A ir B lygtyje (4.12), naudojamos taškų I, J ir K, esančių plyšio paviršiuje, poslinkių reikšmės, gautos sprendžiant šį uždavinį skaitiniu būdu (skaičiavimo schema pateikta 4.8 paveiksle). Kadangi plyšio viršūnėje (taške I) poslinkis $v = 0$, tai poslinkių taškuose J ir K pakanka, kad nustatytume nežinomuosius A ir B. Toliau įvertinus tai, kad:

$$\lim_{r\to 0}\frac{|\Delta v|}{\sqrt{r}} = A, \tag{4.13}$$

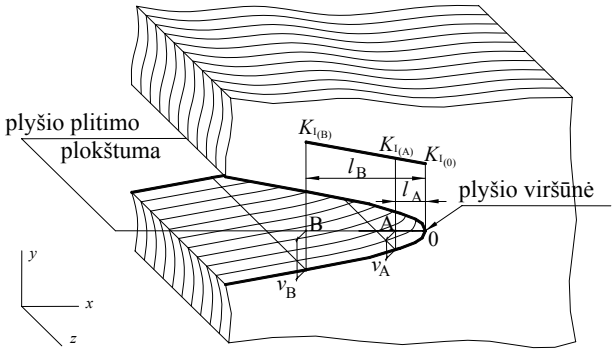
Turime ieškomą įtempių intensyvumo koeficientą:

$$K_I = \sqrt{2\pi}\,\frac{2GA}{1+\mu}\,. \tag{4.14}$$

Nustatę įtempių intensyvumo koeficientą taškuose A ir B, gauname reikšmes, tiesiškai ekstrapoliuojamas plyšio viršūnės 0 link.

$$K_{I(0)} = K_{I(A)} - \frac{K_{I(B)} - K_{I(A)}}{l_B - l_A}\cdot l_A\,, \tag{4.15}$$

čia $K_{I(0)}$ yra ieškoma reikšmė plyšio viršūnėje, $K_{I(\mathrm{A})}$ – reikšmė taške A, $K_{I(\mathrm{B})}$ – reikšmė taške B, l_A – atstumas nuo plyšio viršūnės iki taško A, l_B – atstumas nuo plyšio viršūnės iki taško B.



4.8 pav. *Įtempių intensyvumo koeficiento plyšio viršūnėje skaičiavimo schema*

Naudojant erdvinio BEM uždavinio sprendimo rezultatus, sudaroma naudojamų skaičiavimams mazgų poslinkio reikšmių matrica. Įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės išilgai plyšio fronto skaičiuojamos pagal ankščiau pateiktas formules. Šis būdas įvertina įtempių būvio bandinyje su defektu erdviškumo įtaką, nes gaunamos poslinkių reikšmės yra didesnės kūno tūryje, kur vyrauja triašis įtempių būvis.

4.2.2.2. Įtempių intensyvumo koeficiento nustatymas naudojant standartinę ANSYS funkciją

Panašų aukščiau aprašytajam metodą naudoja programiniame komplekse ANSYS numatyta standartinė funkcija KCALC, leidžianti nustatyti įtempių intensyvumo koeficiento reikšmę plyšio viršūnėje, esant simetriniam atvejui (pagal 3 taškus) ar nesimetriniam atvejui (pagal 5 taškus). Nedaug skiriasi tik ekstrapoliavimo metodas. Įtempių būvis yra įvertinamas tik ribinėmis sąlygomis, taikant dviašio ar triašio būvio prielaidas. KCALC funkcija numato 3 etapus: apibrėžti plyšį nusakantį kontūrą; atlikti skaičiavimus; nuskaityti skaičiavimo rezultatus. Atliekant išsamesnę analizę, ši funkcija gali būti naudinga kaip patikros priemonė, tačiau ji apsiriboja 2 kraštiniais įtempių būvio atvejais, kurie yra mažiau naudingi nagrinėjant įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymą defekto aplinkoje.

Pažymėtina, kad nustatant plyšio frontą, plyšį nusakančio kontūro mazgų pasirinkimas nėra griežtai nusakytas. Rekomenduojama rinktis singuliarių elementų mazgus, įvertinant tai, kad šie elementai yra artimiausi plyšio viršūnei ir todėl tiksliausiai nusako poslinkių laukus plyšio viršūnėje.

4.2.2.3. Įtempių intensyvumo koeficiento nustatymas *J*-integralu

Tiesioginis *J*-integralo skaičiavimas atliekamas nepriklausomai nuo integravimo kontūro ir naudojant priklausomybę (Rice, 1968):

$$J = \int_{\Gamma} W \mathrm{d}y - \int_{\Gamma} T_i \frac{\delta u_i}{\delta x} ds \,, \tag{4.16}$$

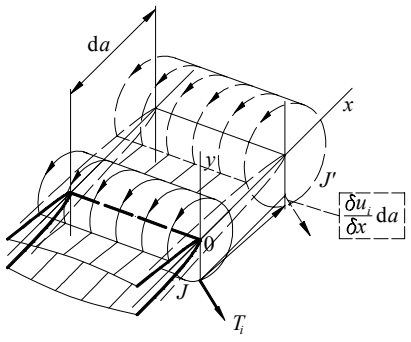
čia Γ – kontūras, apimantis plyšio viršūnę ir prasidedantis apatiniame plyšio paviršiuje ir pasibaigiantis viršutiniame; $T_i = \sigma_i \varepsilon_i$ – vienetinio išorinės normalės kontūrui *ds* vektoriaus dedamoji; σ_i – įtempių dedamoji; ε_i – deformacijų dedamoji; u_i – poslinkių vektorius; *ds* – atstumas palei integravimo kontūrą Γ; *W* – santykinė deformacijos potencinė energija lygi:

$$W = W\left(\varepsilon_{ij}\right) = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \,. \tag{4.17}$$

Skaičiavimą iliustruoja schema, pateikta 4.9 paveiksle. Taikant *J*-integralo skaičiavimą modeliui su singuliariais elementais viršūnėje, atsižvelgiama į tai, kad *J*-integralas yra singuliarių narių koeficientas išraiškose, nusakančiose įtempių ir deformacijų dedamąsias plyšio viršūnės aplinkoje, o poslinkiai plyšio viršūnėje yra aprašomi formule:

$$u_i = \frac{\alpha \sigma_0}{E} \left(\frac{EJ}{\alpha \sigma_0^2 I_n r} \right)^{\frac{n}{n+1}} r \tilde{u}_i \left(\theta, n\right), \tag{4.18}$$

čia σ_0 – įtempis, kuris dažniausiai prilyginamas takumo įtempiams, I_n – laipsnio *n* ir įtempių būvio funkcija, $\tilde{u}_i$ – bedimensė kampo θ ir deformacinio stiprėjimo laipsnio *n* funkcija, α – bedimensė konstanta.



4.9 pav. *J-integralo skaičiavimo schema*

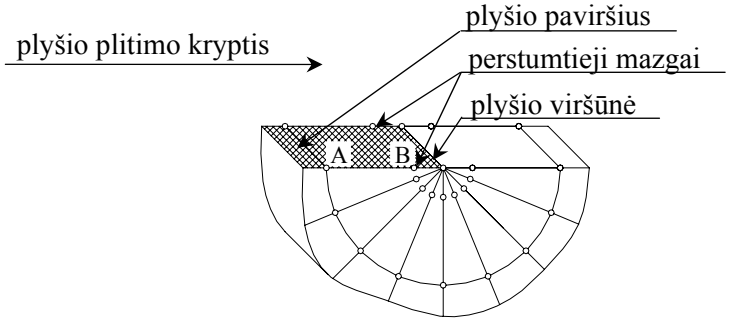
Nagrinėjamojo kūno įtempių ir deformacijų būvis laikomas žinomu, išsprendus atitinkamą tamprų uždavinį prieš pradedant skaičiuoti *J*-integralą. Apibrėžus skaičiavimų geometrinius dydžius, apskaičiavus *J*-integralą ir laikant, kad realizuojamas plokščias įtempių būvis, įtempių koeficientas skaičiuojamas pagal formulę:

$$K = \sqrt{EJ}\ . \tag{4.19}$$

4.2.2.4. Baigtinių elementų modelio aprašymas

Šiam irimo mechanikos uždaviniui spręsti ypatingai svarbu sukurti ANSYS rekomendacijas atitinkančio baigtinių elementų tinklą plyšio viršūnės aplinkoje. BEM vystymo pradžioje nebuvo atsižvelgiama į irimo mechanikos uždavinių sprendinio ypatumus plyšio aplinkoje, todėl sprendinys dažnai priklausė nuo plyšį nusakančių atraminių taškų pasirinkimo. Taip gauti rezultatai nebuvo pakankamai tikslūs, todėl norint gauti tikslesnį sprendinį, reikia tankinti baigtinių elementų tinklą plyšio fronto aplinkoje, bet tai didina sprendimo laiką ir reikalavimus, keliamus kompiuterinės technikos resursams.

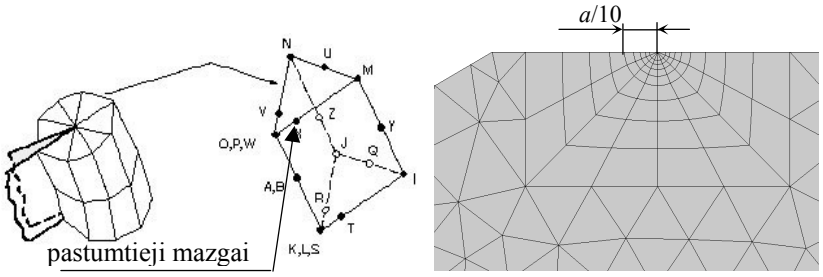
Tiesinėje irimo mechanikoje laikoma, kad plyšio viršūnės aplinkoje jie yra proporcingi $\sqrt{r}$ (r – atstumas iki plyšio viršūnės). Taip pat yra žinoma, kad įtempių, deformacijų ir poslinkių pasiskirstymai gali būti nusakyti taikant deformacijų teoriją ir tikslesnius netiesinės mechanikos sprendinius (Hutchinson, Rice ir Rosengren vardais šis sprendimo būdas pavadintas HRR-singuliarumu). Norint gauti tikslesnius rezultatus, plyšio fronto aplinkos modeliavimui verta naudoti specialius baigtinius elementus. Įvairių specialių elementų naudojimas kartu su įprastiniais elementais buvo tiriami yra aktualus skaičiuojamosios irimo mechanikos uždavinys, kuriam skirta nemažai darbų (Chan, Tuba, Wilson, 1970; Hilton, 1984–2004; Leitao, Aliabadi, 2000).



