VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Gediminas Petraitis

DAUGIACIKLIO NUOVARGIO PLYŠIŲ SUSIDARYMO IR PLITIMO SLUOKSNIUOTAJAME KETUJE TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T)

Vilnius, 2006

Disertacija rengta 2002-2006 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas:

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

TURINYS

ĮVADAS 4
1. TYRIMŲ APŽVALGA IR PROBLEMOS FORMULAVIMAS 7
1.1. Stiprusis ketus kaip konstrukcinė medžiaga 7
1.2. Daugiaciklio apkrovimo tyrimai 11
1.3. Pagrindiniai irimo mechanikos kriterijai 13
1.4. Plyšio atsiradimo ir plitimo analizė 20
1.5. Ketaus ciklinio atsparumo analizė ir problemos 30
1.6. Skyriaus išvados 33
2. EKSPERIMENTINIO TYRIMO PRIEMONĖS IR METODAI 34
2.1. Bandymų metodika 34
2.2. Bandymų įranga 37
2.3. Skyriaus išvados 39
3. SLUOKSNIUOTUMO, GAUTO LIEJANT, ĮTAKOS PLYŠIO SUSIDARYMUI IR PLITIMUI TYRIMAS 40
3.1. Struktūra ir mechaninės savybės 40
3.2. Eksperimentinis ir analitinis tyrimas 43
3.3. Įtempimų analizė 53
3.4. Lūžių analizė 59
3.5. Konstrukcijų elementų stiprumo skaičiavimo metodikos patikslinimas 68
3.6. Skyriaus išvados 73
4. TERMINIO APDOROJIMO IR SLUOKSNIUOTUMO ĮTAKA PLYŠĖJIMO SLENKSČIUI 74
4.1. Struktūra ir mechaninių savybių rodikliai 74
4.2. Eksperimentinis plyšėjimo rodiklių nustatymas 76
4.3. Tyrimų analizė 81
4.4. Mechaninių savybių ir plyšėjimo rodiklių analizė bei stiprumo skaičiavimas 82
4.5. Skyriaus išvados 88
5. IŠVADOS IR APIBENDRINIMAI 89
LITERATŪRA 90
PRIEDAI 98
1 priedas. Įtrūkimai 1 bandinio paviršiuje 98
2 priedas. Įtrūkimai 2 bandinio paviršiuje 99
3 priedas. Normalizuotų bandinių lūžiai 100

ĮVADAS

Tyrimų sritis ir aktualumas

Šiuolaikinės mašinos, įrenginiai ir konstrukcijos kuriamos siekiant maksimaliai pagerinti jų charakteristikas, mažinant jų masę, gamybos, priežiūros ir energijos sąnaudas, tačiau išlaikant didelį darbo efektyvumą, našumą, patikimumą bei ilgaamžiškumą. Nemažą įtaką šioms charakteristikoms turi tinkamai parinkta medžiaga. Transporto ir kalnakasybos įrenginių gamyboje naudojamas stiprusis ketus su rutuliniu grafitu, kurio fizikinės mechaninės savybės gerinamos naudojant specialias liejimo ir termocheminio apdorojimo technologijas. Tačiau dėl konstrukcijų elementų didelių gabaritų sunku išlaikyti technologinių procesų kokybę ir detalėse gali susidaryti įvairaus tūrio nevienalytės terpės. Šias vietas galima identifikuoti kaip atskirus sluoksnius, o tokį ketų laikyti sluoksniuotuoju. Kai įrenginiai eksploatuojami 25–50 metų, neaiškūs plyšio susidarymo ir plitimo daugiaciklio ir hiperciklio nuovargio srityje (ciklų skaičius $N = 10^5 \ldots 10^9$) dėsniai. Dabartiniai skaičiavimo metodai, naudojami pirmajame pažeidimų kaupimosi etape, yra nepakankamai pagrįsti. Manoma, kad keičiasi irimo mechanizmas, laikas iki nuovargio plyšio atsiradimo lemia visos konstrukcijos darbo laiką, o įvairūs nevienalyčiai dariniai ir defektai skatina irimo procesą. Jau projektavimo stadijoje reikia žinoti konstrukcijos elemento stiprumą, jeigu atsiras plyšiai, t. y. vertinti tolesnį konstrukcijos darbą su plyšiu.

Šių problemų sprendimui sudarytas tarptautinis projektas „Kalnakasybos ir transporto įrenginių lietų ir virintinių komponentų ciklinio stiprumo ir atsparumo plyšėjimui tyrimas“, kuriame dalyvauja JAV, Australijos, Prancūzijos, Vokietijos, Suomijos firmos ir universitetai bei Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų atsparumo katedra.

Darbo tikslas

Pagrindinis darbo tikslas – įvairiais tyrimais nustatyti plyšių susidarymo ir plitimo dėsningumus stipriajame sluoksniuotajame ketuje daugiaciklio apkrovimo atveju ir patobulinti konstrukcijų elementų skaičiavimo metodiką.

Darbe panaudoti metodai

Darbe panaudoti eksperimentiniai, analitiniai bei skaitiniai metodai. Eksperimentams pritaikyti originalūs ir reglamentuojami tyrimų metodai. Atsparumas plyšių atsiradimui ir

plitimui įvertintas tiesinėje irimo mechanikoje naudojamu kriterijumi – įtempimų intensyvumo koeficientu. Skaitinei analizei panaudota ANSYS programa.

Tyrimų objektas

Stipriojo ketaus mechaninis būvis, atsirandantis realiuose konstrukcijos elementuose technologinio gamybos proceso ir eksploatacijos metu, veikiant daugiacikliam apkrovimui, susidarius ir plintant plyšiui.

Darbo naujumas ir originalumas

- Darbas skirtas stipriojo sluoksniuotojo ketaus nuovargio irimui daugiaciklio ir hiperciklio apkrovimo srityje, kurioje irimo procesus nusakantys veiksniai mažai žinomi.
- Nustatyti plyšio atsiradimo rodikliai ir plitimo dėsningumai daugiaciklio apkrovimo veikiamame stipriajame sluoksniuotajame ketuje.

Darbo praktinė vertė

1. Atliktais tyrimais nustatyta, kad daugiaciklio ir hiperciklio apkrovimo atveju nuovargio plyšiai stipriojo sluoksniuotojo ketaus technologiškai pažeistuose sluoksniuose atsiranda ir plinta greičiau nei sluoksniuose be defektų ir termiškai apdorotame ketuje.
2. Gauti tyrimų rezultatai ir skaičiavimo metodika leidžia įvertinti didelio gabarito konstrukcijų elementų stiprumą.

Darbo aprobacija

Atliktų tyrimų pagrindu buvo paskelbtas straipsnis užsienio periodiniame leidinyje, įrašytame į Mokslinės informacijos instituto (ISI) sąrašą, 3 straipsniai Lietuvos periodiniuose recenzuojamuose leidiniuose, 3 straipsniai kituose Lietuvos recenzuojamuose mokslo leidiniuose, aptarti 3 tarptautinėse konferencijose Lietuvoje su šiais pranešimais:

- *Dviejų sluoksnių ketaus atsparumo daugiacikliam lenkimui tyrimas.* Tarptautinė konferencija „Mechanika – 2003“, Kaunas, 2003 m. balandžio 3–4 d.
- *Ketaus su poringuoju sluoksniu daugiaciklio lenkiamojo stiprumo tyrimas.* Tarptautinė konferencija „Mechanika – 2004“, Kaunas, 2004 m. balandžio 1–2 d.

- *Ketaus su skirtingomis struktūromis atsparumas cikliniam apkrovimui.* Tarptautinė konferencija „Mechanika – 2005“, Kaunas, 2005 m. balandžio 7–8 d.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas ir keturi problemą bei tyrimus aprašantys skyriai, baigiamosios išvados, bibliografinių šaltinių sąrašas bei priedai. Pirmajame skyriuje pateikiama stipriojo sluoksniuotojo ketaus atsparumo daugiacikliam apkrovimui tyrimų apžvalga ir formuluojamos problemos; antrajame skyriuje aprašoma naudota originali tyrimų metodika ir bandymų įranga; trečiasis skyrius skirtas stipriojo sluoksniuotojo ketaus atsparumo plyšio susidarymo ir plitimo tyrimui kai technologiškai pažeistas sluoksnis susidarė liejimo proceso metu. Ketvirtajame skyriuje pateikiama tyrimo medžiaga ir rezultatai, kai skirtingų savybių sluoksniai stipriojo ketaus didelių gabaritų detalių atskiruose tūriuose susidaro terminio apdirbimo procese.

Disertacijos tekstas pateiktas 100 puslapių; tekste yra 68 iliustracijos, 6 lentelės ir 3 priedai. Disertacija parašyta lietuvių kalba.

Padėka

Autorius dėkoja doc. A. Krenevičiui, doc. M. Šukštai, Mančesterio universiteto daktarui J. Marrow, „Metso Minerals Industries Inc.“ gamybos technologijos direktoriui V. Svalbonui už pagalbą darant struktūrų, fraktografijų nuotraukas bei skaičiuojant nuovargio plyšio plitimo rodiklius, VGTU Stiprumo mechanikos laboratorijos darbuotojams už pagalbą atliekant eksperimentinius tyrimus.

1. TYRIMŲ APŽVALGA IR PROBLEMOS FORMULAVIMAS

Naujai kuriamų ir eksploatuojamų mašinų bei įrenginių ilgaamžiškumo ir patikimumo problemos glaudžiai susiję su naudojamų medžiagų mechaninėmis savybėmis ir konstrukcijų elementų su plyšiais geba priešintis išoriniam poveikiui, t. y. atsparumu nuovargio plyšio susidarymui ir plitimui. Naujų medžiagų, skaičiavimo metodų ir kriterijų įvertinimas jau projektavimo stadijoje turi garantuoti saugią eksploataciją. Dėl daugkartinio apkrovimo jau eksploatuojamų įrenginių detalėse susikaupia negrįžtami pažeidimai, keičiasi medžiagos mechaninės savybės, todėl tokių objektų resurso didinimas susijęs su modernizacija (įskaitant ir detalės pakeitimą) ir pritaikymu tokių techninių sistemų, kurios užtikrintų tolesnį saugų darbą. Visi stiprumo teorijos ir skaičiavimo metodai turi būti pagrįsti eksperimentais ir naujai atliekamais eksperimentiniais, analitiniais ir skaitiniais tyrimais, įvertinančiais kiekvieno konstrukcijos elemento mechaninį būvį. Didelio gabarito chemijos, energetikos, transporto ir kalnakasybos įrenginių stiprumui ir patikimumui užtikrinti taikomi skaičiavimo metodai, pagrįsti tamprumo, plastiškumo, prisitaikomumo ir irimo teorijomis. Šios metodikos sukurtos remiantis atskirų konstrukcijos elementų apkrovimo ir deformavimo sąlygų analize, teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais, kuriuos atliko A. A. Grifitsas, G. R, Irwinas, J. E. Orovanas, N. Machutovas, G. Čerepanovas, N. Panasiukas, V. T. Troščenko ir kt. [1–13].

Nuovargio problemos, t. y. medžiagų irimas, veikiant ciklišKai kintantiems įtempimams, gerokai mažesniems už nuovargio ribą, žinomos jau seniai, tačiau tyrimų poreikis vis dar išlieka aktualus. Tai pirmiausia susiję su sudėtingais įrenginiais ir konstrukcijomis, dirbančiomis kartotinai kintančiais apkrovimais, ir jų ilgaamžiškumo klausimais, iš esmės priklausančiais nuo medžiagos atsparumo irimui.

Visiškas metalinių konstrukcijų irimo procesų supratimas skirtingomis eksploatacijos sąlygomis gali būti pasiektas tik kompleksiškai sprendžiant, patikslinant bei papildant teorinius teiginius, eksperimentinius tyrimų rezultatus, nustatant plyšių susidarymo mechanizmus, nuovargio plyšių plitimą nusakančius veiksnius, o taip pat lemiamą struktūros defektų įtaką.

1.1. Stiprusis ketus kaip konstrukcinė medžiaga

Šiuolaikinė konstrukcinė medžiaga turi būti labai stipri, nedidelio tankio, lengvai apdirbama, atspari dilimui ir t. t. Kuriamos ir medžiagos, turinčios specifinių savybių, reikalingų vienai ar kitai konstrukcijai. Gamybos technologija tobulinama siekiant suderinti kuo didesnį atsparumą dilimui, plyšio atsiradimui ir jo plitimui. Transporto ir kalnakasybos įrenginių konstrukcijų elementų ilgaamžiškumo ir patikimumo didinimas susijęs su racionaliu

medžiagos mechaninių savybių pritaikymu ir plačiu duomenų banku apie deformavimo, stiprumo ir atsparumo plyšio plitimui rodiklius. Didelio gabarito mineralų smulkintuvuose naudojami juodųjų ir spalvotųjų metalų lydiniai. Atramos, būgnai ir krumpliaračiai gaminami iš žinomų ir specialių ketaus rūšių [14].

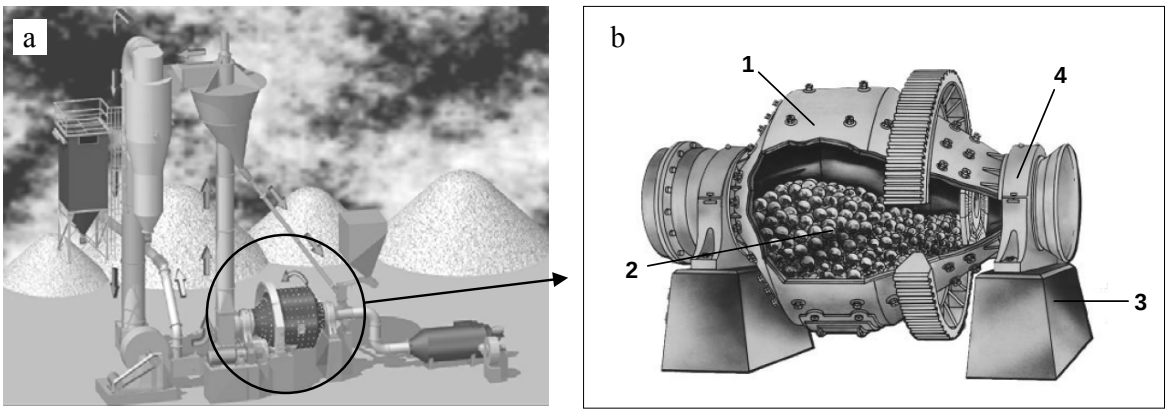
Ketus – tai daugiakomponentis geležies lydinys su anglimi ($C > 2.14\%$) ir kitais elementais. Pagal cheminę sudėtį ir tai, kokiame pavidale yra anglis, ketus skirstomas į baltąjį (anglis surišta į cementitą), grafitinį (anglis laisvo grafito pavidalu) ir specialių savybių legiruotąjį ketų.

Grafitas ketuje gali būti plokštelių, kirminėlių, dribsnių ir rutuliukų formos. Pagal tai ketus atitinkamai vadinamas pilkuoju, vermikulitiniu, kaliuoju ir stipriuoju. Grafito formą lemia cheminė lydinio sudėtis, kristalizacijos bei aušinimo greitis; įkaitinimo ir ataušinimo sąlygos apdorojant termiškai. Mažindamas kietumą, grafitas suteikia ketui geras antifrikcines savybes, tačiau, palyginti su metaliniu pagrindu, turi prastas mechanines savybes, ypač tempiant ir lenkiant, todėl grafitinius intarpus galima prilyginti tuštumoms arba įtrūkimams. Ketaus liejiniams svarbus terminis apdorojimas, padedantis suformuoti reikiamą metalinio pagrindo struktūrą: feritinę, feritinę-perlitinę, perlitinę-feritinę, perlitinę-martensitinę, martensitinę, ar beinitinę [15]. Ketus, turintis feritinį arba feritinį-perlitinį pagrindą, yra minkštas (140–160 HBN), mažo stiprumo, neatsparus dilimui. Perlitinio ketaus stiprumas, kietumas (220–245 HBN), atsparumas dilimui didesni. Martensitinė struktūra yra labai kieta (iki 500 HBN). Ketus su beinitine struktūra yra didelio stiprumo, smūginio tąsumo ir atsparus dilimui. Struktūros komponavimas yra svarbus ketaus plastiškumui, dribsnių ir rutulio formos grafitas didina plastiškumą.

Stiprusis ketus – tai vienas perspektyviausių liejamųjų lydinių. Stiprusis ketus su rutuliniu grafitu (angl. *nodular iron*, *spheroidal graphite iron*, *SG iron*) gaunamas į ketaus lydalą liejimo procese įvedant Mg ir kitus elementus (Ca, Ce, Y, Nd, Pr) [16, 17]. Vidutinis grafito rutulio dydis gali būti gana įvairus (nuo mažiau kaip 25 μm iki daugiau kaip 100 μm skersmens). Išskirtinė stipriojo ketaus ypatybė – geros mechaninės savybės. Dėl grafito, neturinčio aštrių kampų, formos gerokai išauga ketaus stiprumas ir plastiškumas, todėl jis naudojamas įvairiose konstrukcijose, kurias eksploatuojant veikia statinės, dinaminės ir ciklinės apkrovos: alkūninių velenų gamyboje (dėl gero apdirbamumo, atsparumo nuovargiui, didelio tamprumo modulio), pavarų krumpliaračiuose (dėl gero atsparumo dilimui), automobilių gamyboje (dėl didelio plastiškumo). Naudojant stiprųjį ketų, mažinama konstrukcijos masė, užtikrinamas gaminių ilgaamžiškumas ir patikimumas. Didelio gabarito ir brangiai kainuojančiuose kalnakasybos įrenginiuose atskiriems konstrukcijoms mazgams ir detalėms

projektavimo stadijoje arba eksploatacijos metu skiriamas ypatingas dėmesys, nes jie lemia visos konstrukcijos darbą, o prastovos, sutrikus procesui dėl remonto, yra labai nuostolingos.

Ilgą laiką mineralų smulkinimo įrenginius projektavo ir gamino tarptautinė korporacija „Svedala Grinding Industry Inc“. Šiuo metu darbus tęsia „Metso Minerals Industries Inc“. Įvairių mineralų smulkinimo malūnai dirba visuose kontinentuose. „Metso Minerals Industries Inc“ uolienų smulkintuvai eksploatuojami ir Lietuvos žvyro karjeruose. Šiuolaikinių kalnakasybos pramonėje naudojamų uolienų smulkinimo įrenginių (1.1 ir 1.2 pav.) būgnų skersmuo viršija 12 m, o bendroji masė – 3800 tonų [18]. Reikalaujamas ilgaamžiškumas (daugiau kaip 25 metų) užtikrinamas tik taikant naujausias projektavimo, gamybos ir eksploatacijos technologijas.



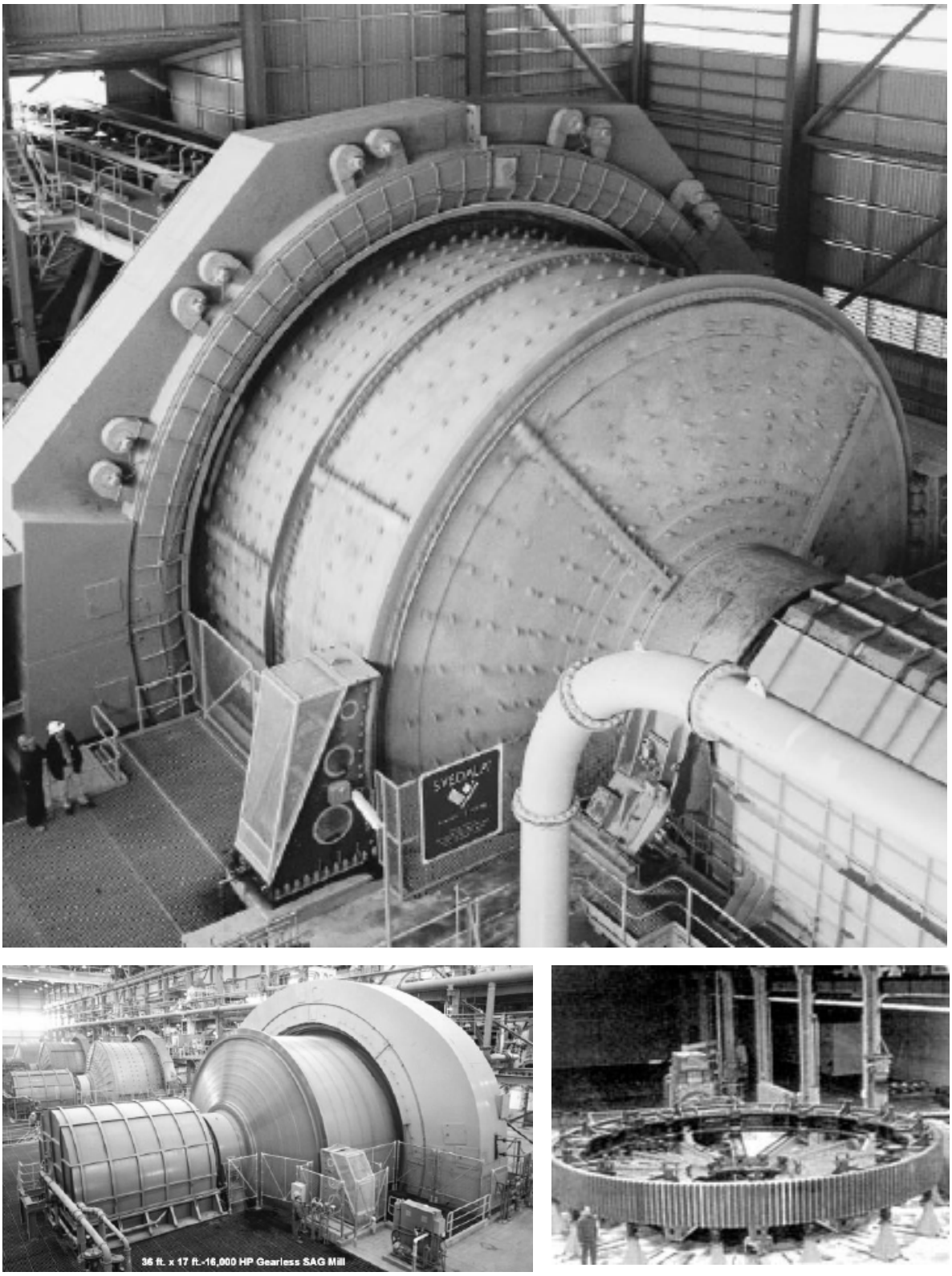
1.1 pav. Gavybos pramonės technologinio proceso schema (a) ir uolienų smulkintuvo schema (b): 1 – būgnas, 2 – uolienos, 3 – atramos, 4 – guoliai

Iki 1960-ųjų pabaigos tipinių smulkintuvų matmenys buvo palyginti nedideli: galingumas – iki 2985 kW. Apie septyniasdešimtuosius uolienų smulkintuvai ėmė sparčiai vystytis. Dabartiniu metu didžiausių smulkinimo įrenginių galingumas – 36 tūkst. kW.

Uolienų smulkintuvų konstrukciniai elementai yra gaminami iš stipriojo ketaus (korpusinės bei atraminių konstrukcijų detalės) ir stipriojo plastiškojo (ADI) ketaus (pavarų krumpliaračiai).

Nusakant stipriojo ketaus markę, paprastai naudojamas trijų skaičių derinys: stiprumo riba σ_u, takumo riba σ_y ir santykinis pailgėjimas δ [19].

Pagal Rusijos standartą GOST 7293-85, stiprusis ketus žymimas ВЧ - *высокопрочный чугун*. Po raidžių rašomi skaičiai reiškia minimalią σ_u, kgf/mm^2 reikšmę.



1.2 pav. Praktikoje naudojami didžiausių pasaulyje uolienų smulkintuvai ir jų dalys

Pagal JAV standartą ASTM A 536, stiprusis ketus žymimas skaičiais: pirmieji du skaičiai reiškia σ_u, svarais į kvadratinį colį x 10^3, antrieji – to paties rodiklio, MPa x 10^{-1}. Trečias skaičius reiškia santykinį pailgėjimą.

Pagal Vokietijos standartą DIN 1693 stipriojo ketaus markėje GGG-50 raidės reiškia *gegosen* (atlieta), *gußeisen* (ketus), *globular* (rutulinis), 50 – minimali σ_u reikšmė MPa x 10^{-1} (kgf/mm^2).

Pagal Anglijos standartą BS 2789, stipriojo ketaus markės sudaromos tik iš skaičių, pavyzdžiui, 420/12. Čia 420 – stiprumo riba tempiant σ_u, MPa, 12 – santykinis pailgėjimas δ, %.

Prancūziškame standarte NF A 32-201 raidės FGS reiškia: *fonte* (liejimas), *graphite* (grafitas), *sferoidal* (rutulinis). Po raidžių rašomos σ_u (MPa) ir δ (%) reikšmės.

Įvairios stipriojo ketaus rūšys gaunamos modeliuojant grafito rutulėlius supančią matricos struktūrą. Kai kurių šalių standartuose reglamentuojamos tik mechaninės stipriojo ketaus savybės, bet nenurodoma cheminė sudėtis. Liejyklos, norėdamos geriau pritaikyti ketų konkrečioms eksploatacijos sąlygoms, dažnai nukrypsta nuo standarto ir įveda savo žymėjimus, pavyzdžiui, SGI, FGS, GFS, G, AUSTUF (Australija), prideda raidę M (modifikuotas) ir pan. Šiam tyrimui buvo panaudoti ketūs, gauti iš įvairių šalių: Amerikos, Prancūzijos ir Vokietijos.

1.2. Daugiaciklio apkrovimo tyrimai

Pirmą kartą su nuovargio reiškiniu buvo susidurta dar XIX amžiuje, kilus industrinei revoliucijai. Tuomet dėl nuovargio dažniausiai gesdavo garo mašinos, lokomotyvai ir panašūs įrenginiai. Domėjimasis šia problema ilgainiui parodė, kad jie sugesdavo dėl palaipsnio pažeidimų kaupimosi medžiagoje, veikiant kartotinai kintamoms apkrovoms ir lemdavusių suirimą. Nors šiais klausimais yra paskelbta daugiau nei 100 tūkst. darbų [20], tačiau ir dabartiniu metu nuovargio reiškinys nepakankamai aiškus. Atsparumo mažacikliam ir daugiacikliam nuovargiui problemas nagrinėjo C. Bathias, T. Naito, H. Ueda, K. Kanazawa, V. S. Ivanova, L. R. Botvina, Y. Murakamis, V. T. Troščenko, S. V. Serensenas, R. M. Šneiderovičius, N. A. Machutovas ir kiti. Lietuvoje mažaciklio ir daugiaciklio stiprumo klausimai nagrinėjami A. Čyro, A. Kudzio, M. Daunio, A. Čižo, A. Žiliuko, H. Medekšo, R. Banevičiaus, J. Bareišio, A. Bražėno, Ž. Bazaro, Z. Kamaičio, R. Kačianausko, J. Atkočiūno, R. Belevičiaus, A. Kvedaro A. Krenevičiaus, M. Šukštos, S Stupak ir kitų darbuose, taikant analizinius, skaitinius, matematinio programavimo, modeliavimo ir eksperimentinius metodus.

Mažaciklio ir daugiaciklio nuovargio problemos vis dar laikomos vienu iš labiausiai dominančių reiškinių šiandieniniame moksle [10]. Dažni gedimai dėl nuovargio aiškinami

neteisinga eksploatacija arba nepakankamu šio reiškinio išmanymu. Tai sudėtingi ir įvairūs procesai, vykstantys medžiagose veikiant ciklinėms apkrovoms, ypač jautrūs įvairių technologinių, eksploatacinių ir konstrukcinių veiksnių poveikiui. Nuovargis pagal ciklų skaičių ir irimo mechanizmų pasireiškimą klasifikuojamas taip [21]:

10^0-10^1 – inframažaciklis (dekaciklis) irimas, būdingas veikiant avariniams veiksniams.

10^0- 0^3 – mažaciklis (hektociklis) nuovargis, kuriam būdingos didelės mikroplastinės deformacijos irimo zonoje, mikrostruktūros lygmenyje.

10^3-10^5 – mažaciklis (kilociklis) nuovargis vyksta esant palyginti mažoms makroplastinėms deformacijoms irimo zonoje, makroskopiniame lygmenyje.

10^5-10^8 – klasikinis daugiaciklis (megaciklis) nuovargis vyksta esant mikroplastinėms deformacijoms mikro-ir makrotūriuose arti irimo vietos.

10^8-10^9 – hiperciklis (gigaciklis) nuovarginis irimas. Jam būdingas labai didelis apkrovimo ciklų skaičius ir mikroplastinės deformacijos mikrotūriuose arti irimo vietos.

10^{10}-10^{12} – hipernuovargis (teraciklis nuovargis) vyksta prie ypač didelių apkrovimo ciklų skaičių, deformuojant makrostruktūriniame lygmenyje.

Laikoma, kad apie daugiaciklio nuovargio tyrimus, kai ciklų skaičius viršijo 10^7 ciklų, pirmieji 1984 metais paskelbė Japonijos mokslininkai [20]. Tačiau tai nereiškia, kad iki tol nebuvo tyrimų esant dideliems ciklų skaičiams. Dar 1958 metais rusų mokslininkas Šabalinas pastebėjo trūkį nuovargio kreivėje ir šis jo pastebėjimas sulaukė didelio atgarsio visame pasaulyje. Paskutiniu metu padaugėjo tyrimų, kai nuovargio ciklų skaičius peržengia klasikinio daugiaciklio ($N \approx 10^5$) nuovargio ribas. Nuovargio tyrimo ribų išplėtimas yra susijęs su tuo, kad nemažos dalies svarbių konstrukcijų amžius ima siekti 50–100 metų. Tyrimai rodo, kad pasiekus 10^8-10^9 ciklų šiame diapazone mažėja nuovargio riba, taigi koncepcija apie begalinį ilgaamžiškumą, kai įtempimai mažesni už patvarumo ribą, neteisinga, o dabartinė skaičiavimo metodika negarantuoja patikimo konstrukcijų elementų darbo laiko nustatymo. Pagrindine tokio netikslumo priežastimi laikomi nuovargio plyšio atsiradimo ir irimo mechanizmų pasikeitimai, kuriems paaiškinti iškelta daugybė hipotezių, tačiau nepaisant intensyvių tyrimų, gigaciklinio nuovargio prigimtis išlieka neaiški. Daugiaciklio nuovargio tyrimus sunkina tai, kad esant mažoms apkrovų amplitudėms, yra sudėtinga nustatyti plyšių dydį neardančios kontrolės metodais. Todėl reikia naujų metodų ir tyrimų, pagrįstų fizikiniu reiškiniu, kontroliuoti nuovargio plyšių plitimą esant dideliems ciklų skaičiams [22-27].

1.3. Pagrindiniai irimo mechanikos kriterijai

Norint įvertinti stiprumą arba numatyti kieto kūno irimą ir valdyti jį, būtina žinoti irimo mikroprocesus nusakančius parametrus ir įvairius veiksnius, darančius įtaką šiam procesui. Žinomi konstrukcijų ir mašinų elementų lūžiai labai įvairūs, priklauso nuo daugelio veiksnių ir yra sunkiai prognozuojami. XX amžiaus pradžioje sukurti metodai ir kriterijai medžiagų ir konstrukcijų stiprumui įvertinti yra pagrįsti realaus kūno skaičiuojamuoju modeliu [1, 7]. Buvo manoma, kad konstrukcijos elementas yra viename iš būvių: vientisame arba suirusiame. Perėjimas iš būvio į būvį vyksta akimirksniu, jeigu įtempimų deformacijų būvis, apskaičiuotas pagal nustatytą modelį, pasiekia kritinį dydį. Toks klasikinis požiūris neleidžia įvertinti kūno su defektu stiprumo, kadangi neįvertina ypatingo įtempimų deformacijų būvio prieš plyšio viršūnę, kurios užsiapvalinimas yra palyginamas su atskirais medžiagos linijiniais struktūriniais parametrais. Skaičiuojant konstrukcijos elementų su plyšiu stiprumą, svarbu įvertinti jo lokalias fizikines-mechanines savybes, ypač gebą priešintis plyšio plitimui ir įtempimų deformacijų būvį plyšio viršūnės aplinkoje. Sukurtos kūnų su plyšiais irimo teorijos nagrinėja įvairius suirimo mechanizmus, susietus su plastinės zonos plyšio viršūnėje dydžiu ir atstumu nuo plyšio viršūnės iki artimiausio laisvo paviršiaus. Jeigu šie dydžiai maži, palyginti su plyšio matmenimis, iki pat suirimo, tai toks suirimas yra kvazitrapus. Trapaus irimo teorijos pradininku laikomas Grifitsas, teigęs, kad plyšys pradeda judėti, jeigu deformacijos energijos prieaugis G, sklindant plyšiui, pasiekia kritinį dydį G_c, būtiną naujo paviršiaus susidarymui [1, 2, 5, 6]:

$$G(\sigma, l) = G_c, \tag{1.1}$$

čia G – deformacijos energijos prieaugis, G_c – ribinis deformacijos energijos prieaugis, σ – įtempimai, l – vidinio plyšio ilgis.

Vėliau šis kriterijus apibendrintas kvazitrapiam atvejui, kai energija eikvojama ne tik laisvo paviršiaus, bet ir naujos mažos plastinės zonos susidarymui plyšio viršūnėje. Grifitso teorija nenustato plastinių zonų dydžio ir apribojimų. Jeigu zonoje prieš plyšio viršūnę susidaro didelės plastinės deformacijos, tai Grifitso kriterijus nekorektiškas. Suirimo aprašymui naudojami bendri energetiniai metodai, paremti Grifitso teorija, taip pat deformuojamo kūno energijų kitimo greičių balansu plyšio plitimo proceso metu.

Dž. Raisas pasiūlė plyšio viršūnę gaubiančios ir judančios kartu su plyšiu jo viršūnėje apybrėžos J integralą. Šis integralas nusako energijos prietaką plyšio viršūnėje ir taip pat

naudojamas kaip medžiagos irimo kriterijus: plyšys pradės augti, kai *J*-integralas pasieks kritinę reikšmę J_c, t. y.:

$$J\Big|_{\sigma=\sigma_c} = -\frac{\partial U}{\partial l}\Big|_{\sigma=\sigma_c} = J_c, \tag{1.2}$$

čia *J*-integralas pagal kontūrą, apimantį plyšio viršūnę, lygus tamprios energijos išlaisvinimo greičiui netiesiškai tampriam kūnui, J_c,- ribinė *J*-integralo reikšmė, *U* – tamprios deformacijos energija.

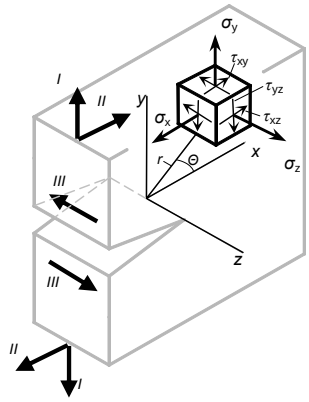
Dydis J_c yra medžiagos rodiklis ir vadinamas ribine *J*-integralo reikšme. Idealiai tampriame kūne dydis *J* reiškia tampriųjų deformacijų energijos srautą į plyšio viršūnę, t. y. $J_c = G_c$. Šis kriterijus gali būti efektyviai taikomas netiesinėje irimo mechanikoje, analizuojant plyšių plitimą tamprioje-plastiškoje medžiagoje, kai plyšio plastinė zona plyšio viršūnėje didesnė už patį plyšį. Yra sukurti ir kiti plyšio viršūnę gaubiančios zonos apybrėžos integralų variantai [31, 32].

Platų pritaikymą inžineriniuose skaičiavimuose įgavo jėginiai kriterijai, pirmiausia siejami su Irvino įvestu supratimu apie įtempimų intensyvumo koeficientą [33–36]. Irvinas įrodė, kad kiekvienam plyšio tipui egzistuoja toks ribinis įtempimų intensyvumo koeficiento dydis, kurį pasiekus, prasideda plyšio plitimas ir kūno irimas:

$$K = K_c, \tag{1.3}$$

čia *K* – įtempimų intensyvumo koeficientas, K_c – kritinė įtempimų intensyvumo koeficiento reikšmė.

Jėginio irimo kriterijaus tyrimas sąlygojo tiesinės irimo mechanikos sukūrimą, gerai tinkančios trapių medžiagų ir inžinerinių konstrukcijų skaičiavimui. Vėliau Irvino sukurtą metodą tobulino G. Barenblatas, S. Christianovičius, M. Leonovas, V. V. Panasiukas, G. P. Čerepanovas, E. Morozovas, O. Bovis, A. Kobajašis, F. A. McKlintokas, G. Noiberas, D. S. Dagdeilas, I. W. Hačinsonas, K. Ikeda ir kiti mokslininkai [5, 6]. Didelę reikšmę įgyja įtempimų ir deformacijų būvis srityje arti plyšio viršūnės (1.3 pav.). Irvinas įrodė, kad egzistuoja trys kinematiškai nepriklausomi plyšio paviršių poslinkiai: normalinio atotrūkio (I tipas), išilginės (II tipas) ir skersinės (III tipas) šlyties.



1.3 pav. Pagrindinės plyšio plitimo schemos ir įtempimų būvis plyšio viršūnėje

Pirmuoju deformavimo tipo atveju įtempimų ir deformacijų laukai aprašomi taip [37, 38]:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_{\mathrm{I}}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\Theta}{2}\left(1 - \sin\frac{\Theta}{2}\sin\frac{3\Theta}{2}\right) + \ldots$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{\mathrm{I}}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\Theta}{2}\left(1 + \sin\frac{\Theta}{2}\sin\frac{3\Theta}{2}\right) + \ldots \qquad (1.4)$$

$$\sigma_{zz} = \nu\left(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}\right) \quad \text{plokščiam deformacijų būviui}$$

$$\sigma_{zz} = 0 \quad \text{plokščiam įtempimų būviui}$$

$$u_x = \frac{K_{\mathrm{I}}}{4\mu}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\left[(2\kappa - 1)\cos\frac{\Theta}{2} - \cos\frac{3\Theta}{2}\right] + \ldots$$

$$u_y = \frac{K_{\mathrm{I}}}{4\mu}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\left[(2\kappa + 1)\sin\frac{\Theta}{2} - \sin\frac{3\Theta}{2}\right] + \ldots$$

$$u_z = -\frac{\nu}{E}\int\left(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}\right)dz\,,$$

čia r ir Θ – nagrinėjamo taško polinės koordinatės, ν – Puasono koeficientas, $\kappa = 3 - 4\nu$ plokščiam deformacijos būviui, $\kappa = \dfrac{3-\nu}{1+\nu}$ plokščiam įtempimų būviui.

Analogiškos išraiškos naudojamos II ir III deformavimo tipams aprašyti. Čia įtempimų intensyvumo koeficientas K (K_{I}, K_{II}, K_{III}) nusako įtempimų lauko intensyvumą ir deformacijas plyšio viršūnėje. Jis priklauso nuo kūno su plyšiu matmenų, plyšio dydžio ir deformavimo tipo, nuo apkrovos didumo. Taigi įtempimų intensyvumo koeficientas yra pagrindinė įtempimų-deformacijų būvio charakteristika medžiagoje ir turi ypatingą reikšmę irimo mechanikoje. Bendra jo išraiška:

$$\begin{Bmatrix} K_{\mathrm{I}} \\ K_{\mathrm{II}} \\ K_{\mathrm{III}} \end{Bmatrix} = \sqrt{\pi l} \begin{Bmatrix} \sigma \cdot f_{\mathrm{I}K} \\ \tau \cdot f_{\mathrm{II}K} \\ \tau \cdot f_{\mathrm{III}K} \end{Bmatrix}, \tag{1.5}$$

čia f_{IK} $f_{\mathrm{II}K}$, $f_{\mathrm{III}K}$ – pataisos funkcijos, kuriomis įvertinamas plyšio ilgis ir bandinio geometrija.

Skaičiuojamasis arba eksperimentinis įtempimų intensyvumo koeficientas K taikomas įvertinant trapų konstrukcinių elementų suirimą. Ribinis įtempimų intensyvumo koeficientas ΔK_{th} yra medžiagos savybių rodiklis, apibūdinantis jos pasipriešinimą plyšio atsiradimui.

Kai plastinė zona palyginti su plyšio ilgiu yra didelė, įtempimų intensyvumo koeficientas K praranda prasmę. Šis atvejis jau yra netiesinės irimo mechanikos objektas. Nustatyta, kad jėginius irimo kriterijus galima taikyti, jeigu nominalūs įtempimai suirimo metu neviršija 0,8 σ_y, o plastinės srities dydis neviršija 0,2 plyšio ilgio. Viršijus šias reikšmes plyšių plitimui analizuoti labiau tinka vadinamasis δ_c kriterijus arba deformacinis irimo kriterijus. Deformacinius kriterijus tobulino G. Vestergardas, M. Mušelišvilis, G. Irvinas, N. A. Machutovas ir kiti [6]. Plyšio didėjimą galima įsivaizduoti taip: plyšys ims plisti, kai plyšio atvėrimo dydis pasieks kritinę jo reikšmę:

$$\delta(l,\sigma) = \delta_c, \tag{1.6}$$

čia δ – plyšio viršūnės atsivėrimas, δ_c – ribinis plyšio atsivėrimo dydis.

Tokiu būdu nustatytas kriterijus nustato tampriai plastiško kūno su plyšiu ribinę pusiausvyros sąlygą. Šis kriterijus sunkiai pritaikomas kūnams su defektais, nes sunku nustatyti deformacijas zonoje arti plyšio viršūnės.

Plyšių plitimui tampriuose ir tariamai tampriuose kūnuose analizuoti tinka bet kuris iš ekvivalentiškų K_c, G_c, δ_c ir J_c kriterijų. Priklausomai nuo medžiagos plastinių savybių, geometrijos ir esančių plyšių, taip pat įtempimų ir deformacijų pobūdžio, naudojamas vienas ar

kitas irimą nusakantis kriterijus. Netiesinės irimo mechanikos kriterijai (*J*-integralas ir plyšio atsivėrimas δ_c) gali būti naudojami vietoj tiesinės irimo mechanikos kriterijų. Energiniai kriterijai taikomi tiesinėje ir netiesinėje irimo mechanikoje. Jie leidžia įvertinti kūno su plyšiu stiprumą be smulkios įtempimų ir deformacijų lokalizuotoje srityje plyšio viršūnėje analizės. Tačiau trimačių kūnų su plyšiais irimą, kai įtempimai viršija takumo ribą, minėti modeliai aprašo nepakankamai tiksliai. Tokiais atvejais naudojamas dviejų parametrų deformacinis kriterijus. Jį galima užrašyti taip:

$$K_{\mathrm{I}}^{2s} K_{\mathrm{Ic}}^{-2s} + \varepsilon_N^s \varepsilon_c^{-s} = 1, \tag{1.7}$$

čia ε_N – nominalioji kūno skerspjūvio deformacija, ε_c – ribinė deformacijos reikšmė, s – interpoliavimo parametras, K_{I} – įtempimų intensyvumo koeficientas I tipo atvejui apkraunant statiškai, $K_{\mathrm{I}c}$ – ribinis įtempimų intensyvumo koeficientas I apkrovimo atvejui (irimo tąsumas).

Šis kriterijus vadinamas dviejų parametrų, nes apima iš karto dvi grupes bazinių rodiklių, apibūdinančių medžiagos savybes – atsparumą plyšėjimui ir makroplastiškumą.

A. Žiliuko darbe [39] bendram atvejui, esant skitingiems irimo mechanizmams didelio tūrio elementuose, yra pasiūlytas toks irimo kriterijus:

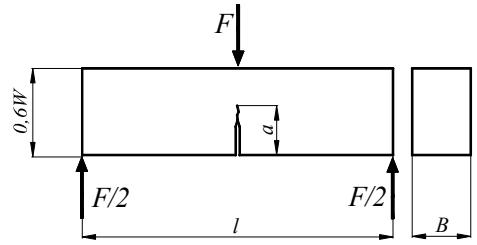
$$\left(\frac{\delta}{\delta_c}\right)^{p_o} + \left(\frac{\varepsilon_{\mathrm{nom}}}{\varepsilon_c}\right)^{s_0} = 1, \tag{1.8}$$

čia δ/δ_c – plyšio atsivėrimų santykis, p_0 – medžiagos ir irimo mechanizmo parametras, s_0 – medžiagos ir interpoliavimo koeficientas.

Plyšėjimo parametrų nustatymas yra vienas iš sudėtingiausių eksperimentinių tyrimų. Minėti kriterijai ne visi adekvatūs eksperimentinių tyrimų rezultatams. Praktiniams tikslams dažnai taikomas įtempimų intensyvumo kriterijus.