4.10 pav. *Singuliarūs baigtiniai elementai plyšio viršūnėje*

Tokių specialių elementų naudojimas leidžia pasiekti aukštą įtempių intensyvumo koeficiento skaičiavimo tikslumą ir užtikrina, kad įtempių

intensyvumo koeficiento reikšmė nepriklausytų nuo pasirinktų aproksimacijai taškų kiekio. Paskutiniu metu toks skaičiavimo metodas tampa vis populiaresnis, nes nereikalauja didelio baigtinių elementų skaičiaus ir leidžia sumažinti reikalavimus kompiuterinių sistemų pajėgumams. Singuliariais baigtiniais elementais vadinami erdviniai trikampės prizmės formos elementai, kuriuose 2 gretimos briaunos yra sujungtos plyšio viršūnėje, kaip parodyta 4.10 paveiksle. Šių elementų mazgai apie plyšio viršūnę yra perstumti viršūnės link per ¼ viso elemento ilgio (t. y. per ¼ *r*). Ši technologija leidžia panaudoti netiesinės mechanikos privalumus sprendžiant tiesinį uždavinį. ANSYS metodinėje literatūroje nurodoma, kad nagrinėjant plyšio uždavinį, būtina sukurti tokį BE tinklą, kuris plyšio viršūnėje būtų sudarytas iš singuliarių išsigimusių BE. Rekomenduojama, kad singuliarių elementų spindulys neviršytų *a*/8, kur *a* – plyšio ilgis. Tačiau standartinės ANSYS rekomendacijos yra patobulintos (Thorwald, Anderson, 2004; Шадский, Муйземнек, Морозов, 2008) ir pritaikius šias rekomendacijas sprendžiamam uždaviniui, plyšio viršūnėje naudojami singuliarūs BE, kurių ilgis yra 1/40 nuo plyšio gylio. Jų vidurinis mazgas yra pastūmimas per ¼ elemento ilgio plyšio viršūnės link, kaip parodyta 4.11 paveikslo kairėje.



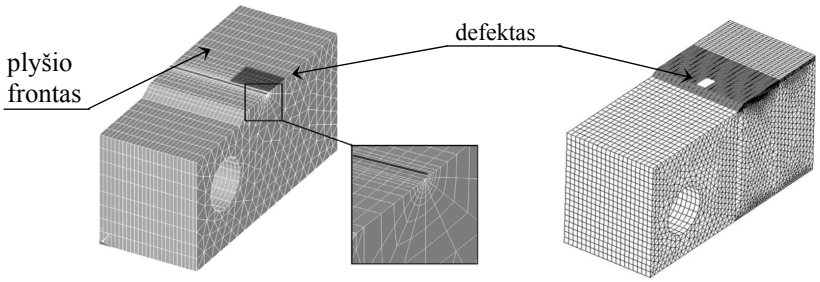
4.11 pav. *BE tinklas plyšio viršūnėje: kairėje – BE mazgai plyšio viršūnėje; dešinėje – specialių BE tinklas plyšio viršūnės aplinkoje*

Plyšio viršūnė paverčiama tinklo koncentratoriumi, kuriame kartu susieina 8 singuliarūs elementai, tarpusavyje sudarydami 22,5º kampus. Tai padidina skaičiavimų tikslumą ir viršija standartines ANSYS rekomendacijas. Toliau nuo plyšio kuriamas specialus sutankintas koncentrinių baigtinių elementų tinklas su sutankinimu, kurio pagalbinio apskritimo spindulys siekia *a*/10, parodytas 4.7 paveikslo dešinėje. Sukurti erdviniai modeliai atitinka austemperizuoto ir stipriojo perlitinio ketaus eksperimentiniuose bandymuose naudotų bandinių puses, panaudojant simetrijos privalumus. Pradžioje sukuriamas dvimatis geometrinis modelis, kuris vėliau vystomas nuo paprastesnių elementų (taškų ir linijų) iki sudėtingesnių (paviršių ir tūrių). Naudojamų baigtinių elementų tipas – SOLID 95. Trimatis modelis sukurtas iš kelių baigtinių elementų sluoksnių. Sluoksnių storis neviršija 0,5 mm. Tuo

siekiama, kad galima būtų pakankamai tiksliai analizuoti K_I pasiskirstymą išilgai plyšio fronto ir plyšio aplinkoje. Modelio tūriai, nutolę nuo plyšio srities, yra padalinami į retesnį baigtinių elementų tinklą, kaip pateikta 4.7 paveiksle.

Skaitinio tyrimo pradžioje buvo išbandyti alternatyvūs tinklai be specialių elementų arba su kitomis specialių elementų proporcijomis. Tačiau jų sprendinių tikslumas blogesnis už aprašytąjį BE modelį.

Skaičiuojant *J*-integralu, papildomai galima naudoti baigtinių elementų modelį su sutankintu tinklu plyšio aplinkoje, sudarytą iš stačiakampės formos baigtinių elementų, parodytų 4.12 paveikslo dešinėje. Baigtinių elementų modeliui su singuliariais elementais naudojama kita paprogramė (makrosas).

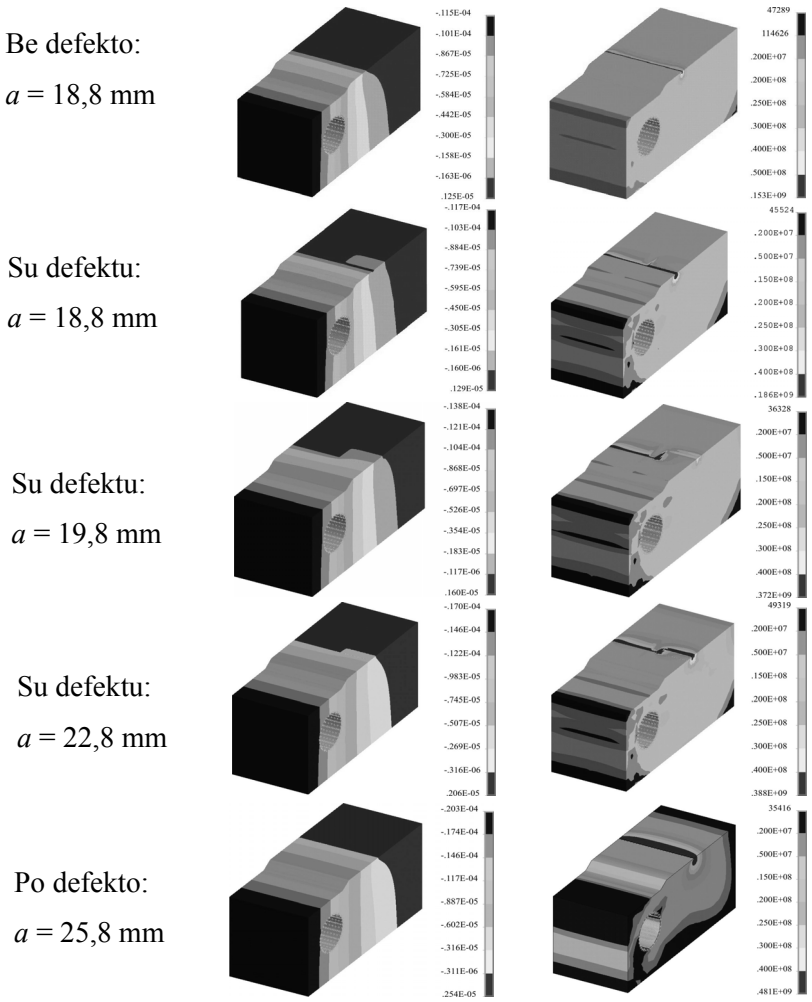


4.12 pav. *Naudojamų BE tinklų vaizdai: kairėje – su singuliariais elementais (austemperizuoto ketaus bandinio modelis), dešinėje – su stačiakampės formos elementais (stipriojo perlitinio ketaus bandinio modelis)*

Nagrinėjant tiesinės irimo mechanikos uždavinį, medžiagos modelis yra izotropinis ir tamprus. Naudojami stipriojo ketaus mechaniniai rodikliai: tamprumo modulis E = 175 GPa; Puasono koeficientas ν = 0,275. Sprendžiant uždavinį be defekto, vertikalioje simetrijos plokštumoje modelio centre įvedama plokščios deformacijos sąlyga: šiai plokštumai priklausančių mazgų poslinkis z ašies kryptimi yra lygus nuliui (UZ = 0). Parenkant modelį su plyšio dirbtiniu defektu bandinio šone ir centre, taikoma prielaida, kad defektas yra sritis, kuriai apribojimas UY = 0 nėra taikomas. Nagrinėjama keletas būdingų atvejų, kai skirtingo dydžio plyšio defektas yra bandinio centre arba šone.

4.2.2.5. Plyšio defekto, esančio bandinio šone, tyrimas

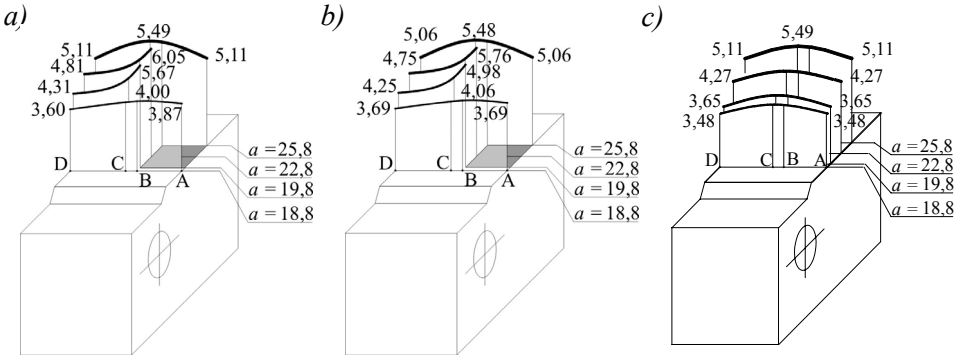
Sukurto modelio matmenys atitinka austemperizuoto ketaus bandinius (B = 25 mm, W = 50 mm). Uždavinio skaičiuojamoji schema pateikta 4.6 paveiksle. Defektas yra bandinio šone, jo dydis – 10×6 mm. Palyginimui pateikiami BE modelio be defekto skaičiavimų rezultatai. Poslinkių y ašies kryptimi, naudojamų K_I skaičiavimams, ir Mises'o įtempių pasiskirstymas pateikti 4.13 paveksle.