Medžiagos savybės įvertinamos bandant tam tikros formos ir dydžio bandinius. Gauti plyšėjimo kriterijų rodikliai kiekybiškai įvertina medžiagos atsparumą plyšio plitimui. Nuovargio plyšio plitimo tyrimai dažniausiai atliekami bandinį su pradine plokščia įpjova, orientuota statmenai maksimaliems tempimo įtempimams, apkraunant tempimu. Bandymų metu yra matuojamas plyšio ilgis, jo pokytis, fiksuojant apkraunančią jėgą bei ciklų skaičių. Plyšio gylis matuojamas vizualiai arba tinkama matavimo įranga, kaip funkcija nuo apkrovimo ciklų skaičiaus. Gauti duomenys yra panaudojami skaičiuojant plyšio plitimo greitį. Dažnai tiriama pritaikant įvairias lenkimo arba kombinuotas apkrovimo schemas. Tokioms schemoms

reikia kur kas sudėtingesnės analitinio skaičiavimo metodikos, kadangi įtempimų ir deformacijų pasiskirstymas tiriamų elementų skerspjūviuose nėra pastovus. Dažniausiai naudojamų bandymų schemos ir skaičiavimo formulės [12]: **Lenkiamas (trijų taškų) stačiakampio skerspjūvio bandinys**



1.4 pav. Lenkimo bandinio ir apkrovimo schema

Geometriniai parametrai:

$$s = 4W, \quad t = \frac{W}{2}, \quad a = \frac{W}{2}. \tag{1.9}$$

Įtempimų intensyvumo koeficientas:

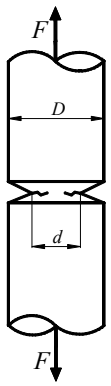
$$K_{\mathrm{I}} = \frac{F}{BW^{3/2}} f_1\left(\frac{a}{W}\right). \tag{1.10}$$

Pataisos funkcija:

$$f_1\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2}}{2\left(1+2\frac{a}{W}\right)\left(1-\frac{a}{W}\right)^{3/2}}\left[1{,}99-\left(\frac{a}{W}\right)\left(1-\frac{a}{W}\right)\left(2{,}15-3{,}93\left(\frac{a}{W}\right)+2{,}7\left(\frac{a}{W}\right)^2\right)\right], \tag{1.11}$$

čia W – skaičiuojamasis bandinio ilgis, B – bandinio plotis, a – plyšio gylis.

Tempiamas skritulinio skerspjūvio bandinys



1.5 pav. Skritulinio skerspjūvio tempimo bandinys

Įtempimai:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d^2}. \tag{1.12}$$

Įtempimų intensyvumo koeficientas:

$$K_{\mathrm{I}} = \sigma_0 \sqrt{\pi a}\, f_2\left(\frac{a}{D}\right). \tag{1.13}$$

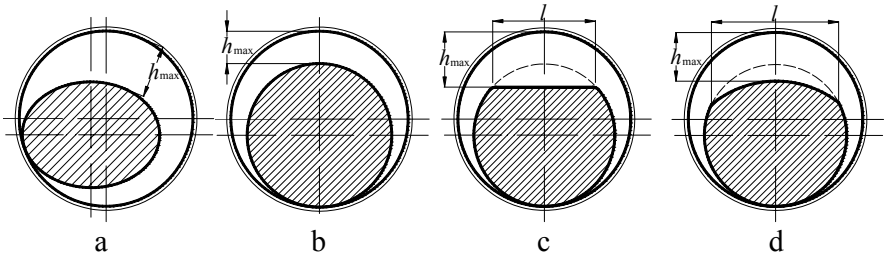
Pataisos funkcija:

$$f_2\left(\frac{a}{D}\right)=\left(1-\frac{2a}{D}\right)^{-3/2}\left(1{,}122-1{,}302\frac{2a}{D}+0{,}988\left(\frac{2a}{D}\right)^2-0{,}308\left(\frac{2a}{D}\right)^3\right). \qquad (1.14)$$

Konstrukcijos elementuose, tokiuose kaip varžtas, smeigė, plyšio frontas turi įvairią formą. A. Krenevičius [40] Jaremos formulę pritaikė varžtams ir smeigėms su įvairiu plyšio frontu (1.6 pav.) skaičiuoti:

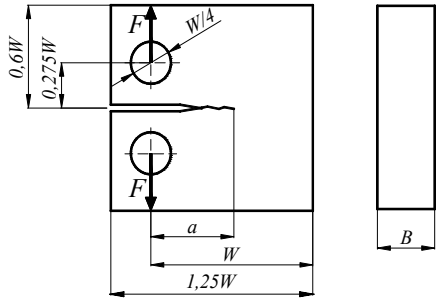
$$K_{\mathrm{I}}=\frac{\sqrt{\pi R(\nu)}}{2}\sqrt{1+\chi^2}\left(\frac{\sigma_f}{\sqrt{1+g}}+\frac{3}{4}\frac{\sigma_m}{\sqrt{1+0{,}5625g}}\right). \qquad (1.15)$$

čia $R(v)$ – kontūro spindulys-vektorius poliarinėse koordinatėse, σ_f – nominalūs tempimo įtempimai tiriamoje kontūro vietoje, σ_m – nominalūs lenkimo įtempimai tiriamoje kontūro vietoje, σ_f ir σ_m skaičiuojami priklausomai nuo plyšio formos, χ ir g parametrai nustatomi pagal formulę: $\chi=(1/R)(dR/dv)$, $g=0{,}199h^{-1}R\sqrt{1+\chi}$.



1.6 pav. Plyšio frontas skritulinio skerspjūvuio detalėse: a – elipsinis, b – apskritiminis, c – apskritiminis su tiesiu ruožu, d – apskritiminis su kitokio kreivumo spindulio ruožu

Kompaktinis necentrinio tempimo bandinys



1.7 pav. Stačiakampis necentrinio tempimo bandinys (kompaktinis CT bandinys)

Įtempimų intensyvumo koeficientas:

$$K_{\mathrm{I}}=\frac{F}{BW^{1/2}}f_3\left(\frac{a}{W}\right). \qquad (1.16)$$

Pataisos funkcija:

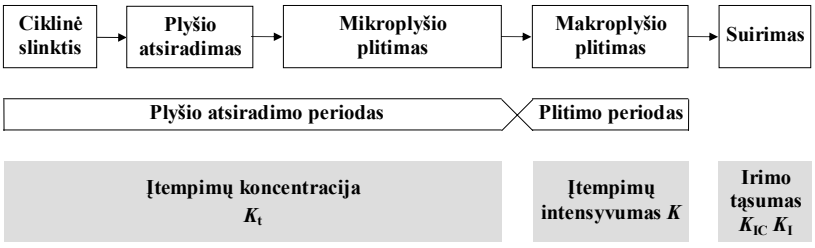
$$f_3\left(\frac{a}{W}\right)=\frac{\left(2+\frac{a}{W}\right)}{\left(1-\frac{a}{W}\right)^{3/2}}\left(0{,}886+4{,}64\left(\frac{a}{W}\right)-13{,}32\left(\frac{a}{W}\right)^2+14{,}72\left(\frac{a}{W}\right)^3\right). \quad (1.17)$$

Skaitiniai metodai, tokie kaip baigtinių elementų bei ribinių elementų metodai, taip pat panaudojami sprendžiant irimo mechanikos problemas. Baigtinių elementų metodo (BEM) privalumas tas, kad tyrimams galima pasirinkti sudėtingų formų elementus, jiems taikant kombinuotas apkrovimo schemas [41–43]. Be to, šiuose tyrimuose galima naudoti tiksliai aprašytas medžiagos savybes, įvertinti jos mechaninių savybių anizotropiją. Tokių elementų aprašymas analitiniais metodais yra labai sudėtingas. Nagrinėjant irimą skaitiniai metodai dažniausiai naudojami irimo rodiklių (įtempimų intensyvumo koeficiento, *J*-integralo, plyšio plitimo energijos) nustatymui. Tuo tarpu ribinės rodiklių reikšmės nustatomos eksperimentiniais metodais. Plyšių plitimą imituojantys modeliai dažniau taikomi analizuojant, patikslinant eksperimentinių tyrimų rezultatus, plyšių susidarymo ir plitimo modelius.

1.4. Plyšio atsiradimo ir plitimo analizė

Realių kūnų irimo procesai priklauso nuo struktūros, cheminės sudėties, defektų įtakos, apkrovimo tipo, aplinkos įtakos ir kitų veiksnių, apima mikro ir makro aspektus [44–50].

Konstrukcijos nesuyra tik prasidėjus irimo procesams plyšio viršūnėje. Didelę dalį esploatacijos laiko metalinės konstrukcijos dirba su įvairiais plyšiais. Irimas dėl nuovargio gali būti skirstomas į kelis etapus [53, 54]: (1) mikroplyšio atsiradimo, (2) trumpų plyšių plitimo, (3) ilgų plyšių plitimo ir (4) galutinio suirimo (1.8 pav.). Pirmosios dvi stadijos paprastai vadinamos plyšio atsiradimo periodu, o ilgų plyšių plitimas vadinamas tiesiog plyšio plitimu.

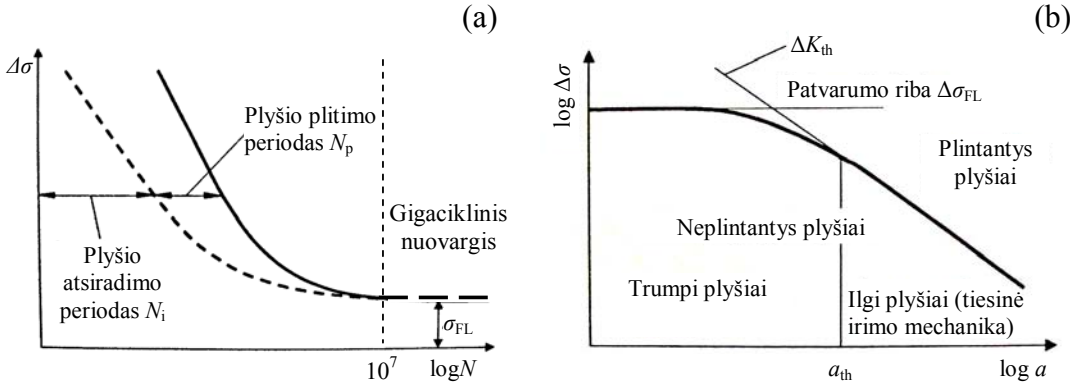


1.8 pav. Nuovargio fazės ir būdingi veiksniai

Tiksliai nustatyti, kada plyšys pereina iš atsiradimo į plitimo etapą, yra sudėtinga. Tačiau plyšio atsiradimo periodas iš esmės lemia didesnę detalės darbo laiko dalį, ypač daugiaciklio nuovargio atveju. Visas ciklišKai apkraunamų detalių ilgaamžiškumas susideda iš

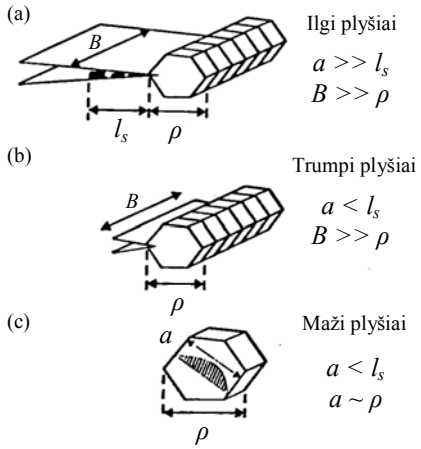
ciklų skaičiaus iki plyšio atsiradimo N_i, ir ciklų skaičiaus plyšiui plintant nuo pradinio iki kritinio ilgio N_p sumos, kaip parodyta 1.9 a paveiksle, vaizduojančiame mechaninių elementų darbo laiko (ciklų skaičiaus) priklausomybę nuo įtempimų intervalo $\Delta\sigma$. Čia $\Delta\sigma_{FL}$ yra įtempimų intervalas, atitinkantis patvarumo ribą.

Apibūdinant nuovargio plyšių plitimą taikoma priklausomybė tarp įtempimų intervalo $\Delta\sigma$ ir plyšio ilgio a, parodyta 1.9 b paveiksle [55]. Kreivė diagramoje rodo ribą tarp plintančių ir neplintančių (trumpų) plyšių. Ribinis plyšio ilgis a_{th} apibūdina ribą tarp plyšio atsiradimo ir plitimo stadijų arba perėjimą nuo trumpų plyšių į ilgus. Tiesinė irimo mechanika taikoma plote už šios ribinės plyšio ilgio reikšmės, kuri ketui yra nuo 0,05 iki 1 mm, o mažesnės reikšmės galioja didesnio stiprumo ketui.



1.9 pav. Konstrukcinių elementų ilgaamžiškumo (a) ir plyšių (b) diagramos

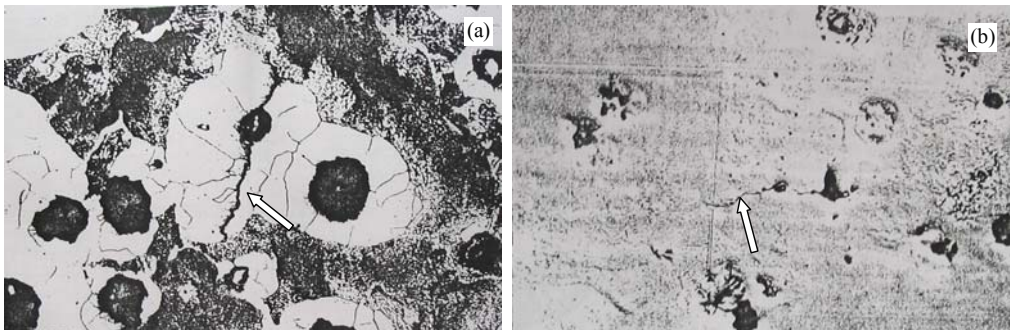
Daugelyje darbų analizuojamos plyšio plitimo stadijos. Sąlyginai plyšiai skirstomi į mažus, trumpus ir ilgus (1.10 pav.) [56].



1.10 pav. Plyšių skirstymo schema: a) ilgi plyšiai, b) trumpi plyšiai, c) maži plyšiai

Atskiros studijos [57] skirtos trumpų plyšių vystymuisi. Naujos idėjos buvo pasiūlytos stebint vadinamuosius trumpus plyšius, kurie atsiranda nuovargio pradžioje, prasidėdami medžiagos paviršiuje arba arti jo. Pirmą straipsnį paskelbė Pirsonas 1975-aisiais pastebėjęs, kad maži plyšiai auga kur kas greičiau už didelius, prie palyginti vienodų įtempimų intensyvumo reikšmių. Tai pat pastebėta, kad mikroplyšiai gali plisti prie žemesnių įtempimų intensyvumo reikšmių, kur makroplyšiai negali augti, t. y. $\Delta K < \Delta K_{th}$. Todėl iškilo mikroplyšių problema. Įvairūs plyšių barjerai, esantys medžiagos mikrostruktūroje (grūdų ribos, perlitas, fazių ribos), gali būti svarbūs mikroplyšiams ir mažiau susiję su makroplyšių plitimu. Buvo nustatytas tam tikras išsibarstymas mikroplyšių plitimo greičiams. Nors per paskutinius dešimtmečius buvo pasiūlyta nemažai mikroplyšių plitimo aiškinimų, tačiau daugelio iš jų rezultatai prieštaringi. Kai kurie autoriai abejoja *K* koncepcijos taikymu mažiems plyšiams.

Bendrame VGTU Stiprumo mechanikos laboratorijos ir Mančesterio universiteto medžiagų tyrimo centro darbe [58, 59] tyrinėtas trumpų plyšių plitimas ferito-perlito ir austemperizuotame ketuje (1.11 pav.). Plyšys buvo auginamas lenkiamame bandinyje virš ir žemiau nuovargio ribos (10^6 ciklų). Nuo tempimo paviršių buvo nuimamos replikos ir nustatyti pasirinktų plyšių augimo greičiai. Nuovargio plyšiai atsiranda arba nuo porų, arba nuo grafito rutuliukų. Išanalizavus plyšio sulėtėjimus ir sustojimus, nustatyta, kad plyšio viršūnė susiduria su mikrostruktūros barjerais – grūdelių ir fazių ribomis. Stabilus, neaugantis plyšys, kurio ilgis iki 1,5 mm, buvo tiriamas ferito / perlito plastiškame ketuje, iki 10^7 ciklų. Šis ilgas plyšys formavosi susijungiant trumpiems plyšiams. Buvo išanalizuotas ir ilgas stabilus plyšys austemperizuotame plastiškajame ketuje.



1.11 pav. Trumpi plyšiai, parodyti rodyklėmis, ferito-perlito e (a), austemperizuotame (b) ketuje

Plyšio atsiradimo ir plitimo dėsningumai yra skirtingi [53, 54]. Perėjimui nuo plyšio formavimosi į jo plitimą, t. y. perėjimui nuo daugelio pažeidimų visame medžiagos tūryje (gali būti tūryje koncentratoriaus aplinkoje) prie irimo magistralinio plyšio fronte būdingi trumpi

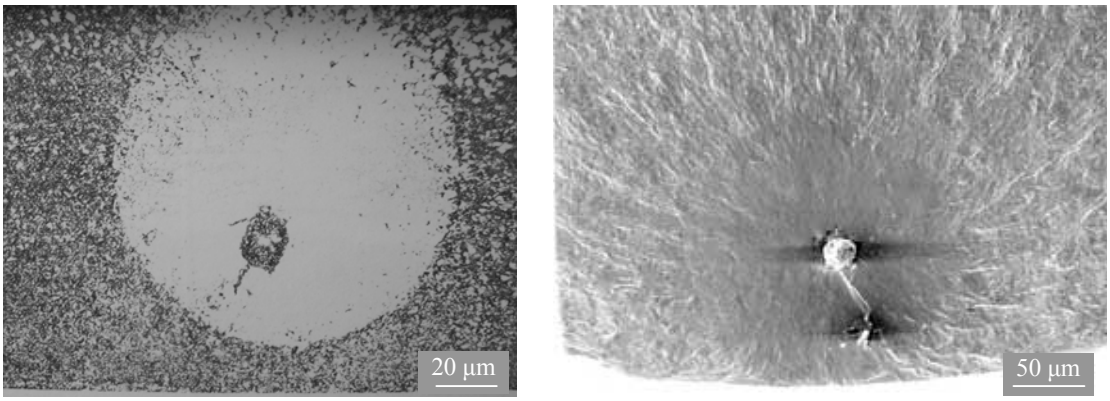
plyšiai, kurių atsiradimo židiniai yra įvairiausi defektai. Juos galima įsivaizduoti kaip lokalizuotus tūrius, kuriuose padidinti įtempimai ir deformacijos arba šie tūriai yra mažesnio stiprumo, jų atsitiktinis išsidėstymas lemia atsitiktinę plyšio formą ir kryptį.

Tų pačių mechaninių savybių arba tų pačių išorinių eksploatacinių veiksnių poveikis šiom abiem stadijom gali būti skirtingas. Nuovargio plyšių atskirų etapų plitimo tyrimai, atsižvelgiant į įvairius veiksnius arba jų kompleksus, yra svarbūs, kai nustatomos ilgaamžiškumo padidinimo sąlygos mažinant plyšio plitimo greitį. Didelę praktinę vertę turi duomenys apie minimalų plyšio plitimo greitį ir sąlygas, stabdančias jo plitimą. Daugelis veiksnių, mažinančių plyšio plitimą, ribiniu atveju gali lemti ir jo sustojimą. Apkrovimo ciklišKumas sukelia ypatingą irimo mechanizmą, kuris makroaplinkoje pasireiškia lėtu plyšio plitimu be žymesnės plastinės srities jo viršūnėje. Visiškas suirimas įvyksta, kai plyšys pasiekia kritinį dydį. Kiekvieno periodo trukmė priklauso nuo medžiagos savybių, bandinio geometrijos ir matmenų, apkrovimo sąlygų ir daugelio kitų veiksnių. Jeigu bandinys yra didelių gabaritų ir neturi koncentratorių, sukeliančių vietinius įtempimus, tai jo ilgaamžiškumą lemia inkubacinio periodo trukmė. Bandiniuose ir konstrukcijų elementuose su koncentratoriumi ilgaamžiškumą lemia ciklų skaičius, kurio reikia plyšiui plisti. Dėl vietinių įtempimų koncentratoriaus zonoje inkubacinis plyšio susidarymo periodas yra trumpas ir kartais sudaro tik 1–3 % bendro ilgaamžiškumo.

Nuovargio plyšio atsiradimas. Didelio stiprumo medžiagoms labai svarbi yra plyšio atsiradimo stadija, nes ji iš esmės lemia viso konstrukcijos elemento darbo laiką. Ji priklauso nuo struktūros defektų dydžio ir skaičiaus. Literatūroje pateikiama daug plyšio susidarymo teorijų, paremtų realių kūnų struktūros netobulumų modeliais. Dislokacijų ir vakansijų teorija teigia, kad medžiagos plastiškai deformuojasi dėl dislokacijų judėjimo struktūros kristaluose. Egzistuoja daug procesų, sukeliančių dislokacijas: lydinių kristalizacija, medžiagos mikroporų sugniuždymas ir pan. Pradžioje juda dislokacijos, susidariusios medžiagos gamybos procese, vėliau šios susidaro papildomai dėl ciklinio poveikio. Stabilizavusis susidarymui, toliau dislokacijos susilieja, sudarydamos mikroplyšių užuomazgas. Mikroplyšio susidarymą skatina ne tik dislokacijų, bet ir vakansijų sankaupos, kai iš gardelės mazgų išėję atomai migruoja tolyn į medžiagos sluoksnius. Dislokacijų sankaupa sukelia trapų medžiagos irimą, o vakansijų perteklius būdingas plastiškajam irimui. Realių kūnų nevienalytėje struktūroje visada yra ir kitokios prigimties defektų: įvairios formos intarpų, porų ir mikroplyšių, kurie jau savaime yra įtempimų koncentratoriai. Kai kada koncentratoriai gali būti ir antrinių fazių dariniai, pavyzdžiui, skirtingo kietumo fazėms įsiterpus vienoms į kitas. Defektų įtaka irimui didėja, didėjant medžiagos stiprumui. Nuovargio plyšių atsiradimo ties defektais faktas liudija, kad šie

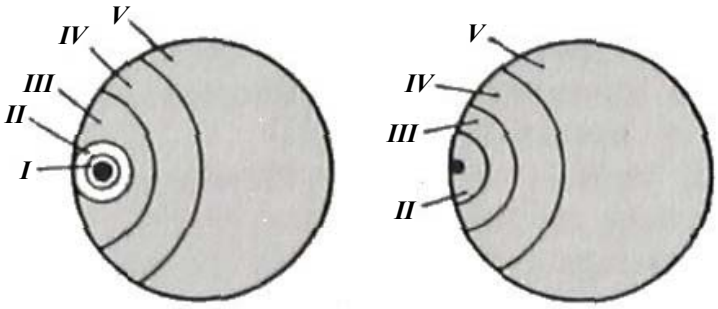
turi didelę įtaką mažų plyšių kinetikai ir konstrukcijų elementų ilgaamžiškumui. Manoma, kad gigaciklinėje srityje plyšių atsiradimo procesas apima iki 90 % viso konstrukcijos elemento ilgaamžiškumo. Turint omenyje realių medžiagų struktūros nevienalytiškumus, tampa aišku, kad atskiruose grūduose gali kilti žymūs įtempimai, viršijantys takumo ribą ir lemiantys plastinių deformacijų susidarymą medžiagos mikrotūriuose. Nustatyta, kad plastinės deformacijos atskirose medžiagos vietose pasiskirsto netolygiai. Nuovargio plyšiai atsiranda didžiausių mikroplastinių deformacijų susikaupimo vietose. Mikroplyšiai paprastai prasideda medžiagos paviršiuje, taip pat bandiniuose be koncentratorių. Be to, esant daugiacikliam nuovargiui ($N > 10^5$), pasikeičia plyšio atsiradimo vieta: ji pereina į paviršinius sluoksnius, o nuovargio lūžis įgauna tipišką paviršiaus morfologiją, vadinamąją „žuvies akį“ (1.12 pav.) [6, 59–61].

Stebėjimai, atlikti skanuojančiais elektroniniais mikroskopais, parodė, kad „žuvies akies“ morfologija (1.13 a pav.) skiriasi nuo įprasto nuovargio paviršiaus (1.13 b pav.) keliomis ypatybėmis. „Žuvies akies“ centre paprastai yra nemetalinis intarpas (1.12 pav.), jį supa tamsi zona, kuri gali būti iki 50 μm dydžio. Lūžiai su „žuvies akimi“ didelio stiprumo medžiagose susidaro nuo vidinių defektų, kurie dažniausiai yra intarpai, tačiau kai kuriais atvejais gali būti ir vidinės grūdų briaunos. Tuomet irimą lemia mikrostruktūros matricos ypatybės. Defekto dydis ir savybės yra veiksniai, lemiantys „žuvies akies“ lūžio savybes. Nustatyta, kad „žuvies akies“ lūžyje aplink defektus susidaro optiškai tamsios zonos dėl struktūroje esančio vandenilio poveikio. Manoma, kad vandenilis, esantis medžiagoje arti defektų, skatina mikroplyšių atsiradimą.



1.12 pav. „Žuvies akies“ nuotraukos; objektai nuotraukų viduryje yra nemetaliniai intarpai, prie kurių ėmė formuotis nuovargio plyšys; būdinga esant daugiacikliam nuovargiui

Tamsią dalį paprastai supa taisyklingos formos apskritimas I (1.13 a pav.), kurio dydis priklauso nuo defekto gylio, nes plyšiui išplitus iki detalės paviršiaus ir patekus aplinkos orui į šį plyšį (II), tolesnio irimo paviršius pasikeičia ir tampa įprastu esant daugiacikliam nuovargiui (III).



a b

1.13 pav. Nuovargio plyšių susidarymo ypatybės: a) esant „žuvies akies“ reiškiniui, b) kai plyšys atsiranda detalės paviršiuje

Tam tikrais atvejais ši charakteringa lūžio dalis gali būti ir elipsės formos (pavyzdžiui, dėl sluoksniuotumo). Aplinkos poveikis turi įtaką tolesniam irimui. Perėjimas iš „žuvies akies“ zonos į įprastą irimą gerai matomas. Lūžio paviršius (IV) darosi grubesnis dėl pakaitomis vykstančio plyšio plitimo tai maksimalių normalinių įtempimų plokštumoje, tai tangentinių. Tai pasireiškia kvazitrapių irimo vietų atsiradimu. Toliau irimo paviršius dar labiau grubėja (V) ir pereina į tarpkristalinį irimą staigaus suirimo vietoje.

„Žuvies akies“ lūžiai yra būdingi tik gigaciklinio nuovargio ribose, kai ciklų skaičius viršija 10^7 ciklų. Manoma, kad atsparumas nuovargiui, kai apkrovimo ciklų skaičius $N > 10^7$, sumažėja dėl „žuvies akies“ reiškinio, kurio išvengimas aiškiai padidintų medžiagų atsparumą nuovargio plyšių susidarymui ir plitimui. Dauguma metodų, siekiant išvengti „žuvies akies“ reiškinio, yra nukreipti mažinti intarpų kiekį ir dydį, kontroliuojant mikrostruktūrą, naudojant modifikuotą austenizaciją. Šitoks apdorojimas gerokai sumažina tikimybę susidaryti „žuvies akiai“ ir padidina detalių ilgaamžiškumą.

Fraktografiniai tyrimai. Lūžių paviršių tyrimai yra labai svarbūs, nes lūžio paviršiaus charakteris parodo vietines irimo sąlygas siauroje irimo zonoje [62, 63]. Tokiu būdu lūžio struktūra – kristalinė ar pluoštinė – parodo mikroplastinės deformacijos, kuri buvo irimo proceso metu, lygį. Tiriant irimo mechanizmus ir plyšio plitimo kinetiką, galima nustatyti tokias svarbias irimo proceso ypatybes kaip irimo tipas (trapus, plastinis, tarpgrūdelinis ar grūdelinis), santykinį plyšio plitimo greitį, o taip pat šių charakteristikų kitimą vystantis

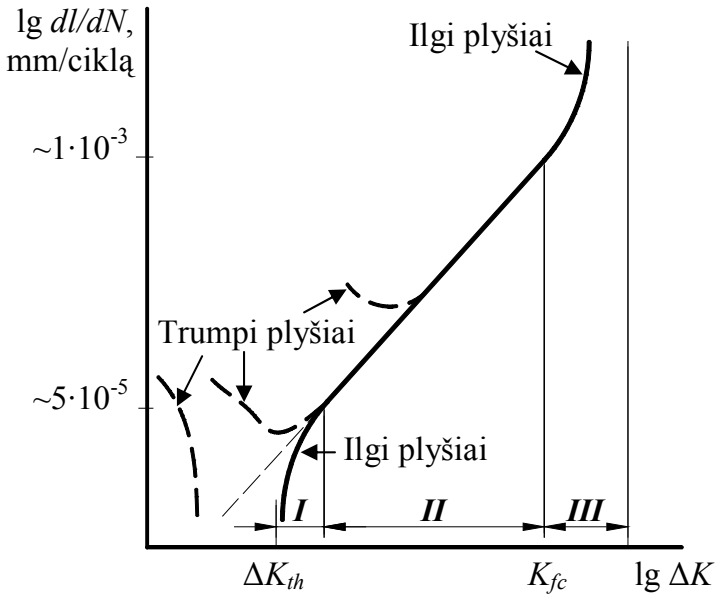
nuovargio plyšiui. Dėl plastiškumo ir plyšio plitimo mechanizmų įvairovės yra išskiriami trapaus ir plastiškojo irimo atvejai. Irimo paviršių tyrimai parodė, kad plyšio frontas plinta ne vien tik tiesia linija, kaip apibrėžia ši irimo mechanika. Makroskopinės kirpimo briaunos taip pat gali būti būdingos nuovargio paviršiui. Jų plotis didėja plyšiui greičiau plintant, galiausiai gali susidaryti II skersinės šlyties atvejis.

Nuovargio plyšiai siauruose ruožuose plinta pagal normalinio atotrūkio mechanizmą, nes tuomet kirpimo briaunos yra mažos. Mikroskopiniai tyrimai rodo, kad paviršius nėra visiškai lygus. Tai greičiau nepastovus paviršius, tai kylantis, tai besileidžiantis ir besikartojantis priklausomai nuo medžiagos ypatybių. Taip pat reikia žinoti, kad plyšio plitimas per ciklą priklauso ne tik nuo medžiagos pasipriešinimo, bet ir nuo išorinio poveikio.

Plyšio plitimas. Plyšio plitimo mechanizmas gali būti įvertintas tiesinės irimo mechanikos metodais. Kartais remiamasi ir netiesine irimo mechanika, darant prielaidą, kad nuovargio plyšys – tai yra lėtai plintantis ikikritinis plyšys. Vienas iš svarbiausių veiksnių, apibūdinančių medžiagos tinkamumą, veikiant ciklinėms apkrovoms, yra atsparumas cikliniam plyšio plitimui. Pagal eksperimentinius bandymo duomenis logaritminėse koordinatėse sudaryta kinetinė nuovargio diagrama apibūdina atsparumą plyšio plitimui ciklinio apkrovimo sąlygomis. Ji parodyta paveiksle 1.14 (įtempimų intensyvumo koeficientas (maksimalus $K_{\max}$ arba jo kitimo intervalas ΔK – plyšio plitimo greitis v). Ištisinė kreivė rodo ilgų plyšių plitimą, punktyrinės – kai kuriuos trumpų plyšių plitimo atvejus. Darbe atlikta analizė [54] parodė, kad trumpi plyšiai gali augti didesniu greičiu nei ilgi plyšiai, įtempimų intensyvumo koeficientui esant mažesniam ir didesniam už ilgų plyšių plyšėjimo slenkstį.

Diagrama pateikia daug informacijos apie plyšio plitimą, pagal ją nustatomi atsparumo plyšio plitimui rodikliai:

- įtempimų intensyvumo koeficiento slenkstis K_{th} arba jo kitimo intervalas ΔK_{th} – nuovargio slenkstis, žemiau kurio plyšys neplinta;
- kritinis įtempimų intensyvumo koeficientas K_{fc} (ciklinis irimo tąsumas), – maksimali reikšmė, kurią pasiekus bandinys suyra;
- plyšio plitimo greitis, kuris gali būti aprašomas P. Periso lygtimi $v = C\cdot(\Delta K)^n$ (lygties parametrai C ir n gaunami pagal bandymo duomenis, taip pat yra atsparumo plyšio plitimui rodikliai);
- įtempimų intensyvumo koeficiento arba jo kitimo intervalo reikšmės, apibūdinančios diagramos tiesiosios dalies pradžią ($K_{1\text{-}2}$, $\Delta K_{1\text{-}2}$) ir pabaigą ($K_{2\text{-}3}$, $\Delta K_{2\text{-}3}$).



1.14 pav. Kinetinė nuovargio diagrama, apimanti trumpų ir ilgų plyšių kinetiką

Bendroji kinetinės nuovargio diagramos, apimančios visas tris jos dalis, išraiška:

$$v = 10^{-7}\left[F(\Delta K)/K*\right]^{n}, \tag{1.18}$$

$$F(\Delta K) = \begin{cases} \Delta K_1 \left(\dfrac{\Delta K - \Delta K_{th}^*}{\Delta K_1 - \Delta K_{th}^*} \right)^{\alpha} & \left(\Delta K_{th}^* < \Delta K < \Delta K_1\right), \\ \Delta K & \left(\Delta K_1 \le \Delta K \le \Delta K_2\right), \\ \Delta K_2 \left(\dfrac{(1-r)K_{fc}^*/\Delta K_2 - 1}{(1-r)K_{fc}^*/\Delta K - 1} \right)^{\beta} & \left(\Delta K_2 < \Delta K \le (1-r)K_{fc}^*\right), \end{cases} \tag{1.19}$$

$$\alpha = 1 - \Delta K_{th}^*/\Delta K_1, \quad \beta = 1 - \Delta K_2/\left[(1-r)K_{fc}^*\right],$$

čia ΔK_1 ir ΔK_2 – diagramos tiesiosios dalies pradžia ir pabaiga; K_{fc}^* – sąlyginis kritinis įtempimų intensyvumo koeficientas; ΔK_{th}^* – fizikinis įtempimų intensyvumo koeficiento slenkstis.

Išskirtieji trys etapai turi savo ypatumų:

I – mažų greičių ($0 < v < 5\cdot10^{-5}$ mm/ciklą),

II – vidutinių greičių ($5\cdot10^{-3}$ m/ciklą $< v < 1\cdot10^{-3}$ mm/ciklą),

III – didelių greičių ($v > 1\cdot10^{-3}$ mm/ciklą).

Iš diagramos gaunami pagrindiniai ciklinio nepažeidžiamumo plyšiams rodikliai:

K_{th} – slenkstinis įtempimų intensyvumo koeficiento dydis, kuriam esant plyšys nedidėja per 10^6 ciklų ir kurio padidėjimas 3 % vyksta labai mažu greičiu (ne didesniu kaip $3\cdot10^{-7}$ mm/ciklą).

K_{fc} – kritinis įtempimų intensyvumo koeficientas, rodantis perėjimą į nestabilų plyšio plitimą, t. y. perėjimą į trapų arba kvazitrapų suirimą.

Irimo mechanikos požiūriu regionas nėra toks akivaizdus. Kol K gali būti nustatytas plyšio viršūnėje, singuliarinis įtempimų laukas bus ir mikroplastiškumas plyšio viršūnėje atsiras. Dėl šios fizinės priežasties atsiranda plyšėjimo slenkstis, žemiau kurio plyšys daugiau nebeauga.

Reikia pažymėti, kad $K_{fc} < K_{1c}$ (K_{1c} – kritinis įtempimų intensyvumo koeficientas). Taip yra todėl, kad artėjant plyšiui, medžiagoje atsiranda mikropažeidimų. Gali būti, kad $K_{fc} = K_{1c}$, jeigu išlaikyti tam tikri reikalavimai.

Yra pasiūlyta daugybė formulių, aprašančių kinetinę nuovargio diagramą [6, 78]. Formulių gausa rodo, kad vis dar nėra rasta vienareikšmio atsakymo į tai, kurie irimo proceso veiksniai turi lemiamą reikšmę nuovargio plyšių kinetikai ir kuriuos būtina įvertinti. Ankstesniuose darbuose (Šanlejaus, Forsto, Irwino, Liu, Veibulo, Dagdeilo ir kt.) plyšio plitimo greitį buvo siūloma sieti su įtempimais per įvairias išraiškas (σ_a, σ_{net}, σ_{max}, $\Delta\sigma$). Iš jų paminėtina Liu formulė, sukurta 1963 m.:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta\sigma)^2 a\,. \tag{1.20}$$

Po šešiasdešimtųjų imta plačiai taikyti įtempimų intensyvumo koeficientą aprašant plyšio plitimo greitį (Periso, Gomezo, Boetnerio, Krafto, McEvilio, Formeno bei kt.). Formulėse yra nuo keturių iki aštuonių eksperimentiškai nustatomų parametrų. Iš jų paminėtina Erdogano, Ratvanio formulė:

$$\frac{dl}{dN} = A(1-r)^q \frac{(K_{Imax} - K_{th})^m}{K_{Ic} - K_{max}}\,. \tag{1.21}$$

McEvilio:

$$\frac{dl}{dN} = A(1-r)^2 \frac{K_{I\max}^2 - K_{th}}{K_{Ic} - K_{I\max}}\left(K_{fc} - rK_{I\max}\right), \tag{1.22}$$

čia $K_{I\max} = dK_{I\max} / dt$ A

Doverio:

$$\frac{dl}{dN} = A(1-r)^{s+r-q} K_{I\max}^{s} \frac{\left(K_{I\max} - K_{th}\right)^{q}}{\left(K_{fc} - K_{I\max}\right)^{r}}. \tag{1.23}$$

Nemaža dalis formulių yra simetriškos vidurio taško atžvilgiu. Paminėtina Kolipristo, Deiviso ir Federseno:

$$\frac{dl}{dN} = \left(\frac{dl}{dN}\right)_0 lg^{q}\left[(1-r)\frac{K_{I\max}}{K_{th}}\right] lg^{-q}\left[\frac{K_{fc}}{(1-r)K_{I\max}}\right] . \tag{1.24}$$

Jaremos, Mikitišino:

$$\frac{dl}{dN} = \left(\frac{dl}{dN}\right)_0 \left[\frac{K_{I\max} - K_{th}}{\left(K_{fc} - K_{I\max}\right)}\right]^{q}. \tag{1.25}$$

Be to, nemažą dalį formulių galima laikyti kaip atskirus bendros išraiškos atvejus (esant nulinei ciklo asimetrijai), kurią pasiūlė Jarema:

$$\frac{dl}{dN} = AK_{I\max}^{s}\left(K_{I\max}^{m} - K_{th}^{m}\right)^{q} / \left(K_{fc}^{n} - K_{I\max}^{n}\right)^{p}. \tag{1.26}$$

Pastaruoju metu taikomos Periso ir Formeno formulės. Norint įvertinti ciklo asimetriją plačiai taikoma Formeno formulė:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{c(\Delta K)^{n}}{(1-r)(K_{Ic} - K_{\max})}. \tag{1.27}$$

Norint padidinti skaičiavimo tikslumą, arba kai Periso formulės taikyti negalima, imamos kitos priklausomybės. Atlikta analizė rodo, kad sudėtingi reiškiniai pasitaiko tik retais specifiniais atvejais. Pavyzdžiui, darbe [40] srieginių jungčių plyšio plitimo greitis išreiškiamas pagal Robertso ir Erdogano formulę:

$$\frac{dl}{dN} = B_V \left(1 + \frac{\sigma_{mt}}{\sigma_a}\right)^{\beta_1} (\Delta K)^{\beta_2}, \tag{1.28}$$

čia B_v, β_1, β_2 – parametrai, priklausantys nuo medžiagos.

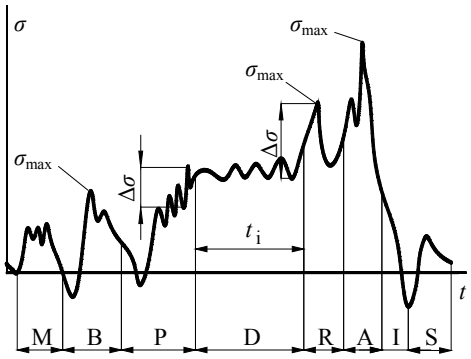
Lygybių 1.10–1.28 parametrai *A, B, m, n, q, r, sd,* v_0 nustatomi pagal eksperimentinius duomenis.

Plyšio greičiui aprašyti įvairiuose konstrukcijos elementuose, kai plyšio frontas sudėtingas ir jo plitimui didelę įtaką turi išorinės sąlygos, taikomi netiesinės irimo mechanikos kriterijai, tokie kaip *J*-integralas, plyšio atsivėrimas, deformacijų intensyvumo koeficientas ir kiti.

1.5. Ketaus ciklinio atsparumo analizė ir problemos

Nuovargio problemas galima suskirstyti į tris grupes: 1) projektavimo, 2) darbingumo prognozavimo ir 3) apkrovimo, kurį patiria konstrukcijų elementai eksploatacijos metu. Kiekviena iš problemų apima nemažai konkrečių klausimų, kurie savo ruožtu taip pat gali būti suskirstyti į smulkesnius aspektus. Tačiau visas problemos sprendimas gali būti labai sudėtingas ir priklausyti nuo konstrukcijos formos, medžiagos tipo, gamybos procesų įtakos, apkrovimo spektro ir aplinkos. Nuovargio reiškinio fizikos supratimas yra esminis numatant cikliškai apkraunamų elementų ilgaamžiškumą.

Išorinio apkrovimo sąlygos, pavyzdžiui, paleidimas ir stabdymas bei kitos yra nestacionarios laiko, temperatūros, jėgų ir poslinkių atžvilgiu. 1.15 paveiksle parodytas apkrovimo parametrų, veikiančių konstrukcijas eksploatacijos metu, kitimas. Apkrovimo parametrai yra: mechaninė, elektromagnetinė, inercinė apkrovos *F*, slėgis *p*, temperatūra *T*, kurie sukelia įtempimus σ (σ_{max}, σ_{min}) arba deformacijas ε. Visą konstrukcijos darbo laiką galima suskirstyti į tokius etapus: montavimo, bandymų (ciklų skaičius 10^0–10^1), paleidimo eksploatacijon, galios reguliavimo ir stabdymo (ciklų skaičius 10^2–10^3), technologinius, reguliavimo, vibracijų, vietinių pulsacijų, stacionaraus eksploatacinio darbo režimo (ciklų skaičius 10^4-10^{12}), avarinius (skaičius ciklų 10^0-10^1)[21]. Kiekvieno etapo metu apkrovimo parametrų reikšmės kinta skirtingai. Stacionariais darbo režimais dirbančiose konstrukcijose nominalūs įtempimai neviršija takumo ribos ir dažniausiai būna mažesni už proporcingumo ribą, t. y. $\sigma << \sigma_{pr}$ (vibracijų lygio stacionarūs darbo režimai). Avariniais atvejais įtempimai gali viršyti takumo ir stiprumo ribas. Tuomet gali vykti dinaminis, statinis arba kvazistatinis irimas. Mažėjant ciklinio apkrovimo parametrų reikšmėms, didėja nuovargio laikas.



1.15 pav. Eksploatacinio apkrovimo schema: M – montavimas, B – bandymai, P – paleidimas, D – stacionarus režimas, R – reguliavimas, A – avarija, I – išjungimas, S – sustabdymas

Lietos ketaus detalės nepasižymi dideliu atsparumu cikliniam poveikiui. Tam turi įtaką struktūros defektai, tam tikros formos laisvo grafito intarpai, o taip pat gana didelis matricos trapumas (didelis cementito kiekis). Medžiagos, iš kurių gaminami konstrukcijų elementai, nėra idealios. Jos turi aibes defektų, atsirandančių įvairiose gamybos stadijose ir eksploatacijos metu. Pagrindiniai defektai klasifikuojami į gamybos, konstrukcijos gamybos bei eksploatacijos. Įvairūs dariniai, tarp jų kristalinės gardelės ydos, plyšiai, mikroporos, tuštumos, intarpai ir panašūs dariniai sumažina medžiagos stiprumą [64–66]. Svarbu nustatyti tokių defektų įtaką kaip svarbų veiksnį nuovarginiame procese. Defektai taip pat apsunkina konstrukcijos elemento stiprumo skaičiavimą.

Menkas ketaus plastiškumas tempiant, leidžia nagrinėti ketaus irimą kaip atsparumą atplėšimui. Kai kurie ketaus gniuždymo rodikliai gerokai skiriasi nuo tempimo. Jie yra beveik tris kartus didesni nei tempiant ir tai labai apsunkina ciklinio pažeidžiamumo įvertinimą. Struktūra po terminio apdorojimo (perlitinis, austenitinis ir feritinis ketus) keičia atsparumą cikliniam poveikiui. Nustatyta, kad esant smulkesniam perlitui, gerokai išauga jo atsparumas. Ketaus struktūros defektai yra skirstomi į tris pagrindines grupes: 1) anomalijos dėl stingimo procesų, 2) anomalijos, susidarančios keičiantis gaminio temperatūrai sukietėjus ir terminio apdorojimo metu, ir 3) kitas anomalijas.

Pageidaujama struktūra liejimo procese priklauso nuo kelių esminių veiksnių. Pirma, nuo rutulinio grafito susidarymą lemiančių priedų, tokių kaip magnis (Mg), dėl kurio susidaro rutulinės formos grafitas, skaičiaus ir kiekio. Jeigu įvestas nepakankamas Mg kiekis, arba metalas išlydytoje būsenoje yra išlaikomas ilgesnį laiką (po Mg įdėjimo), grafitas neįgaus rutulinės formos. Gali susidaryti ir įvairios kitokio tipo grafito formos. Priedai taip pat pagerina grafito išsiskyrimą, užkirsdami kelią pirminių karbidų gamybai. Pirminiai karbidai blogina mechanines savybes, ypač plastiškumą.

Ketus gali sudaryti pirminius karbidus ir aušinimo metu, nes grafitas, būdamas rutulio formos, turi mažiausią plotą. Ribotai galimas paviršiaus plotas laisvam grafitui susidaryti padidina karbidų kiekį. Pagrindinis elementas, dedamas grafito formai užtikrinti, yra Mg, žinomas kaip karbidų stabilizavimo priemonė. Chromas yra ypač linkęs formuoti stabilius pirminius karbidus, kurie sunkiai pašalinami terminio apdorojimo procesais. Karbidų susidarymą taip pat sukelia vandenilis. Struktūros, turinčios dribsnių pavidalo grafitą, gali susidaryti kaip paviršiaus reakcijos su smėliu arba siera pasekmė. Tam turi įtakos didelis teršalų kiekis ir / arba mažas Mg kiekis.