4.13 pav. *Poslinkių (kairėje) bei Mises'o įtempių (dešinėje) pasiskirstymas*

Poslinkių metodu ir *J*-integralo metodu gautos įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės modeliui su dirbtiniu defektu yra pateiktos 4.14 paveiksle. Galima pastebėti, kad defektas pastebimai didina įtempių intensyvumo koeficiento reikšmes palei visą plyšio frontą, lyginant su modeliu be defekto, kurio rezultatai pateikti 4.14 (c) paveiksle. Skirtumas atsiranda jau pirmoje nagrinėjamoje padėtyje, esant plyšio frontui arti defekto (a = 18,8 mm). Jis padidėja pasiekus defektą (a = 19,8 mm), o plyšiui pusiau praėjus defektą (a = 22,8 mm), gautos didžiausios įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės ties defekto riba taške C (K = 6,05 MPa·m$^{1/2}$). Kai plyšys praeina defektą (a = 25,8 mm), abiejų modelių rezultatai sutampa. Tokia įtempių intensyvumo

koeficiento pasiskirstymo analizė yra naudinga nagrinėjant nuovarginio plyšio plitimą bandinyje. Kaip matome 3.15 paveiksle, tikrajame bandinyje plitimo pradžioje plyšio frontas yra iškreiptas defekto link. Lyginant tuštumų eksperimentinio ir skaitinio tyrimo rezultatus ties defektu, kai a = 18,8; 19,8 mm ir a = 22,8 mm, pastebimas rezultatų sutapimas. Tačiau kai plyšys praėjo defektą, jis ėmė lėčiau plisti defekto srityje. Skaitiniuose tyrimuose, kai a = 25,8 mm, tokios tendencijos nepastebimos. Šis skirtumas atsiranda dėl to, kad bandinyje defekto aplinkoje įvyko irimo mechanizmo kitimas ir yra didelė mikrostruktūros įtaka. Šie du veiksniai yra sunkiau modeliuojami BE metodu.

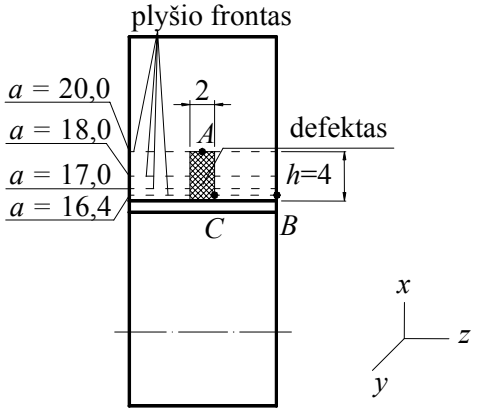


4.14 pav. *Įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymas bandinyje:a)su defektu, skaičiuojant per poslinkius; b) su defektu, skaičiuojant per J-integralą; c) be defekto, skaičiuojant per poslinkius*

4.2.2.6. Plyšio defekto, esančio bandinio centre, tyrimas

Irimas konstrukciniame elemente su defektu gali vykti ne tik plyšio fronto viršūnėje, bet ir defekto, esančio arti plyšio fronto, aplinkoje. Čia gali atsirasti antrinių plyšių, kurie pastebimai mažina liejinio ciklinį stiprumą. Bandinių su defektais lūžių fraktografinė analizė rodo, kad tuštumų aplinkoje irimas dažnai vyksta atsirandant antriniams plyšiams bei pastebimai iškraipant magistralinio plyšio frontą. Todėl norint ištirti antrinių plyšių atsiradimo prielaidas tuštumų sankaupos aplinkoje, atlikti papildomi skaitiniai ir analitiniai ryrimai.

Siekiant palyginti įtempių intensyvumo koeficiento reikšmes, atsirandančias plyšio viršūnėje, su reikšmėmis defekto aplinkoje, sukurta skaičiavimo schema pateikta 4.15 paveiksle. Modelio su stačiakampės formos plyšio defektu matmenys atitinka stipriojo perlitinio ketaus bandinių matmenis. Modelio centre esančio defekto dydis – 2×4 mm. Nagrinėjami atvejai, kai plyšio gylis a = 16,4; 17,0; 18,0; 20,0 mm. Apkrovimo jėgos dydis parinktas pagal eksperimento duomenis.

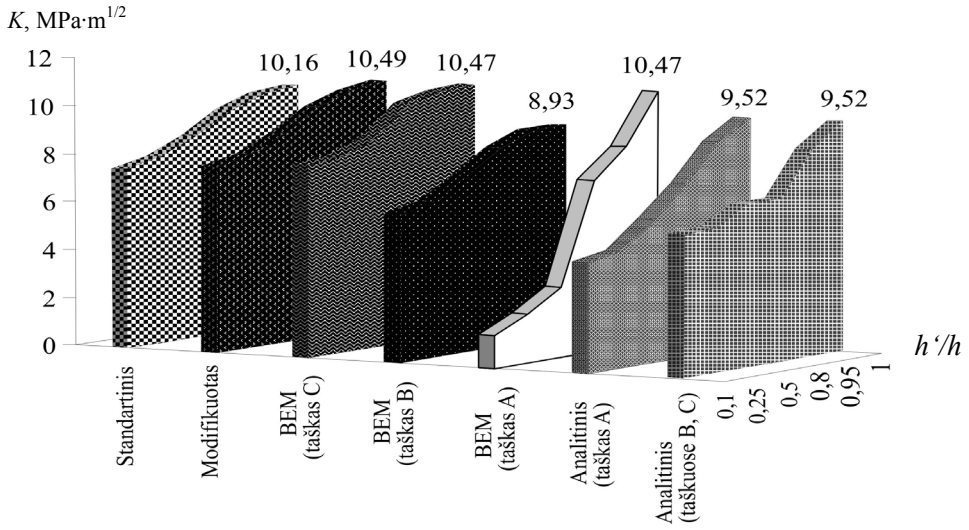


4.15 pav. *Modelio su centriniu defektu schema*

Nagrinėjama, kaip kinta įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės plintant plyšiui defekto aplinkoje pasirinktuose būdinguose *A*, *B* ir *C* taškuose. Santykinis plyšio gylis *h'* yra atstumas nuo įpjovos viršūnės iki nagrinėjamo plyšio viršūnės, jis kinta nuo 0,4 (h'/h = 0,1, a =16,4 mm) iki 4 mm (h'/h = 1, a = 20,0 mm). Skaitiniai tyrimo rezultatai gauti naudojant įtempių koeficiento nustatymą *J*-integralu. Skaičiavimų įvairiais metodais rezultatai palyginti 4.16 paveiksle.

Įtempių intensyvumo koeficiento reikšmių kitimo grafikai rodo netiesinį augimą. Standartinis metodas atspindi K_I skaičiavimą pagal (2.1) formulę ir nurodo vienodą per plyšio ilgį reikšmę (K_I = 10,16 MPa·m$^{1/2}$). Modifikuotas metodas rodo padidėjusią dėl neigiamos defekto įtakos skerspjūvio geometriniams rodikliams įtempių intensyvumo koeficiento reikšmę (K_I = 10,49 MPa·m$^{1/2}$). Kadangi nagrinėjamame modelyje defektas užima gana mažą plotą, skirtumas tarp standartinio ir modifikuoto metodų reikšmių yra nedidelis. Įtempių intensyvumo koeficiento reikšmių palyginimas atspindi skirtumą, atsirandantį skirtinguose plyšio taškuose dėl įtempių ir deformacijų būvio kitimo bei defekto įtakos. BEM nustatytas reikšmių kitimas *A* taške rodo, kad plintant nuovarginiam plyšiui čia galimi antriniai plyšiai, tačiau magistralinis plyšys plinta per *B* ir *C* taškus.

Rezultatai, gauti naudojant nominalius įtempius ir įvertinant skerspjūvio geometrinių rodiklių pokytį (4.5), yra panašūs į rezultatus, gautus BEM, tačiau neįvertina įtempių būvio pokyčio per bandinio storį. Todėl reikšmės, gautos *B* ir *C* taškuose, yra lygios.

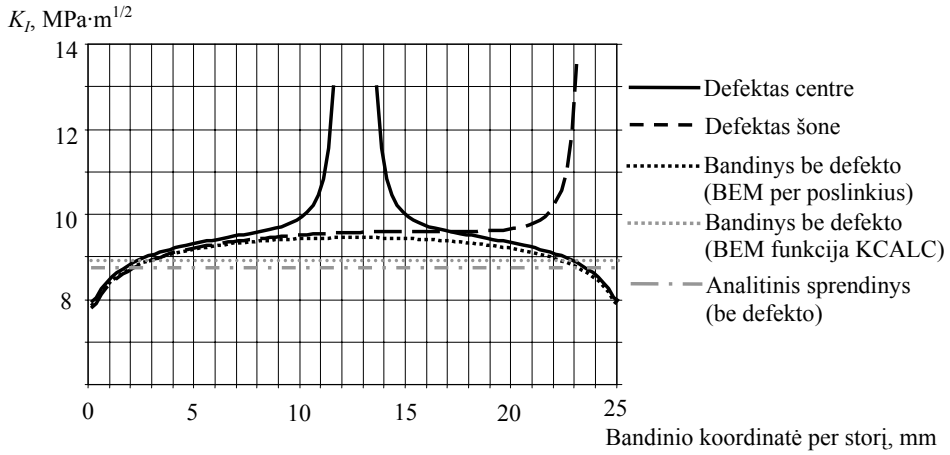


4.16 pav. *Įtempių intensyvumo koeficiento priklausomybės nuo santykinio plyšio gylio h'/h, skaičiuotos įvairiais metodais*

4.2.2.7. Defekto padėties įtaka

Lyginant austemperizuoto ketaus bandinių su tuštumų sankaupa lūžius, pastebėta, kad tuštumos, esančios centre, mažiau iškraipo plyšio plitimo frontą. Šio reiškinio tyrimui atliktas papildomas skaitinis tyrimas, kuriuo siekiama ištirti defekto padėties įtaką įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymui. Modeliuojamo bandinio matmenys atitinka austemperizuoto ketaus eksperimentinių bandinių matmenis; defekto dydis 2×4 mm. Nagrinėjami atvejai, kai defektas yra centre ir šone. BE modelis sudalintas į 25 baigtinių elementų sluoksnius. Plyšio gylis modelyje a = 19,8 mm.

Analitinis įtempių intensyvumo koeficiento skaičiavimo metodas neįvertina įtempių būvio kitimo per bandinio storį ir defekto įtakos, todėl jo rezultatai patekti 4.13 paveiksle tik palyginimui. Standartinė ANSYS funkcija KCALC taip pat neduoda tikslaus įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymo per modelio storį vaizdo. Nežiūrint į tai, kad dėl įtempių būvio įtempių intensyvumo koeficientas yra kiek didesnis modelio viduje, skaičiavimai BEM per poslinkius rodo, kad įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės didėja iki 40 %, kai defektas yra centre, ir iki 50 %, kai defektas yra šone, lyginant su modeliu be defekto. Galima padaryti išvadą, kad plyšys auga greičiau, kai defektas yra paviršiuje. Tokiu būdu, kartu gaunamas ir labiau kreivas plyšio plitimo frontas. Taigi, lyginant su bandiniu su defektu tūryje, bandinio šone esantis defektas yra pavojingesnis.



4.17 pav. *Įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymas bandinyje su defektu centre arba šone ir bandinyje be defekto*

4.2.2.8. Modelio patikrinimas bei skaitinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas

Siekiant patikrinti skaitinio tyrimo tikslumą, gauti skaičiavimo rezultatai yra lyginami su analitiniais ir eksperimentiniais duomenimis. Toks palyginimas atliktas tik bandinių modeliams be defektų, naudojant žinomus plyšio atsivėrimo ir įtempių intensyvumo koeficiento plyšio viršūnėje analitinius sprendinius. Su BEM nustatyti bandinio kraštų poslinkiai (t. y. plyšio atsivėrimas) lyginami su analitiniu sprendiniu ir eksperimentinių bandymų rezultatais. Plyšio atsivėrimas bandinio krašte (matavimo schema pateikta 2.1 paveiksle) skaičiuojamas naudojant modifikuota ribinį kolokacijų metodą pagal formulę (tikslumas ±0,5 %, kai $0{,}2 \le \alpha \le 0{,}975$) (Murakami, 2001):

$$\left.\begin{aligned} &\delta_0 = \frac{F}{E't} V_0(\alpha), \quad \alpha = \frac{a}{W}, \\ &V_0(\alpha) = \left(1 + \frac{0{,}25}{\alpha}\right)\left(\frac{1+\alpha}{1-\alpha}\right)^2 \times \\ &\times \left(1{,}637 + 12{,}678\alpha - 14{,}231\alpha^2 - 16{,}610\alpha^3 + 35{,}050\alpha^4 - 14{,}494\alpha^5\right). \end{aligned}\right\} \quad (4.20)$$

čia: t – bandinio storis.

Atlikti skaičiavimai bandiniui be defektų ir jų palyginimas pateikiami 4.2 lentelėje. Eksperimentų duomenys nėra labai tikslūs, nes užregistruoti esant kiek skirtingiems plyšio gyliams.

4.2 lentelė. *Plyšio atsivėrimas ties bandinio be defekto kraštais, mm*

Plyšio gylis *a*, mm	18,8	19,8	22,8	25,8
Eksperimentų rezultatas*	1,8	1,9	3,0	4,0
Analitinis sprendinys	2,263	2,445	3,111	4,034
Skaitinis sprendinys(BEM)	2,260	2,440	3,100	4,020
Skirtumas, %	0,154	0,209	0,350	0,340

*apytikslės reikšmės, įtrauktos palyginimui

Lyginant BEM gautus skaičiavimo rezultatus ir analitinius sprendinius, įtempių intensyvumo koeficiento skaičiavimams pritaikyta formulė (2.1). Palyginimui pateikiamas BEM gautų įtempių intensyvumo koeficiento reikšmių aritmetinis vidurkis, siekiant įvertinti koeficiento kitimą per bandinio storį.

4.3 lentelė. *Įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės plyšio viršūnėje, MPa·m$^{1/2}$*

Plyšio gylis *a*, mm	18,8	19,8	22,8	25,8
Analitinis sprendinys (formulė 2.1)	3,62	3,81	4,49	5,37
Skaitinis sprendinys (BEM, per poslinkius)	3,66	3,84	4,49	5,36
Skirtumas su analitiniu sprendiniu, %	1,10	0,78	0	0,19
Skaitinis sprendinys (BEM, per *J*-integralą)	3,69	3,86	4,52	5,39
Skirtumas su analitiniu sprendiniu, %	1,89	1,31	0,66	0,56

Rezultatų analizė leidžia teigti, kad bandinio modelis įgalina pasiekti pakankamai tikslių rezultatų (skirtumas sudaro ne daugiau kaip 0,35 % poslinkiams ir 1,10 % įtempių intensyvumo koeficientui). Todėl galima lyginti skaitinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatus. Eksperimentų rezultatų analitinis tyrimas atspindi įtempių intensyvumo koeficiento intervalo reikšmes, gautas realiam bandiniui ir bandiniui su sudėtingos formos tuštumų sankaupa. Skaitinio tyrimo rezultatai išryškina idealizuoto bandinio su plyšio defektu ir bandinio be defekto skirtumą.

Papildomai lyginamos įtempių intensyvumo koeficiento K_{max} reikšmės, gautos modeliuojant austemperizuoto ketaus bandinį su dirbtiniu defektu ir reikšmės, gautos eksperimentinio bandymo metu. Tam vietoj pastovių įvairiems plyšio gyliams jėgos reikšmių, naudotų baigtinių elementų modeliuose, aprašytuose 4.2.4 skirsnyje, naudojamos F_{max} reikšmės, užregistruotos eksperimento metu, pateiktos 4.4 lentelėje.

4.4 lentelė. *Įtempių intensyvumo koeficiento K_{max} eksperimentinių ir skaitinių reikšmių palyginimas*

Plyšio gylis *a*, mm	18,8	19,8	22,8	25,8
Jėga F_{max}, N	7604	7098	4875	5677
Eksperimentų rezultatas, MPa·m$^{1/2}$	9,51	9,42	7,59	10,4
Skaitinio tyrimo rezultatas (BEM, per poslinkius), MPa·m$^{1/2}$	9,12	10,2	7,82	9,67
Skirtumas, %	4,10	7,64	2,94	7,02

Skaitinio tyrimo rezultatais laikysime K_I reikšmes, gautas modelio šone. Lyginant skaitiniu metodu gautus rezultatus su eksperimento rezultatais, pastebimas įtempių intensyvumo koeficiento K_{max} skirtumas nuo 2,94 iki 7,64 %. Galima teigti, kad realios tuštumos modeliavimas plyšio defektu duoda tam tikrą panašumą ir yra pagrįstas. Siekiant tiksliau modeliuoti tuštumą ir gauti tikslesnį bandinio geometrinį modelį, reikėtų naudoti sudėtingesnę tuštumos formos nustatymo įrangą (pvz., rentgeno spindulių principu) ir taikyti adaptyvius baigtinių elementų tinklus, kurie išplėstų galimybes modeliuoti plintantį nuovarginį plyšį bei patobulinti singuliaraus BE tinklo kūrimo technologiją.

4.3. Konstrukcijų elementų stiprumo skaičiavimo metodikos patikslinimas

Įvairūs defektai, tarp jų ir plyšiai, apsunkina konstrukcijos elemento stiprumo skaičiavimą. Nuovarginių plyšių atsiradimas ir plitimas, tarp jų ir nevienalytėse medžiagose, yra aktualus skaičiuojamosios irimo mechanikos uždavinys. Tuštumų ir plyšių įvertinimas inžineriniuose skaičiavimuose yra sudėtingas, todėl verčia naudoti didesnius atsargos koeficientus ir tuo pačiu didinti konstrukcinio elemento masę. Taikant irimo mechanikos dėsningumus konstrukcinių elementų ciklinio stiprumo skaičiavimui, siekiama nustatyti kritinę įtempių reikšmę, prie kurios plyšys neplistų, arba kritinį plyšio dydį, žinant konstrukcinį elementą veikiančius įtempius.

Stipriojo ketaus konstrukcinių elementų su liejimo tuštumomis eksploatacinio stiprumo skaičiavimams yra reikalingas saugių būvių srities apibrėžimas, pagrįstas irimo mechanikos kriterijais (Žiliukas, 2006; R6 Revision 4; Матвиенко, 2006; Пестриков, Морозов, 2002).

Svarbių kalnakasybos, atominės energetikos, cheminių įrenginių konstrukcijų elementų skaičiavimas atliekamas taikant nuovarginio plyšio atsiradimo prevencijos prielaidą. Skirtingose metodikose (Žiliukas, 2006; Anderson, 1991; Махутов, 2005) taikomi skirtingi irimo kriterijai: įtempių

intensyvumo koeficiento, ribinio *J*-integralo, ribinio plyšio atsivėrimo ir kt. Leistinieji (arba skaičiuojamieji) įtempiai yra siejami su saugiu plyšio dydžiu naudojant lygtį:

$$\left[\{K_I, J, \delta\}\right] = \left\{\frac{\sigma_{th}}{n_\sigma}, l_{adm}, n, \ldots\right\} \le \frac{\{K_{th}, J_{cth}, \delta_{cth}\}}{n_{\{K_I, J, \delta\}}}, \tag{4.22}$$

čia $[\{K_I, J, \delta\}]$ ir $\{K_{th}, J_{\text{th}}, \delta_{cth}\}$ – leistinieji ir ribiniai irimo mechanikos parametrai. Saugos koeficientas $n_{\{K_I, J, \delta\}}$ parodo, kiek kartų reikia sumažinti irimo mechanikos parametrą $\{K_I, J, \delta\}$ dėl plyšio ilgio augimo, esant skaičiuojamiesiems (leistiniems) įtempiams, kad jie pasiektų kritines reikšmes $\{K_{th}, J_{cth}, \delta_{cth}\}$. Esant $n_{\{K_I, J, \delta\}} = 1$, gaunamas kritinis plyšio ilgis l_{cr}, atitinkantis skaičiuojamuosius įtempius, o esant tam tikram $n_{\{K_I, J, \delta\}} > 1$ – saugus plyšio dydis $l_{adm} < l_{cr}$. Tikslios saugos koeficiento reikšmės gali būti skaičiuojamos taikant įvairius kritinius parametrus. Saugus būvis užtikrinamas naudojant ribinį saugos koeficientą $n_{\{K_I, J, \delta\}}$, kuris mažina irimo mechanikos kriterinį rodiklį (atsparumą pleišėjimui). Tuo pačiu mažinamas kritinio plyšio dydis l_{cr} iki leistino dydžio l_{adm} esant kintamiems skaičiuojamiesiems įtempiams $\Delta\sigma$:

$$\Delta\sigma \le \Delta\sigma_{th\,adm} = \frac{\Delta\sigma_{th}}{n_\sigma}, \tag{4.21}$$

čia $\Delta\sigma_{th\ adm}$ – leistinieji cikliniai įtempiai; $\Delta\sigma_{th}$ – ciklinio stiprumo riba; n – atsargos koeficientas pagal ciklinio stiprumo ribą.