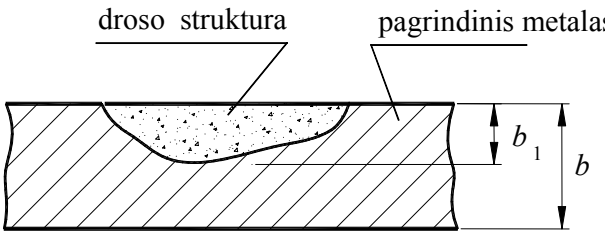
Magnis yra labai aktyvus elementas. Todėl stiprusis ketus turi tendenciją formuoti šlaką. Reakcijos produktai dažnai vadinami „dross“ (angl. „dross“ – nuodegos, šlakas, toliau tekste bus vadinamas drosu). Drosas yra Mg reakcijos su deguonimi pasekmė.

Drosas dažniausiai atsiranda dėl blogos šlako išvengimo procedūros. Droso struktūros taip pat gali atsirasti net jeigu liejimo metu išvengiama šlako. Mg gali reaguoti su aplinkos oru, išlydytam metalui turbulentiškai tekant. Ši reakcija gali sudaryti šlaką net liejimo formoje. Drosas taip pat gali susidaryti, kai liejama „per šaltai“. Kartais drosas siejamas su nevisai arba visai neištirpusiais priedais.

Normalizuojant ar atleidžiant ketų, bandinius reikia įkaitinti iki pakankamai aukštos temperatūros, kad būtų gauta austenitinė struktūra. Todėl austenitas pakeičiamas perlito ir ferito mišiniu. Tačiau feritas arba perlitas, išlikęs įkaitinimo metu, išlieka ir po ataušinimo. Netransformuota matrica paprastai įgauna neįprastą išvaizdą. Terminio apdorojimo metu gali susidaryti baltos spalvos dariniai – liekamasis austenitas.

Kai ketūs yra hipereutektiniai, austenizavimo temperatūra gali paveikti anglies kiekį ištirpusiame austenite. Kai temperatūra pakyla virš eutektoidinės reakcijos, ištirpusios anglies kiekis austenite didėja. Ketaus grūdinimo metu dalis labiau įanglinto austenito lieka, palikdamas mišrią martensito ir didelio angliškumo austenito struktūrą. Norint išvengti liekamojo austenito atsiradimo užgrūdintose martensitinėse ketaus struktūrose, temperatūra, nuo kurios ketus grūdinamas, turėtų būti iš karto po eutektoidinės ribos. Tačiau šios temperatūros svyruoja, ir tai priklauso nuo Si kiekio. Nikelis taip pat stabilizuoja austenitą.

Nuovargio procesas lietose medžiagose iš esmės priklauso nuo liejimo defektų, tokių kaip mikroįtrūkimai, droso defektai ir kt. 1.16 paveiksle parodyta liejinio sienelė, kurioje liko neaiški terpė, sudaryta iš šlako ir pagrindinio metalo. Didelio gabarito detalėse tokių lokalizuotų tūrių gali būti keletas.



1.16 pav. Specialiojo sluoksnio pasiskirstymas liejinio sienelėje

Pateikta apžvalga ir eksploataciniai lūžimai rodo, kad didelio gabarito detalėse liejimo proceso metu įvairiuose tūriuose susidaro neaiškūs dariniai (šlako ir pagrindinio metalo mišinys), o terminio apdorojimo procese ne visuose tūriuose įvyksta struktūros pokytis. Mechaninio būvio nevienodumo įtakos daugiacikliam apkrovimui tyrimas sudaro tolimesnį darbo tikslą.

1.6. Skyriaus išvados

Išnagrinėjus literatūrą galima teigti, kad:

1. Duomenys apie stipriojo sluoksniuotojo ketaus daugiaciklį ir hiperciklį nuovargį yra nepakankami ir neleidžia patikimai numatyti didelio gabarito konstrukcijų darbo ilgaamžiškumo.
2. Nepakankamai aiškus įvairių veiksnių poveikis stipriojo sluoksniuotojo ketaus atsparumui daugiaciklio apkrovimo srityje.
3. Didelio gabarito ketaus liejinių gamybos procese neišvengiama įvairių defektų, ir mechaninio būvio nevienodumo, kurių įtaka daugiaciklio nuovargio irimui dabartiniais skaičiavimo metodais sunku įvertinti.
4. Atsparumas daugiacikliam apkrovimui nagrinėjamas įvairiais aspektais pasitelkiant nuovargio teorijas ir tiesinės irimo mechanikos dėsningumus.
5. Eksperimentiniai bandymai yra svarbūs tiriant daugiaciklį irimą ir reglamentuojami nustatant kritines irimo kriterijų rodiklių reikšmes, kurios naudojamos projektiniame skaičiavime.

2. EKSPERIMENTINIO TYRIMO PRIEMONĖS IR METODAI

Norint nustatyti tiriamų ketų statinio bei ciklinio irimo rodiklius buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai. Tam panaudoti dvejopos formos bandiniai, specialiais įtaisais įtvirtinti bandymo mašinoje, iki suirimo apkrauti tempimu arba lenkimu. Ciklinių bandymų metu buvo matuojamas atsiradusio nuovargio plyšio gylis tam tikru periodiškumu. Pagal matavimų rezultatus sudaromos plyšio plitimo greičio kreivės suteikia informaciją apie plyšio plitimą. Šie duomenys panaudojami skaičiuojant irimo rodiklius, kurie apibūdina medžiagos būvį irimo proceso metu zonoje arti plyšio viršūnės. Dydžiai, nusakantys kinetinę nuovargio diagramą, yra kiekybiniai ciklinio pasipriešinimo irimui rodikliai. Taikomąja prasme plyšio plitimo greičio priklausomybė nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo kartu su kitais medžiagos savybių rodikliais naudojama analizuojant įvairių veiksnių įtaką, lyginant medžiagas ir tobulinant gamybos procesą bei medžiagos savybes. Pagal jas įvertinamos medžiagos darbingumo savybės konkretiems panaudojimo tikslams.

2.1. Bandymų metodika

Bandiniai. Pusiau natūriniai ketaus su specialiuoju sluoksniu stačiakampio skerspjūvio bandiniai paruošti Vokietijos kompanijos Siempelkamp liejykloje. Specialųjį sluoksnį sudaro neaiškus pagrindinio metalo ir šlako darinys (angl. dross). Bandinių matmenys: plotis 63 mm, storis 33 mm, ilgis 244 mm, specialiojo sluoksnio storis 10 ... 11 mm.

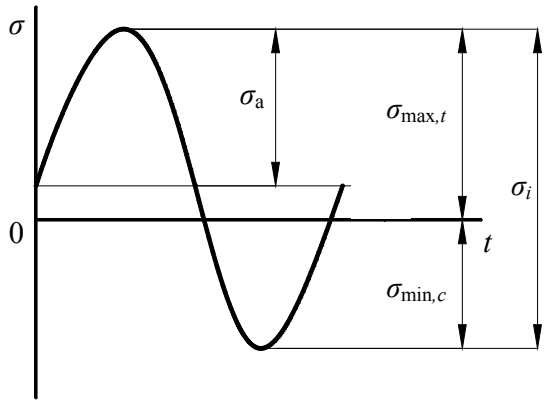
Plyšėjimo rodikliams (ribinis įtempimų intensyvumo koeficientas) nustatyti panaudoti necentrinio tempimo kompaktiniai bandiniai (CT specimens). Dvi plokštės iš ketaus GI (JAV liejykla „Hodge“) ir dvi plokštės iš ketaus SGI (Australijos liejykla „J&E Hofmann Engineering Ltd.“) parinktos taip, kad atitiktų realių detalių mechaninį būvį, gaunamą gamybos procese. Iš dviejų lietų plokščių ir iš dviejų termiškai apdorotų plokščių buvo gaminami kompaktiniai bandiniai (W = 50 mm ir B = 25 mm).

Iš pusiau natūrinių bandinių pagrindinio metalo ir specialiojo sluoksnio taip pat pagaminti kompaktiniai bandiniai, kurių matmenys (W = 42 mm ir B = 10,5 mm).

Statinių mechaninių savybių rodiklių nustatymui panaudoti cilindriniai tempimo bandiniai. Jų forma, išbandymo ir skaičiavimo metodika reglamentuojama standartais EN 10 002.

Šiame darbe eksperimentiniai bandymai nustatant plyšėjimo slenkstį, aprašyti standartais ASTM E 647-00, E1681-95 [68–69].

Apkrovimo programa. Eksperimentiniai pusiau natūrinių bandymų tyrimai atlikti esant neigiamam asimetriniam apkrovimų ciklui. Ciklas atitiko realių konstrukcijų apkrovimą, ciklo asimetrijos koeficientas r = - 0,62. Apkrovimo ciklas ir jį sudarantys parametrai parodyti 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Asimetrinis apkrovimo ciklas

Pagrindinės deformavimo ciklo charakteristikos: $\sigma_{\max,t}$ – maksimalūs ciklo įtempimai, $\sigma_{\min,c}$ – minimalūs ciklo įtempimai, σ_i – įtempimų kitimo intervalas: $\sigma_i = \sigma_{\max,t} - \sigma_{\min,c}$, σ_a – įtempimų kitimo amplitudė: $\sigma_a = \dfrac{\sigma_{\max,t} - \sigma_{\min,c}}{2}$.

Ciklo asimetrijos koeficientas: $r = \dfrac{\sigma_{\min,c}}{\sigma_{\max,t}}$.

Bandiniai buvo apkraunami grynuoju lenkimu (keturių taškų apkrovimo schema), kai darbinio ruožo ilgis 94 mm. Esant šiai apkrovimo schemai, didžiausi įtempimai ir deformacijos kyla viršutinėse bandinio plokštumose. Apkrovimas grynuoju lenkimu pasižymi įtempimų vienalytiškumu bandomajame ilgyje.

Pusiau natūrinių bandinių apkrovimo programa parinkta taip, kad prie plyšėjimo slenksčio artėjama iš apačios t. y. įtempimų kitimo intervalas palaipsniui didinamas pradedant nuo $\Delta\sigma = 69$ MPa. Ciklų skaičius atskirose programos dalyse koreguojamas bandymo metu priklausomai nuo matavimo rezultatų.

Kompaktiniai bandiniai išbandyti, kai ciklo asimetrijos koeficientas $r \approx 0$ pagal reglamentuojamą bandymo metodiką.

Necentriškai tempiamų kompaktinių bandinių plyšėjimo slenksčio nustatymo procedūra.

Plyšėjimo slenksčio nustatymo bandymas vykdomas mažinant apkrovą taip, kad jėgos pokytis neviršytų 10 %, o minimalus plyšio gylio prieaugis būtų didesnis nei 0,5 mm, kaip reikalauja standartas ASTM E 647-00. Apkrova mažinama tolygiai žingsniais, išlaikant sąlygą kad *K*-gradientas $C = \frac{1}{k} \cdot \frac{dk}{da}$ tenkintų standarto sąlygą $C > -0{,}08$ mm^{-1}. Priartėjus prie plyšėjimo slenksčio, kai jėgos pokyčiai tampa labai maži, matuojami plyšio gylio pokyčiai buvo 0,1-0,2 mm didumo. Veikiant pakankamai mažoms jėgoms toks pokytis įvyksta per $(1{,}5 \div 2{,}5) \cdot 10^6$ ciklų. Mažiausia jėga, kuriai veikiant plyšio gylio prieaugis pasidaro nebepastebimas (plyšys nebepaauga per $(1{,}0 \div 2{,}5) \cdot 10^6$ ciklų, naudojama sąlyginiam plyšėjimo slenksčiui skaičiuoti. Tokiu būdu plyšio greičiui skaičiuoti sąlyginai imama 0,01 mm plyšio gylio prieaugio reikšmė. Pradinio plyšio užauginimas vykdomas prie apkrovų, kada plyšio plitimo gretis tapdavo artimas 10^{-8} m/ciklą greičiui. Paprastai plyšėjimo slenksčio reikšmė nustatoma, kada plyšio plitimo greitis artėja prie 10^{-10} m/ciklą.

Šiame tyrime analizuojamos plyšėjimo slenksčio reikšmės artimos 10^{-12} m/ciklą greičiui. Visa vieno bandinio bandymo trukmė sudarydavo $(25 \div 30) \cdot 10^6$ apkrovimo ciklų.

Plyšio gylis kompaktinio bandinio šonuose matuojamas optiniu būdu, naudojant mikroskopą, kurio padalos vertė 0,02 mm. Panaudojant plyšio gylio reikšmes ir nuovargio plyšio kontūrą lūžyje, atliekama plyšio gylio korekcija, kuri įvertina plyšio kontūro netiesiškumą. Galutinė plyšio gylio reikšmė yra trijų matavimų, atliekamų pagal plyšio kontūrą, vidurkis.

Plyšio plitimo greitis skaičiuojamas naudojant liestinę parabolės formos *a*-*N* kreivei, aprašančiai eksperimentinius duomenis ir gautus intervaluose prie pastovios apkrovos.

Arti plyšėjimo slenksčio plyšio gylio prieaugis prie pastovios jėgos neviršydavo $\Delta a = 0{,}5$-$1{,}0$ mm, buvo nustatoma vidutinė plyšio plitimo greičio reikšmė $\frac{\Delta a_i}{\Delta N_i}$ kiekvienam išmatuotam plyšio prieauglio intervalui Δa_i ir plyšio plitimo paaugimui ribose nuo 0,1 iki 0,2 mm.

Specialūs bandymai atliekami siekiant konkrečių tikslų, pavyzdžiui, norint patikrinti kai kurių veiksnių įtaką. Kadangi daugelio veiksnių poveikis vis dar nėra gerai žinomas, buvo atliekami specialūs bandymai, norint kuo tiksliau atkartoti realias konstrukcijų elementų darbo sąlygas, bei stebėti plyšio atsiradimą ir plitimą.

2.2. Bandymų įranga

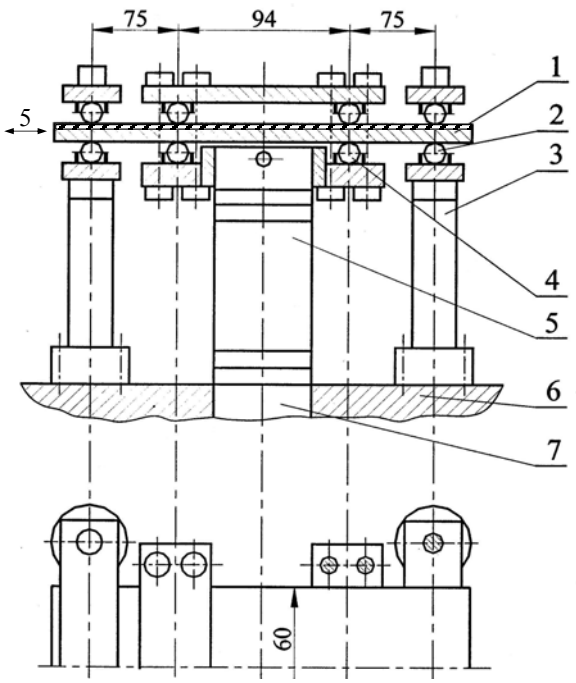
Eksperimentiniai tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų atsparumo katedros Stiprumo mechanikos laboratorijoje su ciklinio apkrovimo mašinomis URS-20/6000 ir URS-50/50. Paveiksle 2.2 parodyta kompaktinio bandinio apkrovimo sistema, atitinkanti reglamentuojamą metodiką. Sistemą sudaro apkrovimo sužadinimo dalis ir valdymas. Pagal [6] laikoma, kad apkrovimo dažnis iki 30 Hz neturi įtakos patvarumui. Viršijus šį dydį reikia įvertinti patvarumo ribos sumažėjimą. Bandymai buvo atlikti 15–20 Hz dažniu.



2.2 pav. Ciklinių bandymų mašina URS-20/6000 ir CT bandinio apkrovimas

Paveiksle 2.3 parodyta pusiau natūrinių bandinių įtvirtinimo schema. Įtaisas pagamintas taip, kad galima bandyti vieną arba du bandinius vienu metu. Šiuo atveju du bandiniai (grandinėlės principu) išbandyti identiškose apkrovimo sąlygose. Įtaisą sudaro nejudančios (2) ir judančios (4) atramos. Nejudančios atramos laiko bandinio galus. Judanti atrama, sujungta su hidrauliniu cilindru, perduoda apkrovimą, kuris per tvirtinimo sistemą sukelia grynąjį lenkimą. Iš paveikslo matosi, kad bandinio darbinė dalis yra 94 mm. Norint išvengti jėgų pridėjimo vietos (šlyties ir sąlyčio įtempimų) įtakos bandymų rezultatams, bandiniai perstumiami išilgine kryptimi 5 mm intervalu.

Bandymo mašina derinama pagal apkrovimo ciklą. Skaičiuojamoji jėga nustatoma pagal maksimalius (tempimo) ir minimalius (gniuždymo) įtempimus. Jėgos dydis kontroliuojamas dinamometru 1 % tikslumu. Periodiškai veikiant bandymo mašinai tikrinami apkrovimo ciklo parametrai oscilografo ekrane ir valdymo pulto pagalba. Bandymai atlikti kambario temperatūroje 20^{+10}_{-5} ºC. Plyšio gylis matuotas mikroskopu МИК-1 (x25-50). Siekiant patikslinti plyšio fronto formą pritaikyti ultragarsinis, magnetinis liuminescencinis ir dažų pėdsakų metodai. Struktūrų nuotraukos darytos VGTU ir universiteto partnerių Suomijos Karkilla laboratorijoje. Lūžių analizei skanuojančiu elektroniniu mikroskopu (angl. – *SEM*) fotografuota Mančesterio universiteto laboratorijoje.



2.3 pav. Grynuoju lenkimu apkrauto bandinio tvirtinimo ir deformavimo įtaisas:
1 – bandinys, 2 – nejudamos atramos, 3 – kolonos, 4 – judamos atramos,
5 – dinamometras, 6 – bandymo mašinos stalas, 7 – jėgos hidrocilindras

Pateikta pusiau natūrinių ir standartinių bandinių išbandymo metodika yra originali. Visų pirma bandiniai imituoja realių konstrukcijų elementų mechaninį būvį, kuris susidaro po liejimo ir terminio apdorojimo procesų. Pusiau natūrinių bandinių apkrovimo programa atitinka realių konstrukcijų apkrovimą. Bandymo įranga leidžia bandinį perstumti išilgai ašies (išvengiama šlyties ir sąlyčio įtempimų jėgos pridėjimo vietose), leidžia atlikti plyšio matavimus bandomojoje dalyje sustabdžius bandymo mašiną. Matavimas gali būti atliktas neišimant bandinio iš įtaiso arba nuimant bandinį.

Kompaktiniai bandiniai išbandomi pagal reglamentuojamą metodiką. Tačiau norint pritaikyti ribinį įtempimų intensyvumo koeficientą ΔK_{th} projektiniam ilgaamžiškumui 25 ... 50 metų užtikrinti bandymo metodika pakeista. ΔK_{th} nustatymui plyšio plitimo greitis mažinamas iki 10^{-12} m/ciklą (standartai numato 10^{-10} m/ciklą). Numatyti plyšio gylio (įvairiais metodais) matavimai priklausomai nuo ciklų skaičiaus baigiamoje stabdymo stadijoje.

2.3. Skyriaus išvados

1. Siekiant geriau atkartoti realių konstrukcijų mechaninį būvį, susidarantį liejimo ir terminio apdorojimo procese, buvo atliekami pusiau natūriniai bandymai.
2. Norint atkurti realias darbo sąlygas, pusiau natūrinių bandinių apkrovimo programa parinkta taip, kad prie plyšėjimo slenksčio buvo artėjama iš apačios, o susidarius plyšiui, jo plitimas kontroliuotas iki visiško bandinio suirimo.
3. Siekiant išvengti šlyties ir sąlyčio įtempimų jėgos pridėjimo vietose, bandinio tvirtinimo įtaisas pagamintas taip, kad leido pusiau natūrinius bandinius perstumti išilgai ašies.
4. Plyšio plitimo matavimams taikyti neardančios kontrolės metodai – optinis, ultragarsinis, magnetinis liuminescencinis bei dažų – leido išmatuoti plyšio matmenis, kurie dar papildomai po bandymo pagal plyšio fronto pėdsakus buvo tikslinami mikroskopu.
5. Norint taikyti plyšėjimo slenksčio įtempimų intensyvumo koeficientą dideliam ilgaamžiškumui skaičiuoti, bandymo metodika pakeista plyšio plitimo greitį mažinant iki 10^{-12} m/ciklą, užtikrinus plyšio fiksavimą priklausomai nuo ciklų skaičiaus.

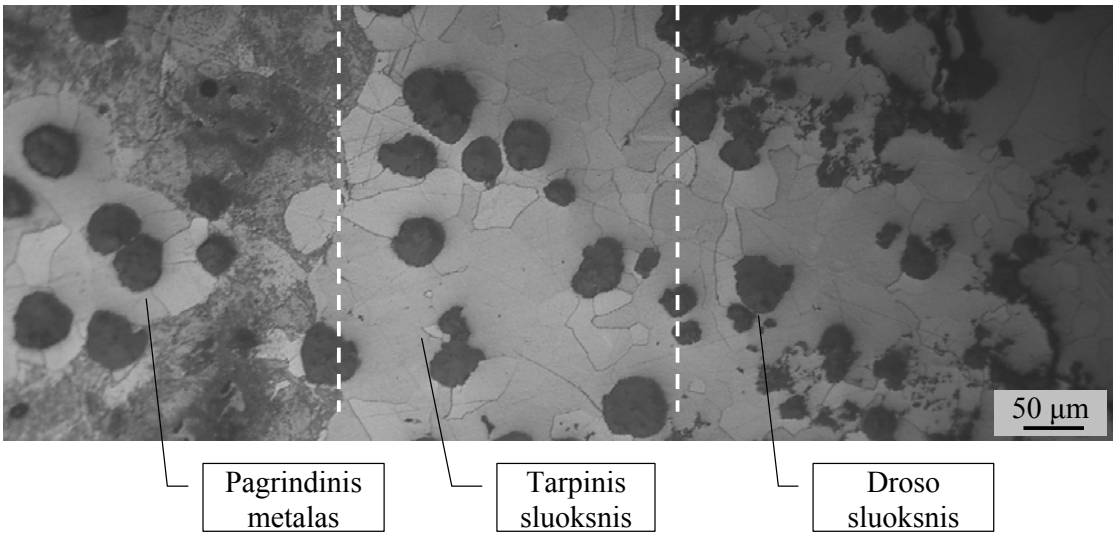
3. SLUOKSNIUOTUMO, GAUTO LIEJANT, ĮTAKOS PLYŠIO SUSIDARYMUI IR PLITIMUI TYRIMAS

Šis skyrius skirtas stipriojo ketaus su specialiuoju sluoksniu, imituojančiu liejimo proceso netobulumus, tyrimui. Pateikti duomenys apie tiriamo ketaus statines mechanines savybes, struktūrą, eksperimentinių tyrimų atlikimą. Analizuojami eksperimentinių tyrimų rezultatai, skaičiuojami plyšių plitimą nusakančių kriterijų rodikliai bei analizuojamas plyšio plitimas per skirtingų savybių sluoksnius. Pateikti siūlymai praktiniams didelių gabaritų konstrukcinių elementų iš stipriojo ketaus su liejimo defektais skaičiavimams [103-107].

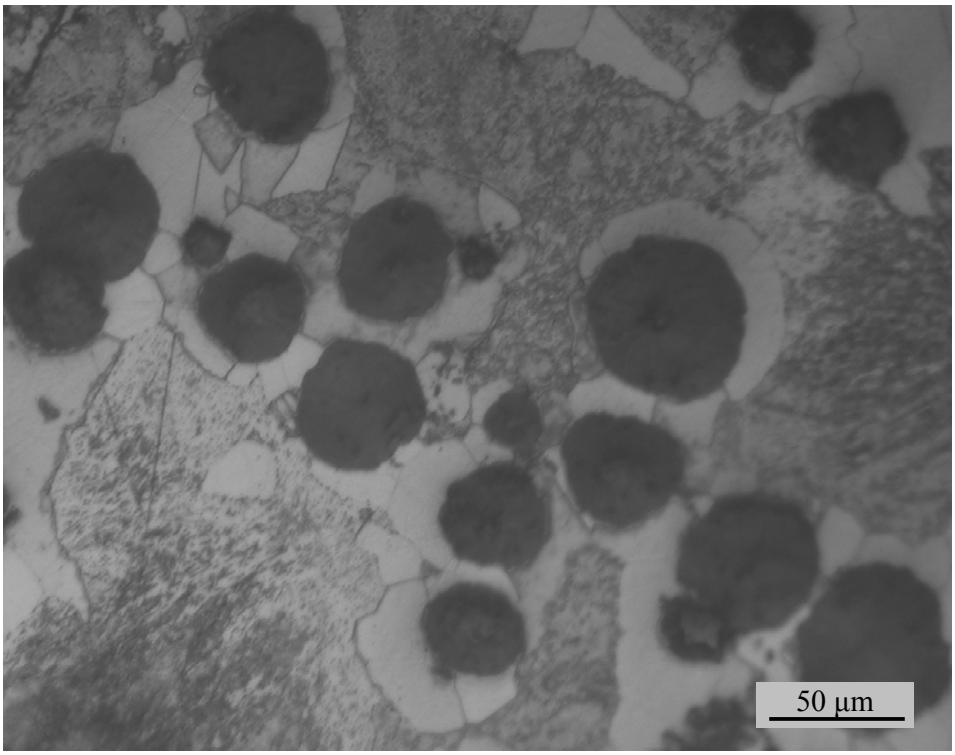
3.1. Struktūra ir mechaninės savybės

Eksperimentiniams bandymams paruošti bandiniai išpjauti iš didesnio luito taip, kad juose esantis droso sluoksnis išsidėstė vienoje bandinių pusėje ir jo storis sudarė 10-11 mm. Iš šių bandinių atpjautos atskiros dalys struktūros ir mechaninių savybių tyrimui.

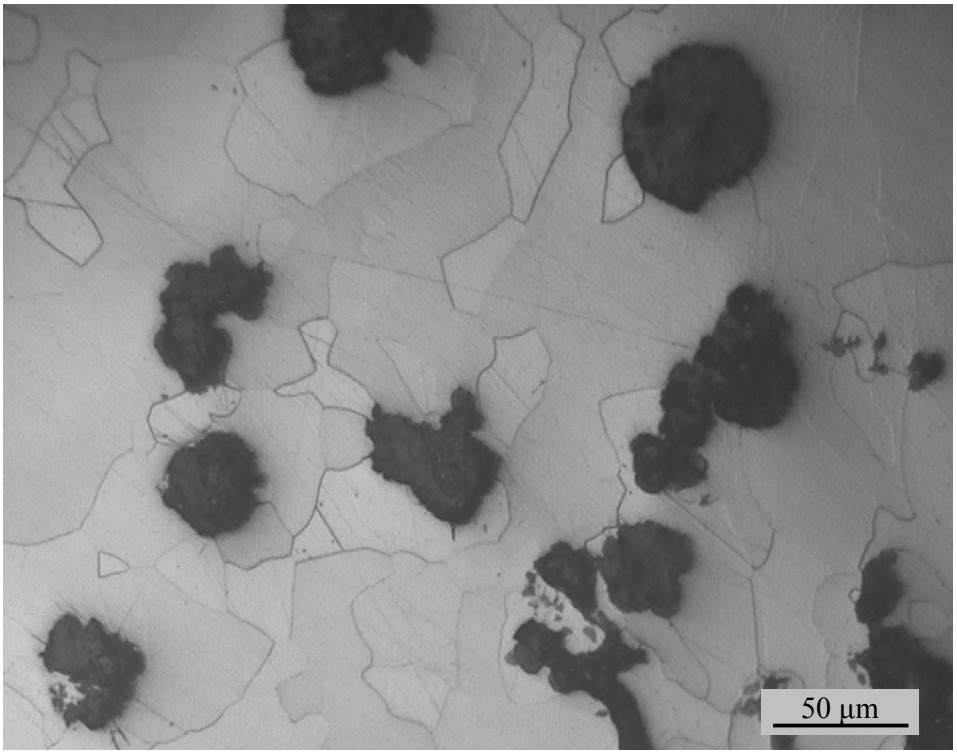
Tiriamo ketaus struktūros parodytos 3.1–3.4 pav. 3.1 paveiksle parodyta, kaip kinta struktūra tiriamajame ketuje. Pagrindinio metalo struktūra – 3.2 paveiksle. Grafitas rutuliukų formos, apsuptas ferito, aplinkui išsidėsto perlitas. Pereinamojo sluoksnio struktūrą matome 3.3 pav. Ją sudaro dribsnių pavidalo grafitas. Perlito mažiau: jis tik pavienis. Struktūros matrica – feritas. Droso sluoksnio struktūrą (3.4 pav.) sudaro plokštelių pavidalo grafitas, pasitaiko grafito dribsnių, karbidinių intarpų ir neaiškių darinių.



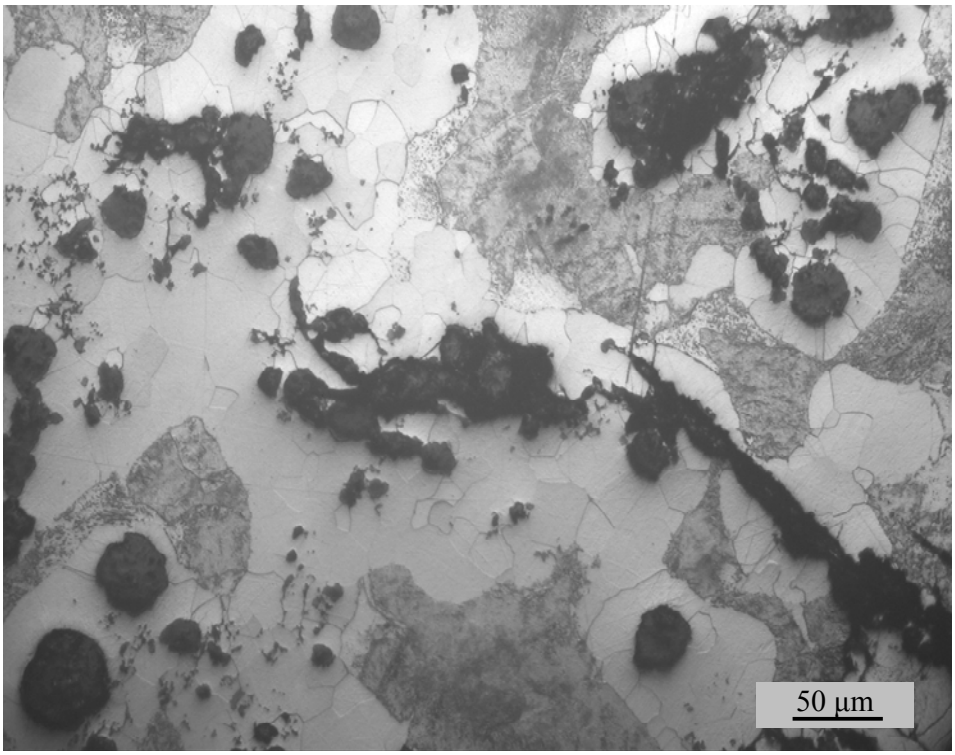
3.1 pav. Įvairių sluoksnių struktūrų palyginimas



3.2 pav. Pagrindinio metalo struktūra



3.3 pav. Tarpinio sluoksnio struktūra



3.4 pav. Droso sluoksnio struktūra

Iš atskirų sluoksnių pagaminus po tris cilindrinius ($d = 10$ mm) tempimo bandinius, nustatyti statinių mechaninių savybių rodikliai pateikti 3.1 lentelėje.

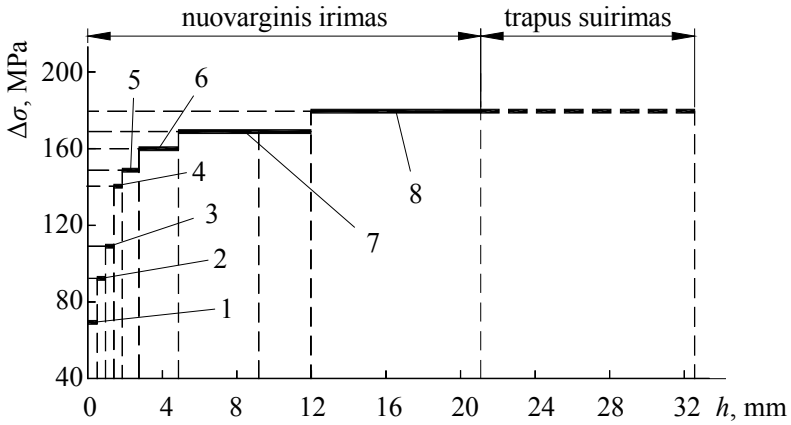
3.1 lentelė. Mechaninių savybių rodikliai

Pagrindinis metalas			
R_{pr}, MPa	223	223	238
$R_{p0,2}$, MPa	323	327	334
R_m, MPa	523	484	515
E, GPa	180	173	178
A, %	4,6	3,6	3,3
Z, %	6,5	5,0	5,0
Droso sluoksnis			
R_{pr}, MPa	150	142	157
$R_{p0,2}$, MPa	240	214	209
R_m, MPa	218	223	233
E, GPa	148	142	144
A, %	<1	<1	<1
Z, %	<1	<1	<1

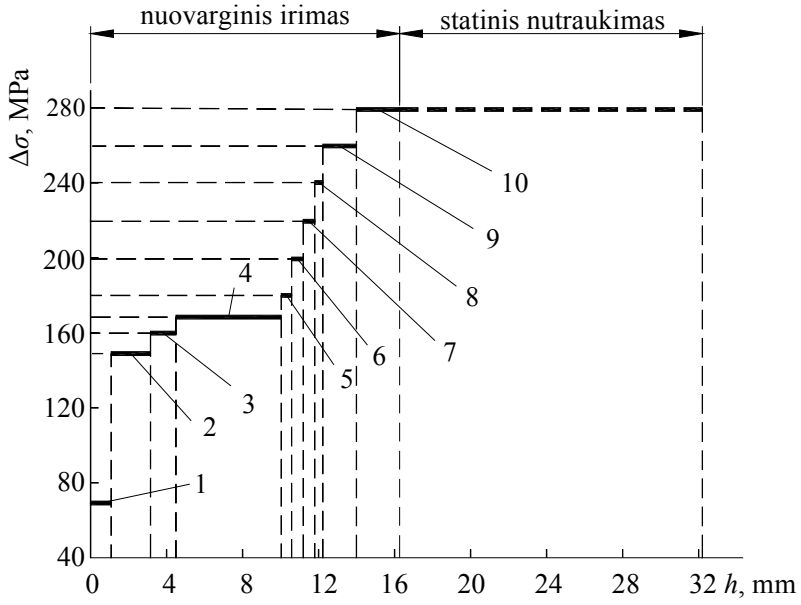
Matome, kad droso sluoksnio stiprumas 2 kartus mažesnis už pagrindinio metalo ir žymiai mažesnis plastiškumas. Pereinamojo sluoksnio mechaninių savybių rodikliai gauti kaip pagrindinio metalo ir droso sluoksnio rodiklių vidurkis.

3.2. Eksperimentinis ir analitinis tyrimas

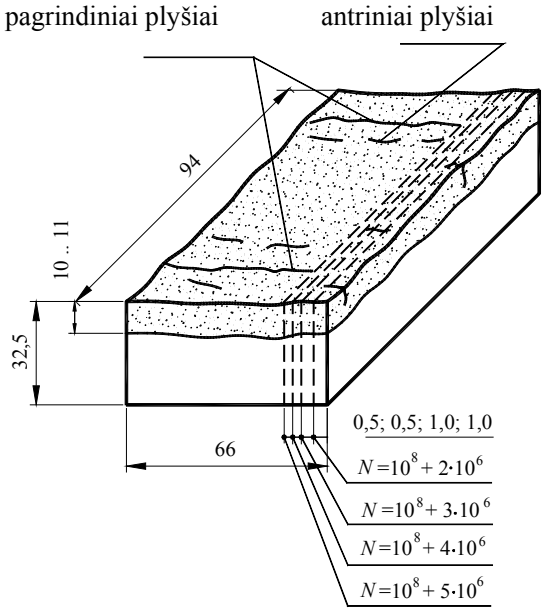
Stačiakampio skerspjūvio bandinių (paruoštų naudojant tą pačią realių konstrukcijų gamybos technologiją), bandymai atlikti pagal 2.3 pav. parodytą apkrovimo schemą. Bandymo programa tokia, kad daugiaciklio apkrovimo metu būtų galima nustatyti plyšio susidarymą ir stebėti plyšio plitimą atskiruose sluoksniuose neardančios kontrolės metodais. Išlaikant pastovų ciklo asimetrijos koeficientą r = - 0,62, įtempimų kitimo intervalas 1 bandiniui buvo didinamas palaipsniui, nuo $\Delta\sigma$ = 69 MPa iki $\Delta\sigma$ = 180 MPa (3.5 pav.). Bandinio 2 įtempimai kito nuo $\Delta\sigma$ = 69 MPa iki $\Delta\sigma$ = 280 MPa (3.6 pav.). Atskiruose programinio apkrovimo etapuose periodiškai matuojamas plyšio plitimas į gylį ir ilgį. Magistralinis plyšys abiems bandiniams galutinai susidarė susijungiant arčiausiai esantiems plyšiams maždaug po 10^8 ciklų. Iki 10^8 ciklų bandinio šonuose esantys defektai padidėjo nedaug. Norint patikrinti susidariusių nuovargio plyšių pobūdį giliau medžiagoje, po $10^8 + 2\cdot10^6$ ciklų 1 bandinys pradėtas prepuoti, nupjaunant po 0,5 ÷ 1,0 mm pločio medžiagos segmentus nuo bandinio šonų. Prepavimo schema parodyta 3.7 paveiksle. Prepavimo procedūros buvo kartojamos kas 10^6 ciklų. Optinė ir defektoskopinė analizė, taikyta po kiekvienos prepavimo procedūros, rodė, kad kai kurie plyšiai sumažėdavo, tačiau atsirasdavo naujų. Šiuos plyšius reikia priskirti prie trumpų plyšių, kurie susidarė šalia magistralinio plyšio.



3.5 pav. 1 bandinio apkrovimo programa ir plyšio gylio priklausomybė nuo įtempimų kitimo intervalo. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 – programinio apkrovimo atvejai: 1 – $\Delta\sigma$ = 69 MPa, $N = 1\cdot10^8$; 2 – $\Delta\sigma$ = 90 MPa, $N = 2\cdot10^7$; 3 – $\Delta\sigma$ = 110 MPa, $N = 2\cdot10^7$; 4 – $\Delta\sigma$ = 140 MPa, $N = 2\cdot10^7$; 5 – $\Delta\sigma$ = 150 MPa, $N = 2\cdot10^7$; 6 – $\Delta\sigma$ = 160 MPa, $N = 4\cdot10^7$; 7 – $\Delta\sigma$ = 170 MPa, $N = 6\cdot10^7$; 8 – $\Delta\sigma$ = 180 MPa, $N = 2\cdot10^7$.

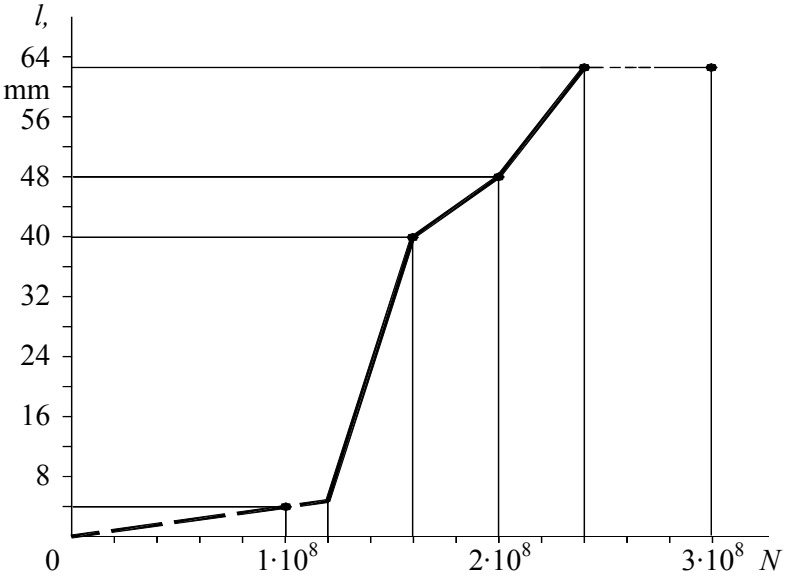


3.6 pav. 2 bandinio apkrovimo programa ir plyšio gylio priklausomybė nuo įtempimų kitimo intervalo. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 – programinio apkrovimo atvejai: 1 – $\Delta\sigma = 69$ MPa, $N = 1\cdot10^8$; 2 – $\Delta\sigma = 150$ MPa, $N = 4\cdot10^7$; 3 – $\Delta\sigma = 160$ MPa, $N = 2\cdot10^7$; 4 – $\Delta\sigma = 170$ MPa, $N = 4\cdot10^7$; 5 – $\Delta\sigma = 180$ MPa, $N = 1\cdot10^6$; 6 – $\Delta\sigma = 200$ MPa, $N = 1\cdot10^6$; 7 – $\Delta\sigma = 220$ MPa, $N = 1\cdot10^6$; 8 – $\Delta\sigma = 240$ MPa, $N = 1\cdot10^6$; 9 – $\Delta\sigma = 260$ MPa, $N = 1\cdot10^6$; 10 – $\Delta\sigma = 280$ MPa, $N = 1\cdot10^7$;

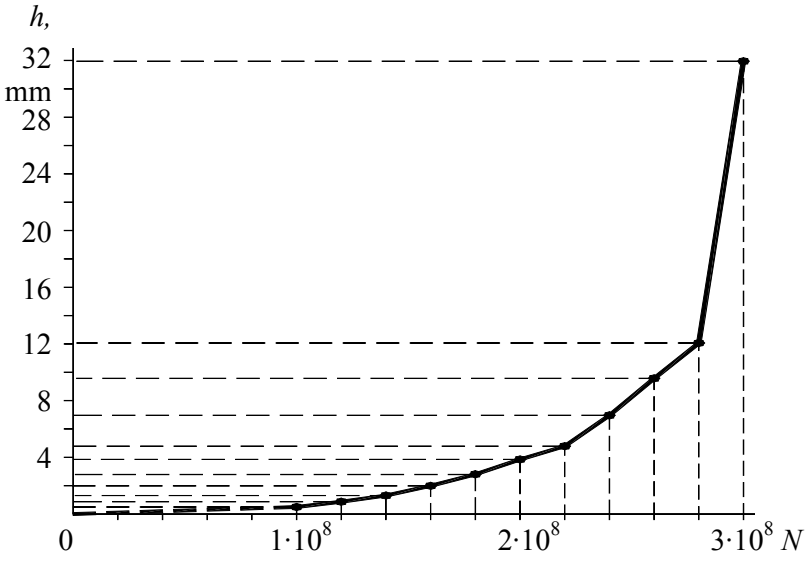


3.7 pav. Prepavimo schema, taikyta 1 bandiniui

3.8 – 3.11 paveiksluose parodytas plyšio ilgio ir gylio kitimas didėjant apkrovimo ciklų skaičiui. Iš šių paveikslų galima matyti, kad iki $1 \cdot 10^8$ apkrovimo ciklų susidarė daug plyšio židinių (1 ir 2 priedus). Pasikeitus maksimaliems įtempimams, jie susijungė į magistralinį plyšį, o plyšio greitis gerokai padidėjo.