Tokia metodika taikoma svarbių konstrukcijų ciklinio stiprumo skaičiavimams. Laikoma, kad nuovarginiai plyšiai neatsiranda, kai tenkinama sąlyga:

$$\Delta K_I \le \left[K_I\right] = \frac{\Delta K_{th}}{n_K}. \tag{4.23}$$

Analogiškai, konstrukcijos elementui su defektais:

$$\Delta K_I\left([\sigma], [l], R, t\right) \le \left[\Delta K_d\right] = \frac{\Delta K_{th\,d}}{n_K}. \tag{4.24}$$

Mineralų malūnų našumas priklauso nuo aptinkamų defektų (tuštumų, plyšių) dydžio ir kiekio. Eksploatacijos metu gali būti padidintas techninės diagnostikos apžiūrų kiekis, kad išryškėtų defektų didėjimas. Gali būti sumažintas rūdos malūno našumas, t. y. pakraunama mažesnis rūdos kiekis. Kartu sumažinamas svarbių detalių su defektais apkrovimas.

Pleišėjimo slenkstis priklauso nuo įtempių dydžio, plyšio dydžio, ciklo asimetrijos, temperatūros ir kitų veiksnių. Sudarant eksperimentinę įtempių intensyvumo koeficiento intervalo priklausomybę nuo plyšio plitimo greičio,

taikomas ciklo asimetrijos koeficientas *R,* kuris kinta nuo 0,05 iki 0,1. Tačiau esant kitoms *R* reikšmėms, kai irimo pobūdis ima artėti prie statinio, pastebima pleišėjimo slenksčio priklausomybė nuo ciklo asimetrijos koeficiento. Siekiant įvertinti šį reiškinį, literatūroje siūloma formulė:

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th\,0}\left(1 - R\right)^{\gamma}, \tag{4.25}$$

čia ΔK_{th0} – pleišėjimo slenkstis prie $R = 0$, γ – pataisos koeficientas ($0{,}5 \le \gamma \le 1$).

Mineralų malūnų būgno, atramų ir kitų elementų skaičiavimui taikome formulę (4.7) ir gauname ribinių įtempių intervalą:

$$\Delta\sigma'_{thd} = 0{,}5\sigma_{thd} W^{1/2}\left(1-\lambda\right)^{1/2}\varphi(\lambda)\left(1-R\right)^{\gamma}. \tag{4.26}$$

Elementų su liejimo tuštumomis skaičiavimui galima panaudoti vidutines arba minimalias ΔK_{thd} reikšmes, gautas eksperimentiniais analitiniais tyrimais. Atliekant kalnakasybos įrenginių ilgaamžiškumo skaičiavimus, orientuojamasi į ilgesnį kaip 25 metai tarnavimo laiką. Todėl, norint padidinti konstrukcijos ilgaamžiškumą, skaičiavimui naudojame $\Delta K_{th\ min}$, nustatomus eksperimentiškai esant plyšio plitimui greičiui *da/dN* artimam 10^{-12} m/ciklą.

Didelių matmenų krumpliaračiai (3–12 m skersmens) ir korpusinės detalės su liejimo tuštumomis gali būti redukuoti ir nagrinėjama tik šio konstrukcinio elemento sritis su defektu. Tuštumos krumplio paviršiuje visais atvejais neleistinos. Nustačius šią dalį veikiančias įražas, ji yra atskiriama ir modeliuojama kaip apkrauta plokštė arba kaip sudėtingesnis kūnas su tuštuma. Nagrinėjami du atvejai:

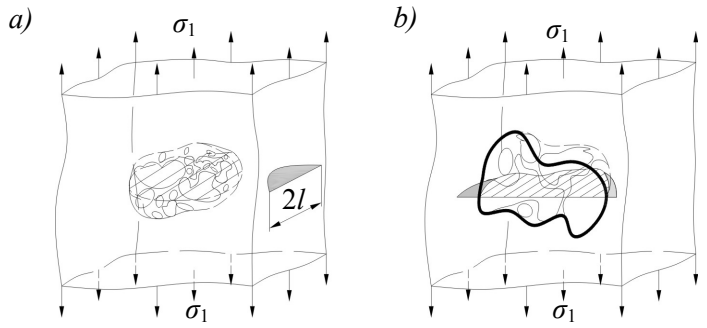
- projektinis tikrinamasis, kai siekiama patikrinti, ar pagamintas liejinys sugebėtų išlaikyti konstruktyviai numatytas ciklines apkrovas;
- eksploatacinis tikrinamasis, kai įrenginio naudojimo metu aptiktas augantis nuovarginis plyšys tūryje su tuštuma ir būtina įvertinti jo keliamą pavojų.

Eksploatacijos metu įrenginiai yra periodiškai apžiūrimi neardančios kontrolės metodais, siekiant aptikti galimus augančius plyšius ir nusakyti jų plitimą. Įtempių nustatymui naudojami deformacijų davikliai, klijuojami arti plyšiais pažeistos konstrukcinio elemento dalies. Šių tikrinimų rezultatai naudojami tolimesniam detalės ciklinio patvarumo ir eksploatacinio resurso nustatymui.

4.3.1. Elemento su tuštuma ciklinio stiprumo analitinis skaičiavimas

Leidžiant nagrinėjamo kūno geometrinei formai, taikomas analitinis įtempių intensyvumo koeficiento (K_{max} arba ΔK) skaičiavimo metodas (Murakami, 2001). Tolimesnių skaičiavimų schemos pateiktos 4.18 paveiksle, kur nagrinėjami

atvejai, kai liejimo tuštuma yra konstrukcijos elemento viduje arba paviršiuje. Tuštumos aplinkoje išskiriame svarbiausius įtempius σ_1 ir liejimo tuštumos plotą, statmeną šiems įtempiams.



4.18 pav. *Tuštumų sankaupa detalės viduje (a) ir paviršiuje (b)*

Laikome, kad maksimalus įtempių intensyvumo koeficientas tuštumos aplinkoje yra lygūs (Murakami, 2001):

$$K_{I\max} = c\,\sigma_1\sqrt{\pi\sqrt{A_d}}\ , \tag{4.27}$$

čia c – tuštumos padėties konstrukciniame elemente geometrinis koeficientas (c = 0,5, kai tuštuma yra tūryje ir c = 0,65, kai tuštuma atsiranda paviršiuje); σ_1 – tempimo įtempiai, kylantys defekto aplinkoje; A – tuštumos projekcijos plotas.

Pritaikome formulei (4.27) plyšio neplitimo sąlygą, siekdami, kad tuštuma netaptų plyšio židiniu:

$$\Delta K_{I\max} \le \Delta K_{th\,d}\ , \tag{4.28}$$

čia ΔK_{thd} – konstrukcinio elemento su liejimo tuštuma pleišėjimo slenkstis, nustatomas pagal formulę (4.5). Tokiu būdu,

$$c\,\sigma_0\sqrt{\pi\sqrt{A_d}} \le 0{,}5\,\sigma_{th\,d}\,W^{1/2}(1-\lambda)^{1/2}\varphi(\lambda)(1-R)^{\gamma}\ . \tag{4.29}$$

Galutinai tuštumos plotas konstrukciniame elemente neturi viršyti:

$$A_d \le \frac{1}{16\pi^2 c^4}\left(\frac{\Delta\sigma_{th\,d}}{\Delta\sigma_0}\right)^4 [W(1-\lambda)]^2\,[\varphi(\lambda)]^4(1-R)^{4\gamma}\ . \tag{4.30}$$

Kai eksploatacijos metu detalės paviršiuje aptiktas plyšys, kurio ilgis yra 2l, jam galima taikyti tokią plyšio neplitimo sąlygą:

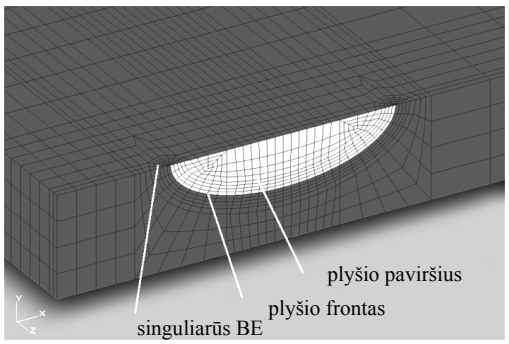
$$\Delta\sigma \le \Delta\sigma_{thd} = \frac{0{,}5\Delta\sigma W^{1/2}(1-\lambda)^{1/2}\varphi(\lambda)(1-R)^{\gamma}}{Y\sqrt{2l}}. \qquad (4.31)$$

Gautos formulės pritaikytos didelio gabarito konstrukcijų elementų ciklinio stiprumo skaičiavimams. Būtina atsižvelgti į defektų panašumo principą, todėl tolesniam pasiūlytų formulių taikymui reikia didesnės eksperimentinių rezultatų duomenų bazės. Šiam tikslui galima taikyti tuštumų atsiradimo bandymų metodiką , kai šalia pagrindinio liejinio gaminami papildomi bandiniai, skirti mechaninėms bei technologinėms savybėms įvertinti.

4.3.2. Elemento su tuštuma ciklinio stiprumo skaičiavimas naudojant BEM

BEM nustatomos *J*-integralo ir/arba įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės, kurios leidžia apibrėžti konstrukcinio elemento saugų būvį. Sudėtinga liejinių geometrinė forma čia nėra kliūtis ir, pridėjus kraštines sąlygas bei išsprendus kvazistatinį uždavinį, įtempių intensyvumo koeficiento nustatymui naudojamas poslinkių arba *J*-integralo metodai (Thorwald, G., Anderson, T., 2004–2006).

Atsižvelgiant į plyšio ir tuštumos geometrinę formą, liejinio su tuštuma BE modelis kuriamas naudojant singuliarius arba stačiakampius BE plyšio fronto viršūnėje. Singuliarių BE tinklas yra labiau tinkamas plokščios ar erdvinės kreivalinijinės formos plyšio modeliavimui, parodytam 4.19 paveiksle.