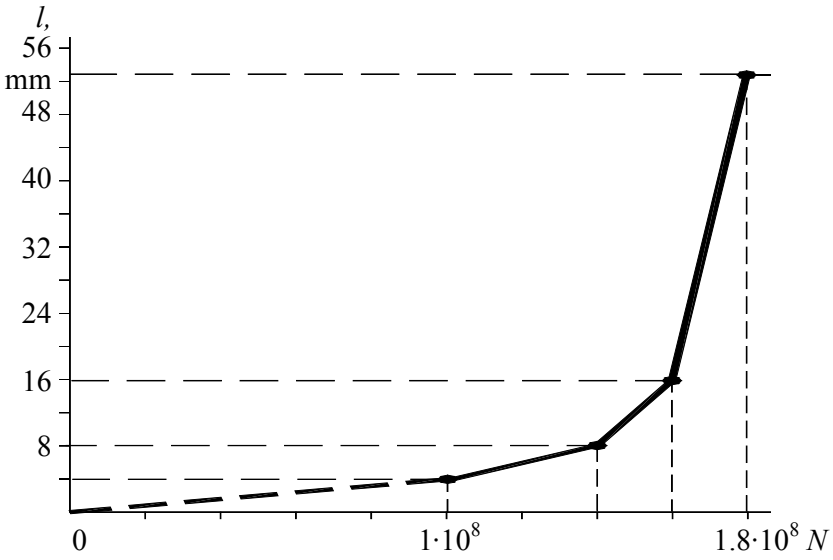


3.8 pav. Plyšio ilgio priklausomybė nuo ciklų skaičiaus 1 bandinyje

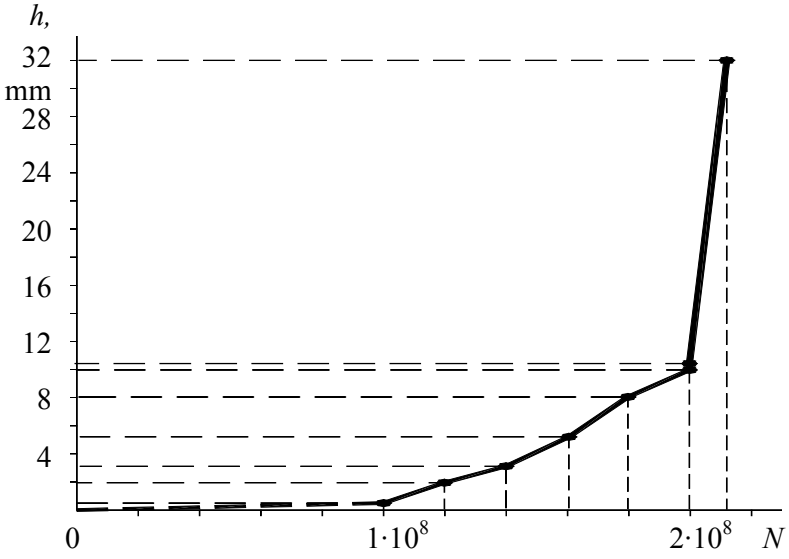


3.9 pav. Plyšio gylio priklausomybė nuo ciklų skaičiaus (1 bandinys)

Iš diagramų taip pat pastebima, kad 1 bandiniui magistralinis plyšys per visą bandinio plotį susidarė po $2{,}4 \cdot 10^8$ apkrovimo ciklų. 2 bandiniui magistralinis plyšys per visą bandinio plotį susidarė po $1{,}8 \cdot 10^8$ apkrovimo ciklų. Abiejuose bandiniuose magistraliniai plyšiai susidarė apsijungiant keliems antriniams plyšiams, plintantiems skirtingose plokštumose.



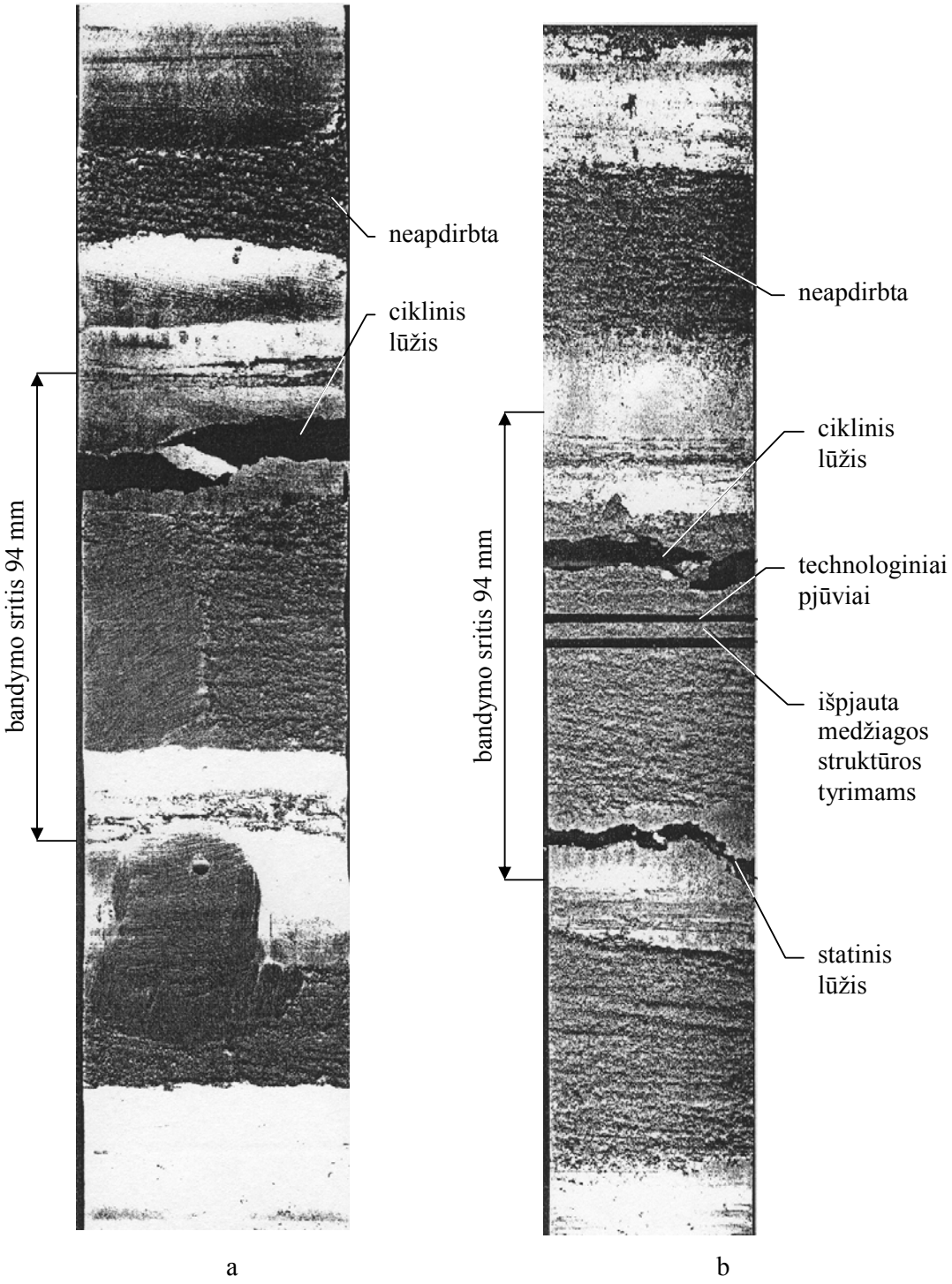
3.10 pav. Plyšio ilgio priklausomybė nuo ciklų skaičiaus ties 2 bandinio cikliniu lūžiu



3.11 pav. Plyšio gylio priklausomybė nuo ciklų skaičiaus (2 bandinys)

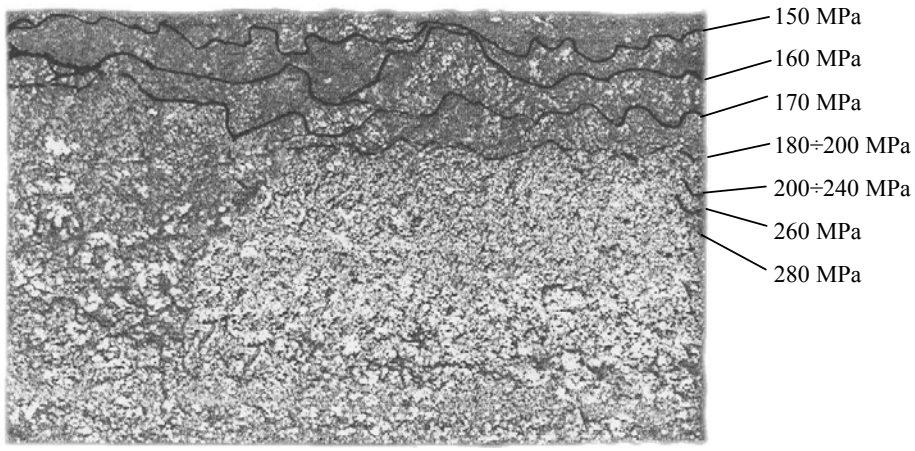
Bandinys 1 suiro kai įtempimų kitimo intervalas pasiekė 180 MPa. Visas programinis ciklų skaičius iki visiško suirimo pirmam bandiniui – $3{,}1 \cdot 10^8$. 2 bandinys suiro, kai įtempimų

kitimo intervalas pasiekė 280 MPa. Visas apkrovimo ciklų skaičius buvo $2{,}5 \cdot 10^8$, įskaitant visą apkrovimo programą. 3.12 paveiksle pateikiamas išorinis suirusių bandinių vaizdas.



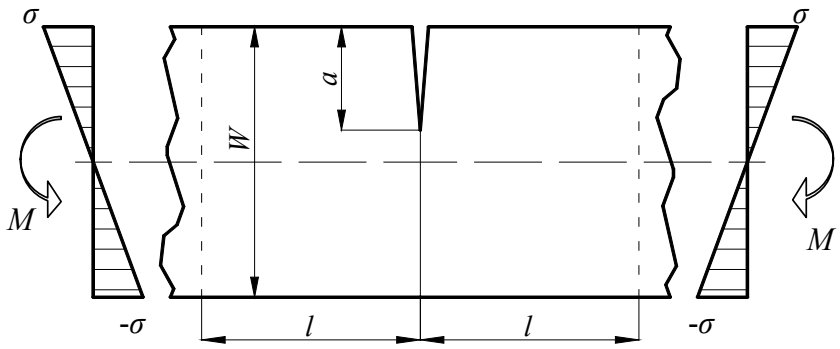
3.12 pav. Suirę bandiniai: a) 1 bandinys, b) 2 bandinys

Remiantis dažų pėdsakais bandinių lūžių paviršiuose galima teigti, kad abiejuose bandiniuose plyšių plitimas buvo nepastovus netgi atskirų apkrovimų diapazonuose. Plyšio frontas įvairus, o gylis per bandinio plotį skirtingas. 3.13 paveiksle parodytas bandinio lūžis su išryškintais plyšių plitimo frontų kontūrais, nustatytais pagal dažų pėdsakus. Juose matosi, kad plyšio frontas nevienodas. Droso sluoksnio struktūriniai dariniai nevienalyčiai, kai kuriose vietose plyšys pasiekia pagrindinį metalą, o kitose stringa droso ar pereinamajame sluoksnyje.



3.13 pav. 2 bandinio lūžis

Pagal gautus eksperimentinius duomenis ir analizę, atliktą 1.3 poskyryje, irimo procesui aprašyti panaudoti irimo mechanikos dėsningumai. Darbuose [1, 6] pateikiama nemažai įtempimų intensyvumo koeficiento skaičiavimo formulių stačiakampio skerspjūvio bandiniui, apkrautam grynuoju lenkimu. Skaičiavimui naudojama 3.14 paveiksle pateikta skaičiuojamoji schema.



3.14 pav. Lenkiamo bandinio skaičiuojamoji schema

Įtempimų intensyvumo koeficientui skaičiuoti Noibero pasiūlyta tokia formulė:

$$K = \frac{6M}{(W-a)^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right), \tag{3.1}$$

čia *W, a,* – bandinio geometrijos ir apkrovimo parametrai pagal 3.14 schemą, *M* – lenkimo momentas.

Geometrijos įvertinimo bematė funkcija nustatoma pagal 3.2 lentelę.

3.2 lentelė. Geometrijos įtakos įvertinimo funkcijos reikšmių lentelė

a/W	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8 ir >
f(*a/W*)	0,36	0,49	0,60	0,66	0,69	0,72	0,73

Andersonas įtempimų intensyvumo koeficientą pasiūlė skaičiuoti taip [1]:

$$K = \frac{F}{B \cdot \sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right), \tag{3.2}$$

čia geometrijos funkcija:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{K_I B \sqrt[3]{W}}{M} = \frac{6\sqrt{2\tan\left(\frac{\pi a}{2W}\right)}}{\cos\left(\frac{\pi a}{2W}\right)}\left[0{,}923 + 0{,}199\left\{1 - \sin\left(\frac{\pi a}{2W}\right)\right\}^4\right]. \tag{3.3}$$

Darbe [70] pateikta tokia formulė:

$$K = \frac{M}{B \cdot W^{3/2}} \cdot 4{,}12\sqrt{\alpha^{-3} - \alpha^3}, \tag{3.4}$$

čia α – pataisos koeficientas, skaičiuojamas taip:

$$\alpha = 1 - \frac{a}{W}. \tag{3.5}$$

Panasiuko pasiūlyta formulė [6]:

$$K = \frac{M}{\sqrt[3]{B \cdot W}} Y \,, \tag{3.6}$$

čia geometrijos koeficientas:

$$Y = \sqrt{\frac{\lambda}{(1-\lambda)^3}}\left(1{,}856 - 3{,}204\lambda + 3{,}553\lambda^2 - 1{,}619\lambda^3\right), \tag{3.7}$$

$$\text{kai } 0{,}10 \le \lambda \le 0{,}8$$

ir

$$Y = 2{,}5\left(1 - 3{,}333\lambda + 5{,}674\lambda^2\right) \tag{3.8}$$

$$\text{kai } 0{,}45 \le \lambda \le 0{,}55.$$

Tados, Periso, Irvino formulė [12]:

$$K_{\mathrm{I}} = \sigma_0 \sqrt{\pi a}\, f\left(\frac{a}{W}\right), \tag{3.9}$$

$$\sigma_0 = \frac{6M}{tW^2}, \tag{3.10}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \left(\frac{2W}{\pi a}\tan\frac{\pi a}{2W}\right)^{1/2}\left(\cos\frac{\pi a}{2W}\right)^{-1}\left(0{,}923 + 0{,}199\left(1 - \sin\frac{\pi a}{2W}\right)^3\right). \tag{3.11}$$

Įtempimų intensyvumo koeficientas, esant grynajam lenkimui pagal ASME skaičiuojamas tokia empirine formule:

$$K_{\mathrm{I}} = \sigma\sqrt{\pi a}\, f(\alpha), \tag{3.12}$$

čia $f(\alpha)$ – pataisos funkcija, nustatoma pagal formulę:

$$f(\alpha) = 1{,}122 - 1{,}40\alpha + 7{,}33\alpha^2 - 13{,}08\alpha^3 + 14{,}0\alpha^4, \tag{3.13}$$

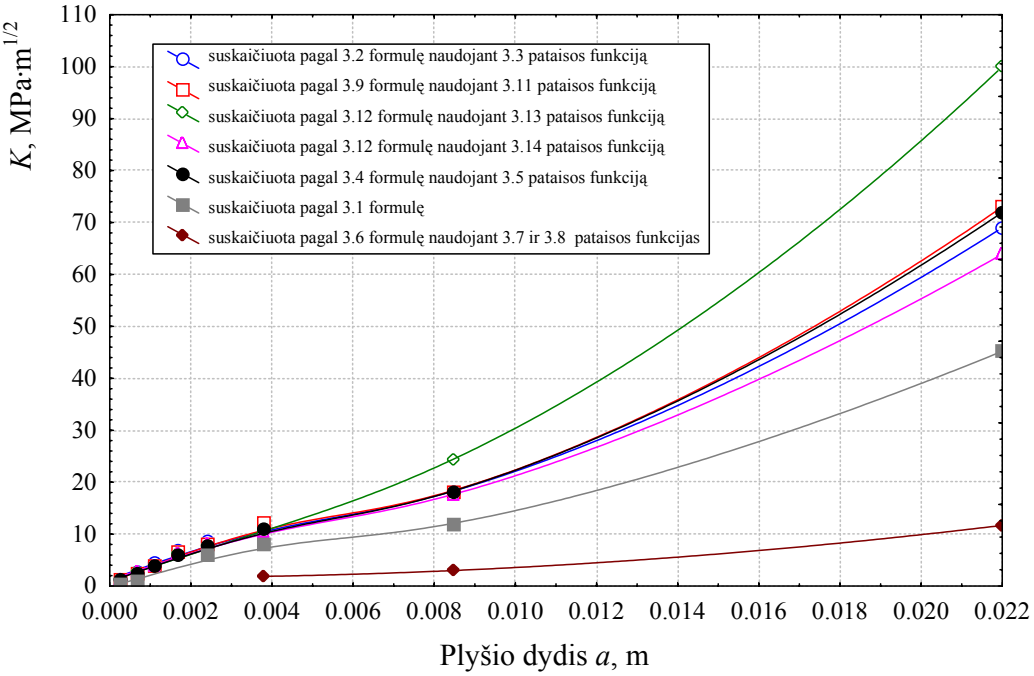
arba

$$f(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{\pi\alpha}\tan\pi\alpha}\,\frac{0{,}923 + 0{,}199(1-\sin\pi\alpha)}{\cos\pi\alpha}. \tag{3.14}$$

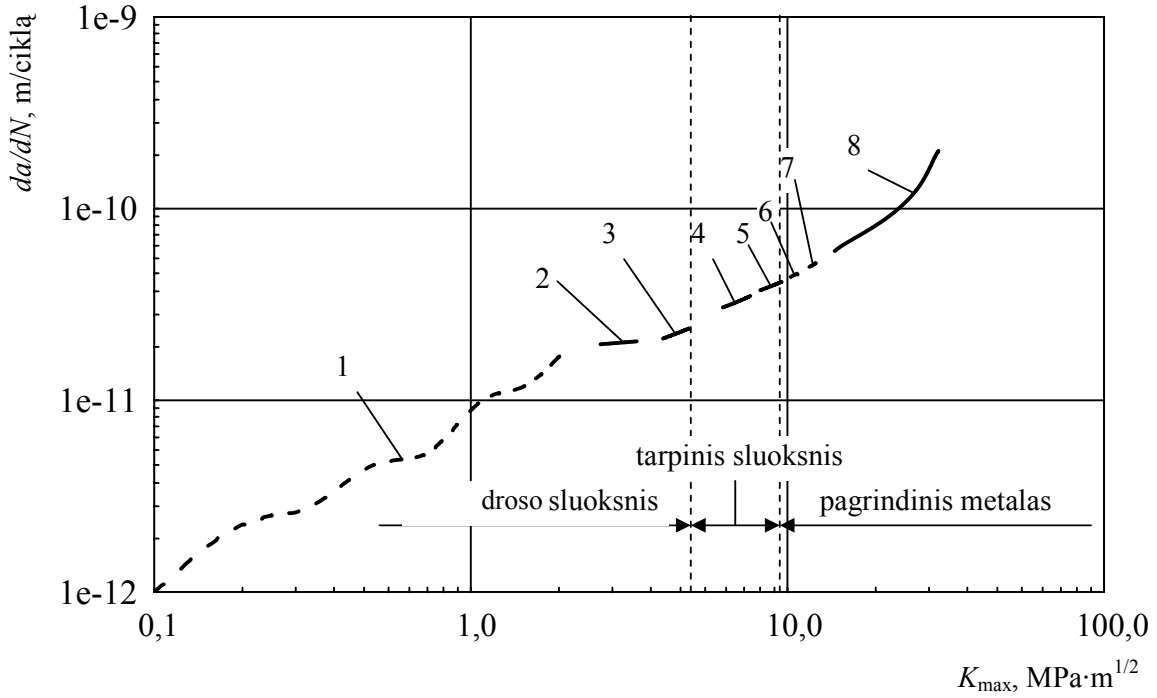
3.15 paveiksle parodyta palyginamoji diagrama, skaičiuojant pagal 3.1 - 3.14 formules. Pateikiamų grynuoju lenkimu apkrauto stačiakampio skerspjūvio bandinio įtempimų intensyvumo koeficiento skaičiavimo formulių analizė parodė, kad ne visos jos vienodai nustato įtempimų intensyvumo koeficiento reikšmes esant įvairiam plyšio gyliui. Skirtumai išryškėja įtempimų intensyvumo koeficientui pasiekus dideles reikšmes.

Šiame darbe įtempimų intensyvumo koeficientui skaičiuoti buvo panaudota 3.12 formulė ir 3.13 pataisos koeficientas, nes jos paklaida iki 0,2 %, kai $\alpha \le 0{,}6$.

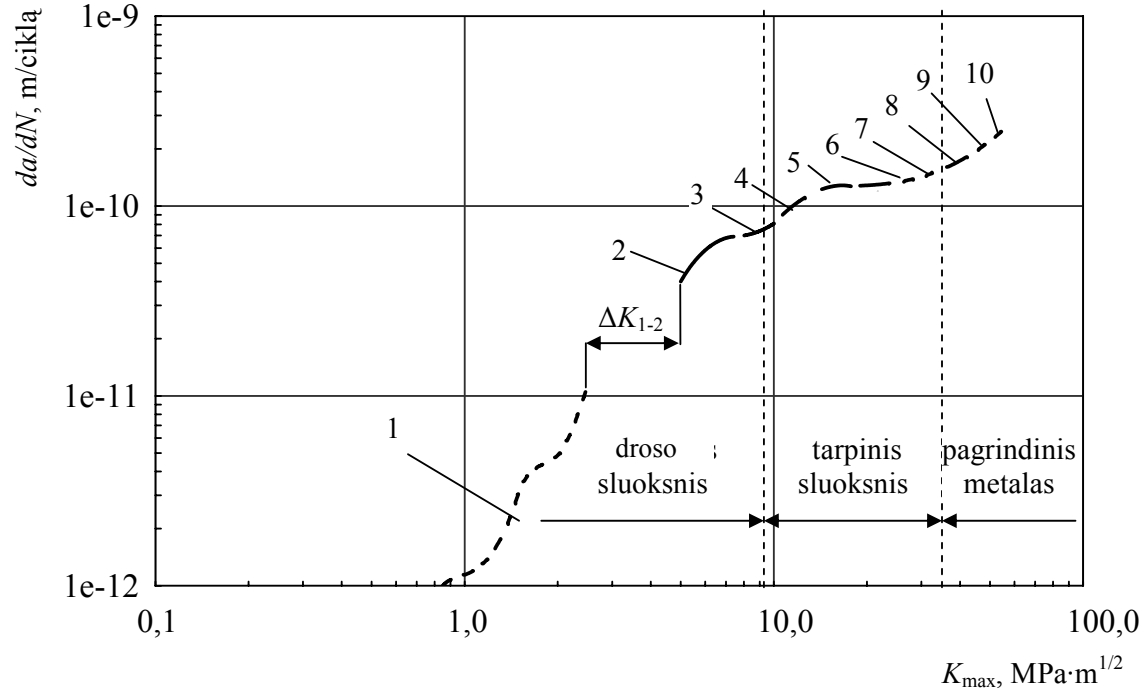
3.17 paveiksle pateikiama plyšio plitimo greičio priklausomybė 1-ame bandinyje nuo maksimalaus įtempimų intensyvumo koeficiento K_{max}. 3.18 paveiksle pateikiama plyšio plitimo greičio priklausomybė 2-ame bandinyje nuo maksimalaus įtempimų intensyvumo koeficiento K_{max}.