4.19 pav. *Plyšio modeliavimas*

Sprendžiant projektinį tikrinamąjį uždavinį, tikrinama, ar tuštumos dydis nėra pavojingas nuovarginio plyšio atsiradimui. Taikoma nuovarginio plyšio neplitimo sąlyga (4.23). Tiriamai konstrukcinio elemento daliai nustatomas ciklinio stiprumo atsargos koeficientas.

Nagrinėjant eksploatacinį tikrinamąjį atvejį, nustatomos tokios įrenginio

apkrovimo sąlygos, prie kurių eksploatacijos metu atsiradęs plyšys nebeplistų. Papildomai ieškomas toks ribinis plyšio dydis, kuris nesukeltų detalės trapaus irimo arba įrangos gedimo.

4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Skaitiniai ir analitiniai tyrimai rodo, kad tiriamuosiuose bandiniuose defektas pastebimai mažina skerspjūvio geometrinius rodiklius (skerspjūvio plotas mažėja iki 25 %, atsparumo momentas – iki 29 %). Nominalieji įtempiai plyšio viršūnėje padidėja iki 38 %, įtempių intensyvumo koeficientas – iki 36 %.
2. Bandymo rezultatų palyginimas rodo, kad tuštumos dydis nėra vienintelis rodiklis, veikiantis pleišėjimo slenkstį. Svarbūs yra mikrostruktūros nevienalytiškumas ir mechaninio būvio kitimas tuštumos aplinkoje.
3. Papildomas analitinis eksperimentinių rezultatų apdorojimas, taikant skerspjūvio geometrinių rodiklių patikslinimą, įvertina tuštumų įtaką bandinio įtempių intensyvumo koeficientui. Šis metodas tinka trapesnėms stipriojo ketaus rūšims.
4. Įtempių intensyvumo koeficiento skaičiavimas, taikant poslinkių ir *J*-integralo metodus, įvertina sudėtingą įtempių ir deformacijų būvį kūne su defektu. Skaitinis įtempių intensyvumo koeficiento pasiskirstymo CT bandinio skerspjūvyje su defektu tyrimas sutampa su eksperimentinio tyrimo rezultatu. Defektas, esantis bandinio centre, didina įtempių intensyvumo koeficientą iki 40 %, o esantis paviršiuje – iki 50 %.
5. Naudojant siūlomą kompleksinę skaičiavimo metodiką galima nustatyti ribinį tuštumos arba plyšio dydį konstrukciniame elemente, todėl ji tinka eksploatuojamų įrenginių su defektais ciklinio stiprumo įvertinimui.

Pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad daugiaciklio stiprumo skaičiavimo metodikos konstrukcijų elementams su liejimo tuštumų sankaupa trūksta. Vystomoms skaičiavimo metodikoms pagrįsti reikia patikslinti ir patobulinti eksperimentinio tyrimo reglamentuojamus metodus, atsižvelgiant į konstrukcinius, technologinius ir eksploatavimo veiksnius, įvertinti tuštumas ir plyšius naudojant irimo mechanikos kriterijus, analitinius ir skaitinius metodus.
2. Ribiniam įtempių intensyvumo koeficientui (pleišėjimo slenksčiui) nustatyti taikoma reglamentuojama metodika yra pakeista ir pritaikyta bandinių su liejimo tuštumomis tyrimui taip, kad gaunami rezultatai būtų pritaikyti lietų detalių su realiais defektais ilgaamžiškumo didinimui.
3. Gauti rezultatai rodo, kad tuštumų dydis nėra vienintelis rodiklis, turintis įtaką ribinio įtempių intensyvumo koeficiento intervalo mažėjimui. Pleišėjimo slenkstis taip pat priklauso ir nuo tuštumų padėties skerspjūvyje, mikrostruktūrinio netolygumo bei mechaninio būvio tuštumų aplinkoje.
4. Rezultatai rodo, kad pleišėjimo slenkstis medžiagoje mažėja, jeigu mažėja plyšio plitimo greitis: austemperizuotam ketui ΔK_{th} = 7,4...8,7 MPa·m$^{1/2}$ prie $v = 10^{-10}$ m/ciklą ir ΔK_{th} = 7,2...8,6 MPa·m$^{1/2}$ prie $v = 10^{-11}$ m/ciklą ir

mažiau; atitinkamai, perlitiniam ketui ΔK_{th} = 8,0...8,2 MPa·m$^{1/2}$ ir ΔK_{th} = 7,8...7,9 MPa·m$^{1/2}$.

5. Plyšio plitimo greičio ir įtempių intensyvumo koeficiento intervalo priklausomybės bei fraktografinė analizė rodo, kad plyšio fronto formai ir plyšio dydžiui įtakos turi tuštumos forma, dydis ir nevienalytė struktūra.
6. Gauti rezultatai rodo, kad pleišėjimo slenkstis medžiagoje su tuštumomis kinta: austemperizuotam ketui ΔK_{thd} = 5,3...7,2 MPa·m$^{1/2}$ prie $v \approx 5 \cdot 10^{-12}$ m/ciklą ir ΔK_{thd} = 5,5...7,7 MPa·m$^{1/2}$ prie $v = 10^{-10}$ m/ciklą; stipriajam perlitiniam ketui ΔK_{thd} = 6,3…7,9 MPa·m$^{1/2}$ prie $v = 10^{-10}$ m/ciklą. Šios reikšmės iki 28 % mažesnės lyginant su reikšmėmis medžiagoje be defektų.
7. Skaitinio tyrimo rezultatai rodo, kad įtempių intensyvumo koeficientas defekto aplinkoje didėja 1,5 karto lyginant su modeliu be defekto. Paviršiuje esantis defektas yra pavojingesnis už esantį detalės viduje.
8. Siūloma kompleksinė liejinių su tuštumų sankaupa ciklinio patvarumo skaičiavimo metodika, pagrįsta tikslesniais analitiniais ir skaitiniais įtempių intensyvumo koeficiento nustatymo metodais ir eksperimentinio tyrimo rezultatais. Gautos ribinės įtempių intensyvumo koeficiento ΔK_{thd} reikšmės gali būti naudojamos kalnakasybos įrenginių elementų iš stipriojo ketaus projektiniam ir tikrinamajam ciklinio stiprumo skaičiavimui.

Literatūros sąrašas

1. Anderson, T. 1995. *Fracture mechanics: Fundamentals and Applications.* Boca-Raton – London – New-York – Washington: CRC Press. 688 p.

2. ASTM E 647-00. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. 2000 Edition.

3. ASTM E 1681-95. Standard Test Method for Determining a Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials Under Constant Load, 615–700.

4. Atkočiūnas, J. 2000. *Tamprumo teorijos pagrindai:* mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 264 p.

5. Barauskas, R.; Belevičius, R.; Kačianauskas, R. 2004. Baigtinių elementų metodo pagrindai. Vilnius: Technika. 612 p.

6. Bazaras, Ž.; Daunys, M.; Stulpinas, A. 1995. Statistical investigation of structural materials mechanical properties taking into account of threshold sensitivity, *Mechanika* 3: 11–15. ISSN 1392-1207.

7. Belytchko, T.; Lu, Y.; Gu, L. 1994. Element-free Galerkin methods, *Int. J. of Numerical Methods in Engineering* 37: 237–256.

8. Billaudeau, T.; Nadot, Y. 2004. Support for an environmental effect on fatigue mechanisms in the long life regime, *Int. J. of Fatigue* 26: 839–847.

9. Boschen, R.; Bomas, H.; Mayr, P.; Vetters, H. 1991. Strength. and fatigue of austempered ductile iron (ADI) in *Proceedings of World Conf. Austempered Ductile Iron. American Foundrymen's Society*, Des Plaines, IL, USA. 468 p.

10. Broek, D. 1989. *The Practical Use of Fracture Mechanics*. Dorsdrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers. 426 p.

11. Budinski, K. G.; Budinski, M. K. 2005. *Engineering materials. Properties and selection*. Pearson: Prentice Hall, Eighth edition. 885 p.

12. Callister, W. D. 2000. *Fundamentals of Material Science and Engineering.* New York: Willey. 820 p.

13. Callister, W. D. 1997. *Materials Science and Engineering.* New York-Singapore: John Willey & Sons Inc. 852 p.

14. Chan, S. K.; Tuba, I. S.; Wilson, W. K. 1970. On the finite element method in linear fracture mechanics, *Engineering fracture mechanics* 2: 1–17.

15. Chantier, V.; Bobet, R.; Billardon, F.; Hild, F. 2005. A probabilistic approach to predict the very high-cycle fatigue behaviour of spheroidal graphite cast iron structures, *Fatigue Fracture Engeneering of Structures* 23: 173–180.

16. Čižas, A. Medžiagų atsparumas. 1993. *Medžiagų atsparumas (Konstrukcijų elementų mechanika)*. Vadovėlis. Vilnius: Technika. 424 p.

17. Daunys, M. 2005. *Ciklinis konstrukcijų stiprumas ir ilgaamziškumas. Monografija.* Kaunas: Technologija. 288 p.

18. Daunys, M. 1996. Damage accumulation on crack initiation stage at low cycle loading, *Mechanika* 7: 5–10.

19. Daunys, M.; Putnaitė, D. 2004. Stress strain analysis for railway carriages automatic coupler SA-3, *Mechanika* 2: 14–20.

20. Dorazil, E. 1991. *High strength austempered ductile cast iron.* Prague: Ellis Harwood. 244 p.

21. Duflot, M.; Nguyen-Dang, H. 2004. A meshless method with enriched weight functions for fatigue crack growth, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering* 59: 1945–1961.

22. Rio Tinto Fer & Titane inc. 2002. FONTE GS : Les principes essentiels de la conception du système de coulée et masselottage. Révisé en 2002.

23. Greno G. L.; Otelui J. L.; Boeri, R. E. 1999. Mechanisms of fatigue growth in Austempered Ductile Iron, *Int. J. of Fatigue* 21: 35–43.

24. Goodrich, G. M. 1997. *Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes*. AFS Transations. 679 p.

25. Hammouda, M.; Sallam, H. E. M.; Osam, H. G. 2004. Significance of crack tip plasticity to early notch fatigue crack growth, *Int. J. of Fatigue* 26: 173–182.

26. Harding, R. A. 2007. The production, properties and automotive applications of austempered ductile iron, *Kovove Materialy* 45: 1–16.

27. Hertzberg, R.W. 1996. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials. 4th Edition.* New York – Singapore: John Willey & Sons Inc. 786 p.

28. Hilton, P.D. 1977. A specialized finite element approach for three-dimensional crack problems, *Mechanics of fracture* V.3. Plates and shells with cracks / Ed. G. C. Sih. – Leyden: Noorhoff Int. Publishing, 273–298.

29. Hilton, P. D.; Sih, G. C. 1984. Applications of the finite element method to the calculation of stress intensity factors, *Computational fracture mecanics – non-linear and 3-D problems.* N.Y.: ASME 4: 65–76.

30. Jones, S. M.; Svalbonas V. 2003. Large size mills and crashers. *Mining industry* 6:8–13

31. Kala, Z. 2008. Fuzzy probability anglysis of the fatigue resistance of steel structural members under bending, *Journal of Civil Engineering and Management* 14: 67–72.

32. Krenevičius, A.; Leonavičius, M. K. 2007. *Eksperimentinė medžiagų mechanika.* Mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 139 p.

33. Leitao, V.; Aliabadi, M. 2000. Boundary element methods for the analysis of crack growth in non-linear fracture, *Int. J. Of Materials and Product Technology* 16: 104–116.

34. Leonavičius, M. K. 2000. *Mechaninis medžiagų irimas.* Mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 80 p.

35. Leonavičius, M.; Fliotovienė, R.; Stupak, E. 1999. The stress-strain analysis in plates with operational and industrial defects, *Journal of Civil Engineering* 3: 443–452.

36. Leonavičius, M.; Krenevičius, A.; Šukšta, M.; Posa, J. 2003. The investigation and peculiarities of calculation of transport machine elements made of austempered ductile iron, *Transport* 4: 162–167.

37. Leonavičius, M.; Petraitis, G.; Krenevičius, A.; Suksta, M.; Stupak, S. 2005. Investigation of High-Cycle Fatigue of Cast Iron with Porous Layer near Threshold ΔK_{th}, *Kovove Materials* 43: 348–357.

38. Leonavičius, M. K.; Petraitis, G.; Šukšta, M.; Svalbonas, V. 2006. Strength of mills and crushers equipment materials subjected to gigacycle loading, *Journal of Civil Engineering and Management* 2: 135–141.

39. Leonavičius, M.; Šukšta, M.; Stupak, S.; Petraitis, G. 2003. Experimental investigation of Cyclic Bending Strength of Cast Iron with "dross" Layer, *Mechanika* 5: 13–18.

40. Lin, S. C.; Lui, T. S. ; Chen, L. H. ; Song, J. M. 2002. Effects of pearlite on the vibration-fracture behaviour of spheroidal graphite cast irons under resonant conditions, *Metallurgical and materials transactions* 8: 2623–2634.

41. Marrow T. J.; Centinel, H.; Al Zalmah, M. 2002. Fatigue Crack Nuclei in Austempered Ductile Cast Iron, *Fatigue & Fracture of Engineering & Structures* 7: 635–649.

42. Marrow, T. J.; Centinel, H.; Macdonald, S. H.; Venslovas, A.; Leonavicius, M. 2002. X-ray Tomography of Short Fatigue Cracks in Ductile Iron, in *Proceedings of the 14th Bienel Conference on Fracture,* ECF 14 Fracture Mechanics Beyond 2000, Krakow, 443–450.

43. Matvienko, Yu. G. 2006. *Fracture mechanics models and criterion*. Moscow: PhysMatLit. 328 p.

44. McDowell, L. 1996. Basic issues in the mechanics of high cycle metal fatigue, *International Journal Fracture* 80: 103–145.

45. Monchoux, J. P. 2000. *Influence d'un recuit de ferritisation sur la microstructure et les mechanismes de fissuration en sollicitation monotone et cyclique de la fonte a graphite spheroidal perlite-ferritique.* These Genie des materiaux. Institut National des Sciences Appliquees de Lyon. 202 p..

46. Murakami, Y. 2001. *Stress intensity factors handbook (in 2 volumes)*. Elmsford NY (USA), Elsevier. 3100 p.

47. Murakami, Y. 2002. *Metal fatigue: Effects of small defects and non-metallic inclusions.* Oxford, Elsevier Science. 369 p.

48. Nadot, Y. 1997. *Influence des defauts de fonderie sur la resistance a la fatigue d'une fonte GS. These en Science des materiaux*. Ecole Nationale Suprieure de Mechanique et d'Aerotecnique, Poitier. 207 p.

49. Nadot, Y.; Mendez, J.; Ranganathan, N. 2004. Influence of casting defects on the fatigue limit of nodular cast iron, *Int. J. of Fatigue* 26: 311–319.

50. Naro, R. L. Porosity defects in iron castings from mold-metal interface reactions, *AFS transactions* 59: 839–850.

51. Noda, N. A. 2004. Stress intensity formulas for three-dimensional cracks in homogeneous and bonded dissimilar materials, *Engineering Fracture Mechanics* 71: 1–15.

52. Petraitis, G.; Leonavicius, M. 2004. Threshold K_{th} Investigation of High-Cycle Fatigue of Cast Iron with Porous Layer, *Mechanika* 4: 25–28.

53. Ostash, O. P.; Panasyuk, V. V. 2003. A unified approach to fatigue microcrack initiation and propagation, *Int. J. of Fatigue* 25: 703–708.

54. Pundale, H.; Rogers, R. J.; Nadkarni, G. R. 2000. Finite element modelling of elastic modulus in ductile irons: effect of graphite morphology, *AFS transactions* 99–105.

55. Putnaitė, D. 2005. Geležinkelio riedmenų automatinių sankabų stiprumo ir ilgaamžiškumo tyrimas. Daktaro disertacija. Kauno technologinis universitetas.

56. Radzikowska, J. M. 2007. Metallography and microstructures of cast iron. In *Proceedings of II International Scientific Conference "New Materials in Machine Building and Exploitation"*, 565–587.

57. Rajnovic D.; Eric, O.; Sidjanin, L. 2006. Microstructure and Fracture of Cooper alloyed ADI material. In *Proceedings of ECF 16 - 16th European Conference of Fracture Failure Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures*. 124–129

58. R6 Revision 4. Assessment of the integrity of structures containing defects. 2001. British Energy Generation LTD.

59. Rice, J. R. 1968. A path-independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks, *J. Appl. Mech.* 35:1–12.

60. Ritchie, R. O. 1999. Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids, *International Journal of Fracture* 1: 55–83.

61. Schijve, J. 2003. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art, *Int. J. Fatigue* 25: 679–702.

62. Siclari, R.; Margarita, T.; Berthelet, E.; Fourmann, J. 2003. Micro-shrinkage in Ductile Iron. Mechanism & Solution. *Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron*, http://www.ductile.org/Magazine/2005_2 /microshrinkager.pdf

63. Siekanski, K.; Borkowski, S. 2003. Analysis of foundry defects and preventive activities for quality improvement of castings, *Metalurgija* 42: 57–59.

64. Singh, B. M.; Danyluk, H. T.; Sevadurai, A. P. S.; Dhaliwal, R. S.; Rokne, J.; Vrbik, J. 2001. Effects of inclusions in ductile cracks, *Z. Angew. Math, Pfys* 52: 680–695.

65. Spheroid Graphite Cast Irons. Technical data. Chamberlin & Hill. www.chamberlin.co.uk

66. Stefanescu, M. D. 2005. Solidification and modeling of cast iron – a short history of the defining moments, *Material Science and Engineering* A413-414: 322–333.

67. Stupak, E.; Kačianauskas, R. 2000. Application of the adaptive finite element meshes for stress analysis at the concentrator, *Mechanika* 4: 31–36.

68. Stupak, E. 2004. Dvimačių struktūrų irimo modeliavimas naudojant prisitaikančiuosius baigtinių elementų tinklus. Daktaro disertacija. VGTU.

69. Thomson, R. C.; James, J. S.; Putman, D. C. 2000. Modeling microstructural evolution and mechanical properties of austempered ductile iron, *Materials Science and Technology* 16: 1412–1418.

70. Thorwald, G.; Anderson, T. 2004. 3D crack analysis, *ANSYS Solutions* 5: 28–30.

71. Thorwald, G.; Anderson, T. 2006. Meshning Cracks at Any Location, *ANSYS Solutions* 7, Issue 2, Spring 2006: 17–20.

72. Troschenko, V. 2004. Various stages of fatigue crack development, *Mechanika* 5: 5–12.

73. Vadlūga, V., Kačianauskas, R. 2006. Numerical simulation of rupture and energy balance of 1D continuum by using discrete element method, *Mechanika* 3: 5–12.

74. Yaacoub Agha H.; Berangei, A.-S.; Billardon, R.; Hild, H. 1998. High-cycle behaviour of spheroidal graphite cast iron, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures* 21: 287–296.

75. Yescas-Gonzalez, M. A.; Bhadeshia, H. K. D. H. *Cast Irons.* University of Cambridge. www.msm.cam.ac.uk/phase-transe/2001/adi/cast.iron.html.

76. Zanardi, F. 2005. Fatigue properties and machinability of ADI, *La metallurgia Italiana* 10: 27–32.

77. Žarnovskij, V. 2006. *Įtempių būvio erdviškumo įtakos plokštelių su įpjova įtempių intensyvumo koeficientui skaitinis tyrimas*. Daktaro disertacija. VGTU.

78. Žarnovskij, V.; Kačanauskas, R. 2003. The finite element investigation of the thickness influence on 3D Stress and strain fields in the SENB specimens, *Mechanika* 42: 5–10.

79. Žiliukas, A. 2006. *Stirumo ir irimo kriterijai. Monografija.* Kaunas: Technologija. 207 p.

80. Žiliukas, A.; Meslinas, K.; Juzėnas, N. 2006. Fracture investigation of layered composite structural elements, *Mechanika* l: 12–16.

81. Žvinys, J. 1999. *Konstrukciniai lydiniai. T.1. Ketus*. Kaunas: Technologija, 1999. 203 p.

82. Балина, В. С.; Мядякшас, Г. Г. 1994. *Прочность, долговечность и трещиностойкость конструкций при длительном циклическом нагружении*. Санкт-Петербург: Политехника. 207 с.

83. Васютин, А. Н. 1990. Распространение физически коротких усталостных трещин и долговечность элементов конструкций, *Проблемы прочности* 9: 3–8.

84. Витвицкий, П. М.; Панасюк, В. В.; Ярема С. Я. 1973. Пластические деформации в окрестности трещин и критерии разрушения, *Проблемы прочности* 2: 3–19.

85. Гусев, А. С. 1987. Прогнозирование живучести элементов конструкций с трещинами, *Вестник машиностроения* 5: 6–9.

86. Доможиров, Л. И. 1986. О пороговом значении коэффициента интенсивности напряжений для тел с короткими трещинами, *Заводская лаборатория* 7: 59–63.

87. Ежов, А. А.; Герасимова, Л. П.; Каток, А. М. 2005. Изломы конструкционных сталей. Ч. 1–4, *Металловедение и термическая обработка материалов* 1–6.

88. Жилюкас, А. Ю. 1988. *Разрушение конструкционных элементов.* Вильнюс: Мокслас, 106 с.

89. Иванова, В. С. 1979. *Разрушение металлов.* Москва: Металлургия. 167 с.

90. Каплун, А. Б.; Морозов, Е. М.; Олферьева, М. А. 2004. *ANSYS в руках инженера. Практическое руководство.* Москва: УРСС. 272 с.

91. Коцаньда, С. 1990. *Усталостное растрескивание металлов.* Москва: Металлургия. 623 с.

92. Куликов, В. И.; Ковалевич, Е. В.; Беляков, А. И. и др. 1984. Трещиностойкость легированного чугуна с шаровидным графитом. *Энергомашиностроение* 9: 19–21.

93. Махутов, Н. А. 2004. Усталость металлов в широком диапазоне циклов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов* 4: 37–42.

94. Махутов, Н. А. 2005. *Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. Обоснование ресурса безопасности.* Новосибирск: Наука. 610 с.

95. Морозов, Е. М.; Никишков, Г. П. 1984. *Метод конечных элементов в механике разрушения.* Москва: Наука. 256 с.

96. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). 1989. Москва: Энергоатомиздат. 525 с.

97. Панасюк, В. В. 1990. *Механика квазихрупкого разрушения материалов.* Киев: Наукова думка. 545 с.

98. Пестриков, В. М.; Морозов, Е. М. 2002. *Механика разрушения твёрдых тел. Курс лекций.* Санкт-Петербург: Профессия. 304 с.

99. Трощенко, В.; Ляликов, С. М. 1996. Влияние поверхностных дефектов на многоцикловую усталость инженерных материалов. *Проблемы прочности* 1: 5–16.

100. Трощенко, В. Т. 1980. Прогнозирование долговечности металлов при многоцикловом нагружении, *Проблемы прочности* 10: 31–40.

101. Трощенко, В. Т. 2005. Рассеянное усталостное повреждение металла и сплавов. Сообщение 1. Неупругость: методы и результаты, *Проблемы прочности* 4: 5–32.

102. *Фрактография и атлас фрактограмм. Справочник.* 1982. Пер. с англ. Москва: Металлургия. 489 с.

103. Франценюк И. В.; Франценюк, Л. И. 2002. *Альбом микроструктур чугуна, стали и сплавов, цветных металлов и их сплавов.* Москва: Академкнига. 192 с.

104. Чигарев, А. В.; Кравчук, А. С.; Смалюк, А. Ф. 2004. *Ансис для инженеров: справ. пособие.* Москва: Машиностроение-1. 512 с.

105. Шифрин, Е. И. 2002. *Пространственные задачи линейной механики разрушения.* Москва: Издательство физико-математической литературы. 368 с.

106. Штремель, М. А. 2005. Возможности фрактографии, *Металловедение и термическая обработка материалов* 5: 35–43.

107. Щербединский, Г. В. 2005. Чугун как перспективный материал XXI столетия, *Металловедение и термическая обработка материалов* 7: 83–93.

108. Ярема, С. Я. 1977. Исследования роста усталостных трещин и кинетические диаграммы усталостного разрушения. *Физико-химическая механика материалов* 13, №4, 65–76.

Autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema

Straipsniai Mokslinės informacijos instituto leidiniuose

1A Leonavičius, M. K.; Bobyliov, K.; Krenevičius, A.; Stupak, S. 2008. Spheroid graphite cast iron specimens with defects cracking investigation. *"Mechanika"*, 1: 13–18. ISSN 1392-1207. (Thomson ISI Master Journal List).

2A Leonavičius, M.; Bobyliov, K.; Krenevičius, A.; Stupak, S.; Stupak, E. 2007. Evaluation of materials defect influence on fatigue crack threshold. *"Kovove Materialy"*, 45: 255–261. ISSN 0023– 432X (Thomson ISI Web of Science).

Straipsniai kituose leidiniuose

3A Leonavičius, M.; Bobyliov, K.; Krenevičius, A.; Šukšta, M.; Stupak, S. 2006. Strength of high-cycle fatigue of non-homogenous cast iron. In *Proceedings of Euromech-Mecamat 9th European Mechanics of Materials Conference*, Paris, Ecole des Mines de Paris. 335–340. ISBN 2-911762-73-8. (Thomson ISI Proceedings)

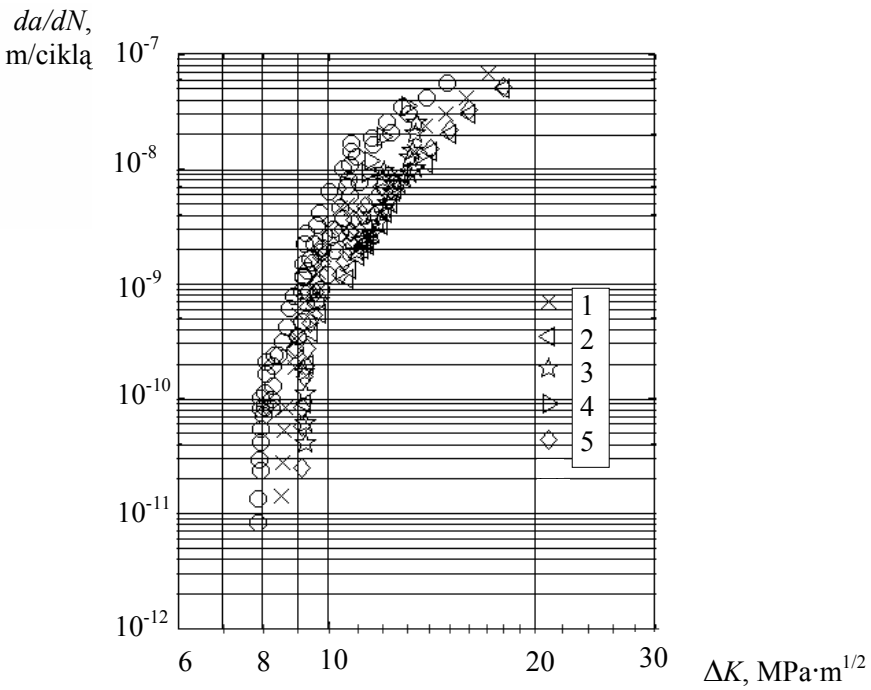
4A Stupak, S., Leonavičius, M., Bobyliov, K. 2006. Section properties of fracture of compact specimen with defects. In *Proceedings of 11th International Conference „Mechanika-2006"*: 335–339. ISSN 1822–2951.

5A Bobyliov, K., Stupak, E., Leonavičius, M., Stupak, S. 2008. Investigation of defects influence on CT specimens fatigue crack threshold. In *Proceedings of 13th International Conference „Mechanika-2008"*: 67–72. ISSN 1822–2951.

PRIEDAS

Stipriojo perlitinio ketaus bandinių be tuštumų bandymų rezultatai

Stipriojo perlitinio ketaus bandinių be tuštumų (1–5) priklausomybės tarp įtempių intensyvumo koeficiento intervalo ir plyšio plitimo greičio

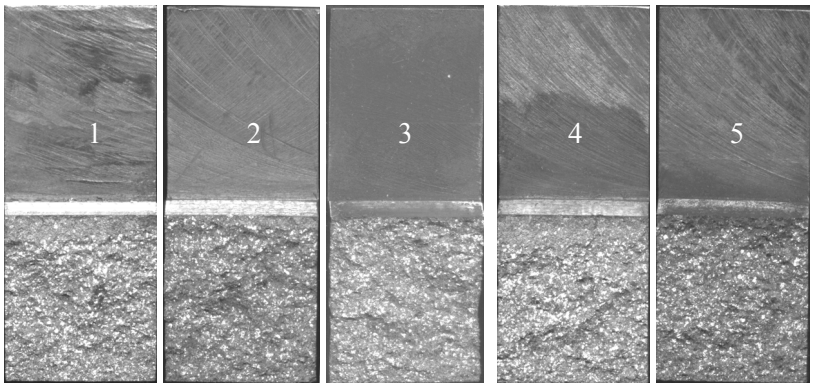


P1 pav. *Priklausomybė tarp plyšio plitimo greičio ir įtempių intensyvumo koeficiento intervalo stipriojo perlitinio ketaus bandiniams be defektų (1-5)*

Nustatytas pleišėjimo slenkstis yra 8,6...9,3 MPa·m$^{1/2}$ prie plyšio plitimo greičio da/dN = 10^{-10} m/ciklą ir 8,5 MPa·m$^{1/2}$ prie plyšio plitimo greičio $da/dN = 10^{-11}$ m/ciklą. Šiuose bandiniuose sunkiai pavyko išauginti pakankamai gilų plyšį, kaip numatyta reglamentuojamoje metodikoje, todėl jie laikomi iš dalies nekorektiškais.

Eksperimento metu gautos reikšmės yra 5–16 % didesnės nei nustatytos vėliau, atlikus bandymą su bandiniu 6.

Stipriojo perlitinio ketaus bandinių lūžių vaizdai



P2 pav. *Stipriojo perlitinio ketaus bandiniųbe tuštumų lūžiai*

Nuovarginio irimo sritis ne visuose stipriojo perlitinio ketaus bandiniuose yra pakankamai didelė ir netenkina reglamentuojamoje metodikoje keliamų reikalavimų. Bandymo metu dalis bandinių suiro plyšiui pasiekus 1–3 mm. Ši medžiaga pasižymi trapumu, todėl atsiradęs plyšys linkęs sukelti likusios dalies trapų suirimą. Atliekant nuovarginio stiprumo bandymus, pastebėta, kad stipriajame perlitiniame ketuje plyšys auga labai netolygiai. Bandymų eigoje, auginant išankstinį nuovarginį plyšį, nustatyta, kad plyšys vystosi šuoliškai. Dėl medžiagos nevienalytiškumo plyšys auga nesimetriškai bandinio šonų atžvilgiu.

Konstantin BOBYLIOV

LIEJIMO TUŠTUMŲ ĮTAKA STIPRIOJO KETAUS DAUGIACIKLIAM STIPRUMUI
Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T)

2008 09 29. 11,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“, Saulėtekio al., 11, 10223 Vilnius, *http://leidykla.vgtu.lt*
Spausdino UAB „Baltijos kopija“, Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius
http://www.kopija.lt