3.15 pav. Stačiakampio skerspjūvio bandinio, apkraunamo grynuoju lenkimu, įtempimų intensyvumo koeficientų skaičiavimo formulių palyginamoji diagrama

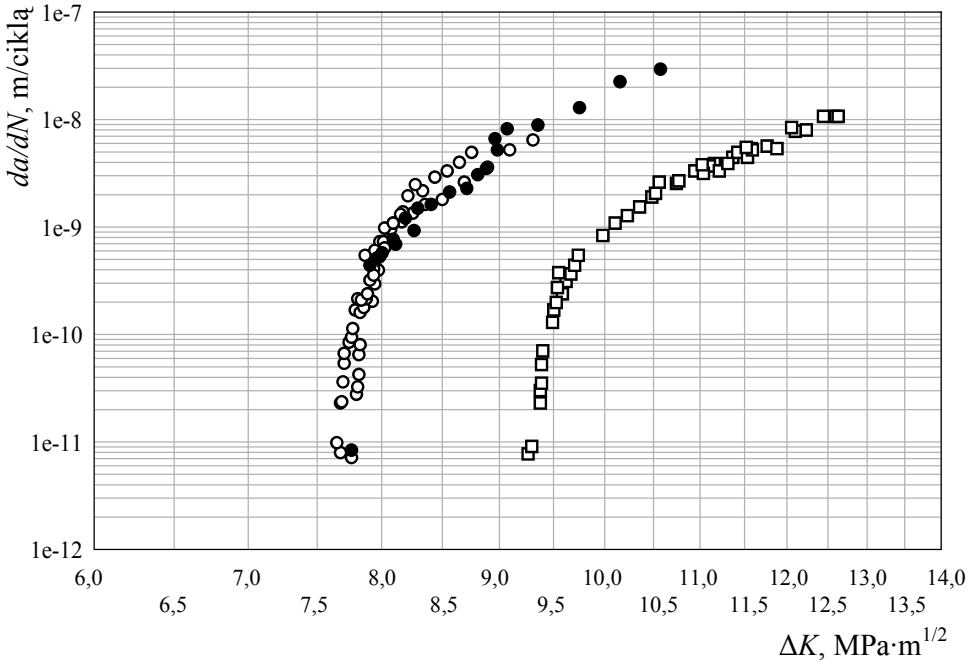


3.16 pav. Plyšio plitimo greičio priklausomybė 1 bandinyje nuo maksimalaus įtempimų intensyvumo koeficiento (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 – programinio apkrovimo atvejai)



3.17 pav. Plyšio plitimo greičio priklausomybė 2 bandinyje nuo maksimalaus įtempimų intensyvumo koeficiento (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 – programinio apkrovimo atvejai) $\Delta K_{1\text{-}2}$ – įtempimų intensyvumo koeficiento pokytis padidinus įtempimų intervalą

Kitas labai svarbus medžiagos pasipriešinimo daugiaciklio apkrovimo irimui yra ribinis įtempimų intensyvumo koeficiento intervalas (plyšėjimo slenkstis) ΔK_{th}, kurio nustatymui iš pagrindinio metalo ir droso sluoksnio buvo pagaminti kompaktiniai necentrinio tempimo (CT) bandiniai (bazės plotis W = 42 mm, storis B = 10,5 mm). Išlaikant bandymų reikalavimus ir skaičiavimo metodiką, aprašytą 2.1 poskyryje. (pagal ASTM E 647-00), buvo gautos plyšio greičio priklausomybės nuo įtempimų intensyvumo koeficiento (parodytos 3.18 paveiksle). Įtempimų intensyvumo koeficiento skaičiavimui panaudota 1.16 formulė. Nustatytas droso sluoksnio plyšėjimo slenkstis ΔK_{th}= 7,7 MPa$\cdot\sqrt{\text{m}}$, ir pagrindinio metalo – ΔK_{th} = 9,3 MPa$\cdot\sqrt{\text{m}}$.



3.18 pav. Plyšio plitimo greičio priklausomybė nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo (○, ● – droso sluoksnio, □ – pagrindinio metalo)

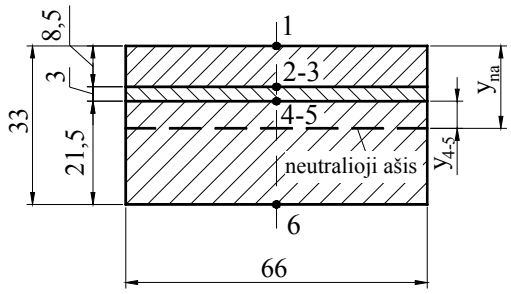
Pagrindinio metalo plyšėjimo slenkstis 1,2 karto viršija droso sluoksnio plyšėjimo slenkstį. Eksperimentiniai tyrimai atlikti kaip vienalytei medžiagai, todėl sluoksniuotai medžiagai atliktas įtempimų patikslinimas.

3.3. Įtempimų analizė

Ketaus nuovargis išsiskiria vietiniu irimo proceso charakteriu. Polikristalinių medžiagų deformavimas neišvengiamai siejasi su mikronevienalyčių plastinių deformacijų plitimu per

„struktūros elementus“ ir sudaro sąlygas mikroskopinių plyšių atsiradimui bei plitimui. Mikronevienalytis jų charakteris, apkraunant ciklišk ai, rodo, kad tiriant plyšių plitimą, į medžiagą būtina žiūrėti kaip į deformuojamą ir struktūriškai nevienalytę. Naudojant tiek analitinius, tiek ir eksperimentinius rezultatų apdorojimo metodus negalime tiksliai įvertinti plyšio plitimą nusakančių įtempimų, nes neįvertinamas medžiagos nevienalytiškumas. Rezultatai geriausiai sutampa tada, kai plyšio plitimą nusakantys įtempimai ir atitinkamai plyšio ilgis nedideli. Didėjant plyšio ilgiui, analitiškai ir skaitiškai gautų rezultatų nesutapimas didėja. Vadinasi, galima padaryti išvadą, kad kol kas nėra sukurta metodika, pagal kurią galima įvertinti medžiagos nevienalytiškumą.

Pagal suirusių bandinių lūžį patikslinta sluoksnių padėtis, matmenys parodyti 3.19 paveiksle.



3.19 pav. Skaičiuojamoji skerspjūvio schema

Taikant plokščiųjų pjūvių hipotezę ir turint omenyje, kad atskiri sluoksniai turi skirtingus tamprumo modulius, juose susidaro nevienodi įtempimai. Norint nustatyti įtempimus pirmiausia nustatoma neutraliosios linijos padėtis. Iš sąlygos, kad ašinė jėga lygi nuliui [69]:

$$E_1 \int_{A_1} ydA + E_2 \int_{A_2} ydA + E_3 \int_{A_3} ydA = 0\,, \tag{3.15}$$

čia E_i – atitinkamų sluoksnių tamprumo moduliai, A_i – atskirų sluoksnių pjūvių plotai. Formulės (3.15) integralai yra atskirų sluoksnių plotų statiniai momentai neutraliosios linijos atžvilgiu. Normaliniai įtempimai skaičiuoti pagal tokią išraišką:

$$\sigma_i = \frac{ME_i}{E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3} y_i \tag{3.16}$$

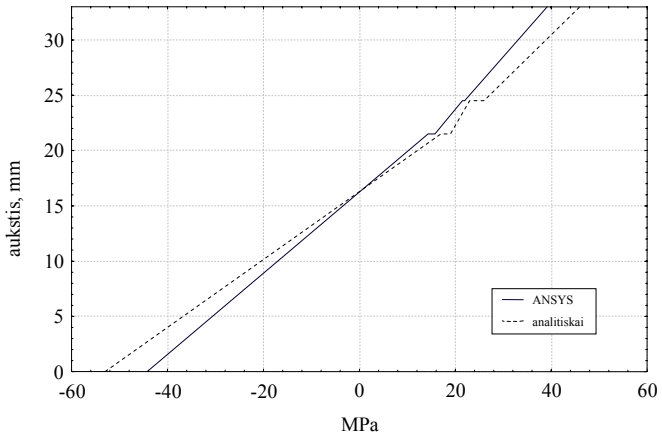
čia M – lenkimo momentas; I_i – sluoksnių inercijos momentai apie neutraliąją ašį; E_i – sluoksnio tamprumo modulis; y_i – skaičiuojamojo taško atstumas nuo neutraliosios ašies.

Skaičiuojant dvisluoksnius bandinius, įtempimai, įvertinant pereinamą sluoksnį, buvo nustatyti 6 būdinguose taškuose (3.19 pav.). Įtempimų reikšmės taškuose 1, 2, 3, 4, 5, 6 visais apkrovimo atvejais pateikiamos 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. 1 bandinio įtempimų reikšmės

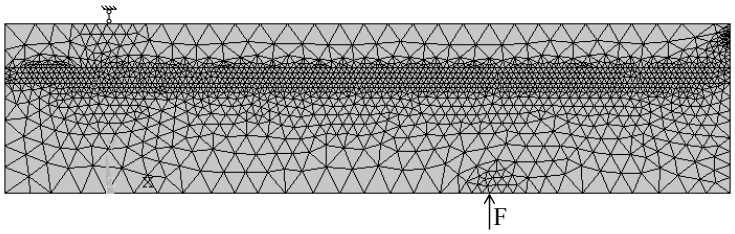
Programinio apkrovimo atvejis	Įtempimai skaičiuojamuosiuose taškuose prie F_{max}, MPa						Įtempimai skaičiuojamuosiuose taškuose prie F_{min}, MPa					
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6
1	46	23	26	17	19	-53	-29	-14	-16	-11	-12	33
2	59	30	33	22	24	-67	-37	-19	-20	-14	-15	42
3	73	37	41	27	29	-83	-45	-23	-25	-17	-18	51
4	93	47	52	34	37	-105	-58	-29	-32	-21	-23	65
5	100	51	56	37	41	-114	-62	-32	-35	-23	-25	71
6	106	54	60	39	43	-121	-66	-33	-37	-24	-27	75
7	114	57	64	42	46	-129	-71	-35	-40	-26	-29	80
8	120	61	68	44	49	-137	-74	-35	-42	-27	-30	85

Grafiškai įtempimų pasiskirstymas apkrovimo atveju, kai $\Delta\sigma$ = 69 MPa, parodytas 3.20 paveiksle. Palyginimui pateikiama diagrama, apskaičiuota baigtinių elementų programa.



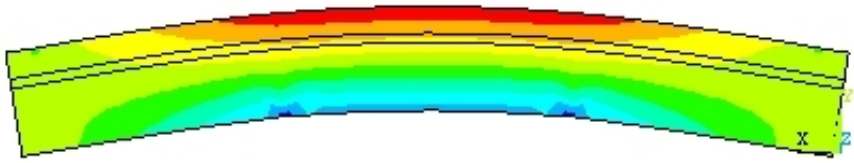
3.20 pav. Įtempimų palyginimas skaičiuojant skirtingais metodais

Baigtinių elementų programa nustatyti įtempimai yra mažesni už suskaičiuotus analitiškai. Baigtinių elementų metodas (*BEM*) irimo mechanikoje dažniausiai naudojamas statinio tampraus, o kiek rečiau – statinio tampriai plastinio apkrovimo atvejais [71-75]. Skaitiniam tyrimui buvo panaudotas ANSYS 5.5 programinis paketas. Sudaryta tokia pati tiriamojo modelio geometrija kaip ir naudota eksperimentiniuose tyrimuose. Skaičiavimui imtas plokščias modelis, parodytas 3.21 paveiksle. Kadangi modelis turi vieną simetrijos ašį, tai pritaikius nustatytas kraštines sąlygas, buvo tiriama tik pusė bandinio modelio. Kiti parametrai – baigtinių elementų tinklelis ir apkrova – parinkti atsižvelgiant į sprendžiamo uždavinio specifiką, pagal literatūroje nurodomas rekomendacijas.



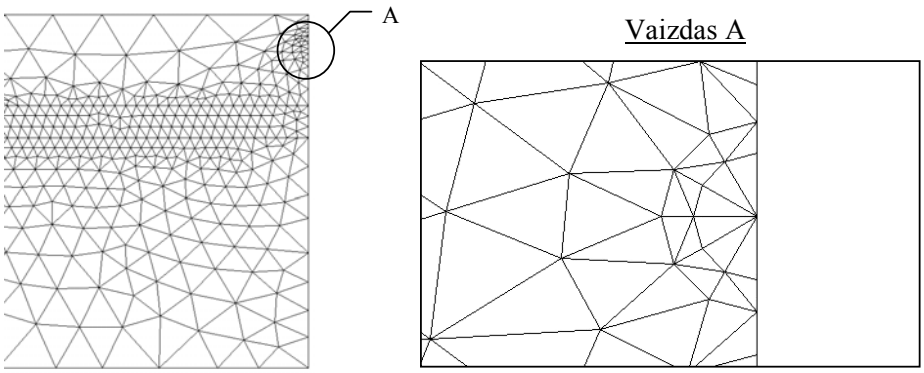
3.21 pav. Baigtinių elementų tinklas

Įtempimų pasiskirstymas pirmuoju apkrovimo atveju parodytas 3.22 paveiksle.



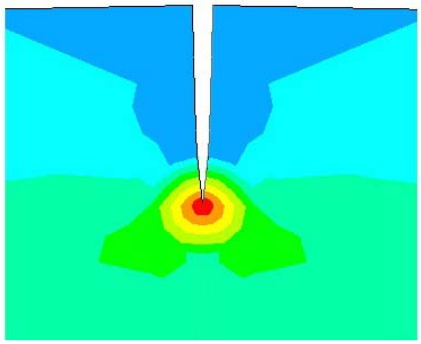
3.22 pav. Įtempimų pasiskirstymas grynuoju lenkimu apkrautoje plokštėje

Norint teisingai apskaičiuoti įtempimų intensyvumo koeficientą, literatūroje rekomenduojama naudoti specialius įtempimų koncentracijos elementus. BEM modelyje plyšio viršūnėje panaudotas izoparametrinis elementas su 6 mazgais, kurio vienos kraštinės trys mazgai sutapatinti į vieną, o kitų dviejų kraštinių vidurio mazgai perslinkti per 0.5 kraštinės ilgio iki plyšio viršūnės. Tokio tipo elementų naudojimo tikslingumas pagrįstas literatūroje ir priimtas plyšio viršūnės modeliavimui ANSYS 5.5 sistemoje. Koncentratoriaus vietoje sudarytas specialių elementų tinklas parodytas 3.23 paveiksle. Elemento dydis 0,05 mm.



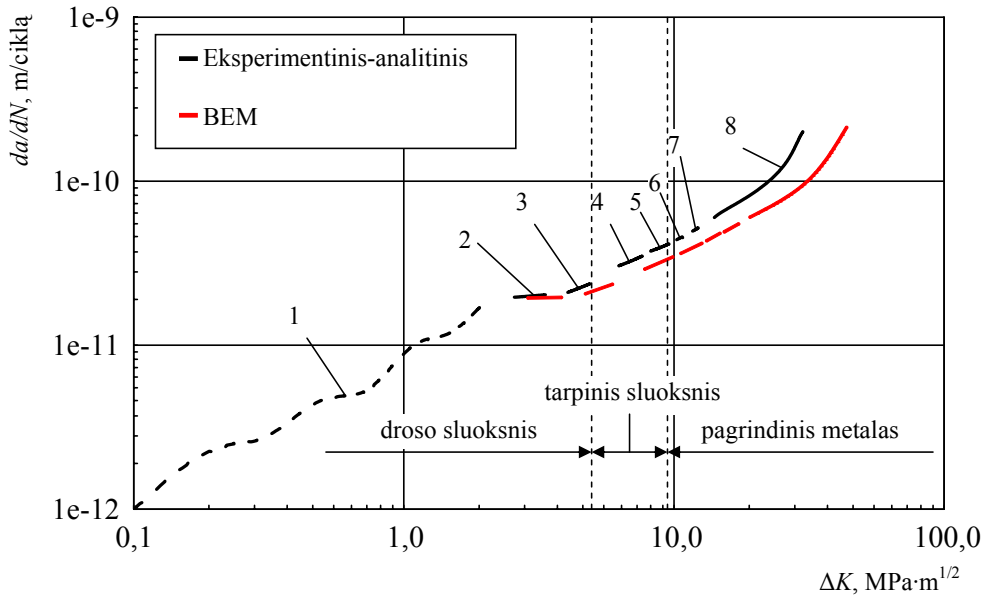
3.23 pav. Baigtinių elementų tinklas plyšio viršūnėje

Tiriant baigtinių elementų modelį, buvo suskaičiuoti įtempimų ir deformacijų laukai (3.24 pav.) duotai apkrovai ir plyšio ilgiui. Plyšio ilgis ir apkrova paimti iš eksperimentinių duomenų. Plyšio viršūnės koordinatės buvo keičiamos pagal eksperimentinius plyšio ilgio duomenis. Kartu buvo keičiama sutankintoji tinklelio dalis prie plyšio viršūnės.

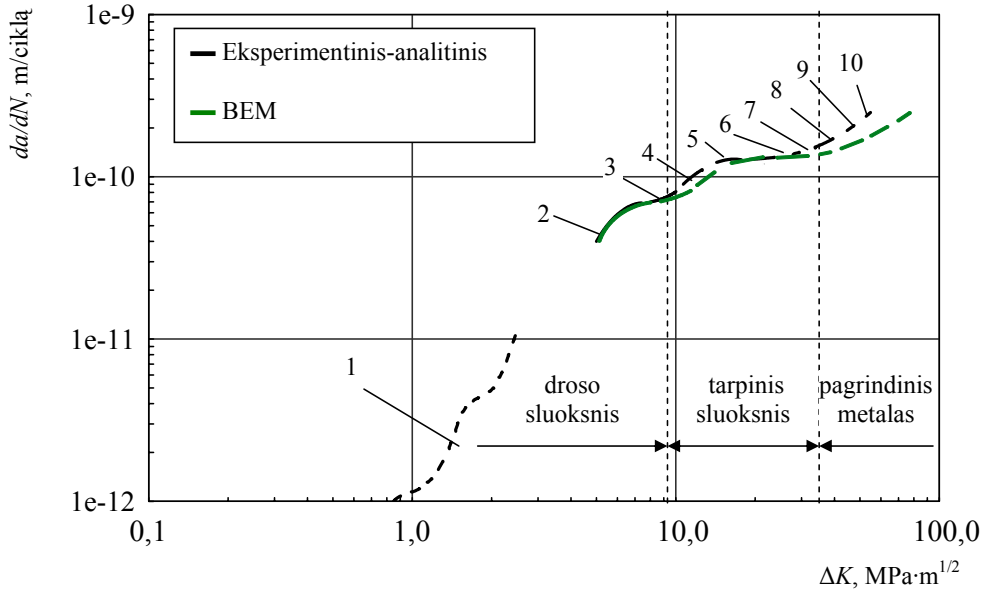


3.24 pav. Įtempimų pasiskirstymas plyšio viršūnėje vienam apkrovimo ir plyšio ilgio atvejui (σ_{max} = 80 MPa, a = 2 mm)

Analitiškai ir skaitiškai (naudojant baigtinių elementų metodą) apskaičiuoti įtempimų intensyvumo koeficientai pateikiami 3.25 ir 3.26 paveiksluose, kaip priklausomybė nuo plyšio plitimo greičio. Lyginant eksperimentiškai–analitiškai gautus rezultatus su gautais skaitiniu metodu, pastebima, kad didėjant apkrovai, skirtingais metodais nustatyti dydžiai ima gerokai skirtis. Norint tinkamai įvertinti medžiagos nevienalytiškumą, reikia taikyti specialius metodus, o eksperimentiniai tyrimai vis dar išlieka svarbūs nustatant plyšėjimo rodiklius.



3.25 pav. Plyšio plitimo greičio priklausomybė 1 bandinyje nuo maksimalaus įtempimų intensyvumo koeficiento (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 – programinio apkrovimo atvejai)



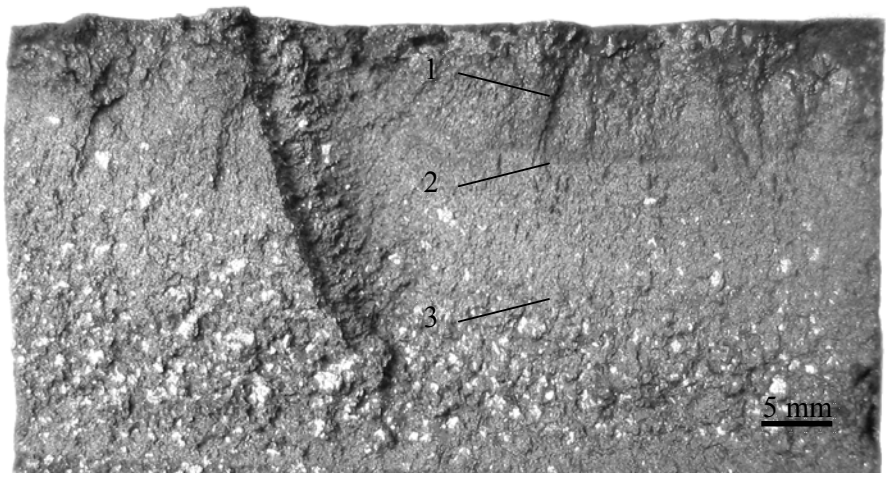
3.26 pav. Plyšio plitimo greičio priklausomybė 1 bandinyje nuo maksimalaus įtempimų intensyvumo koeficiento (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10 – programinio apkrovimo atvejai)

Kadangi skirtingais metodais gauti rezultatai skiriasi, norint tai paaiškinti, buvo atlikta lūžių analizė. Droso sluoksnis pasižymi pakankamai dideliu struktūros nevienalytiškumu, todėl reikia žinoti, kokią įtaką struktūros defektai daro irimo procesams ir atitinkamai atsaprumo irimui rodikliams.

3.4. Lūžių analizė

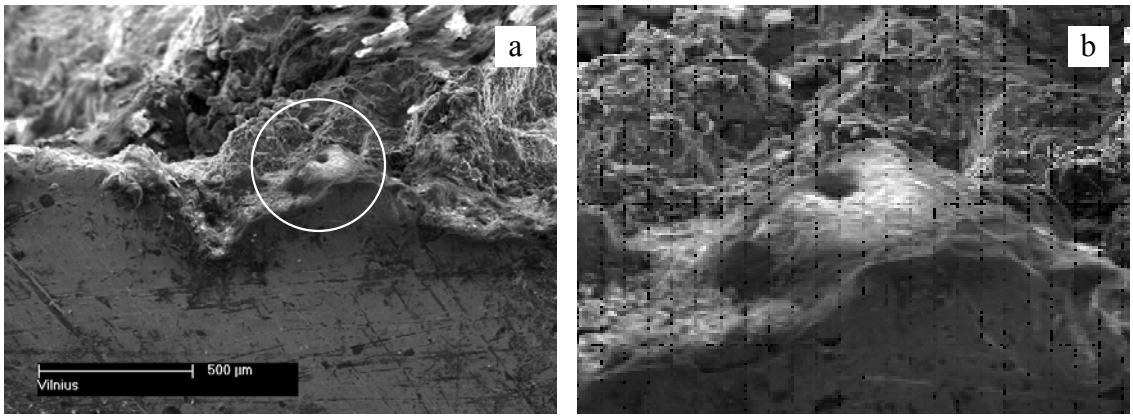
Egzistuoja gana apčiuopiamas ryšys tarp medžiagos struktūros ir irimo pobūdžio. Todėl lūžių analizė yra neatsiejama irimo procesų tyrimo dalis. Ji padeda nustatyti irimo sąlygas lokalinėse irimo zonose [76-80].

3.27 paveiksle parodyti bandinių lūžiai su matoma sluoksnių padėtimi ir ciklinio apkrovimo pėdsakais.



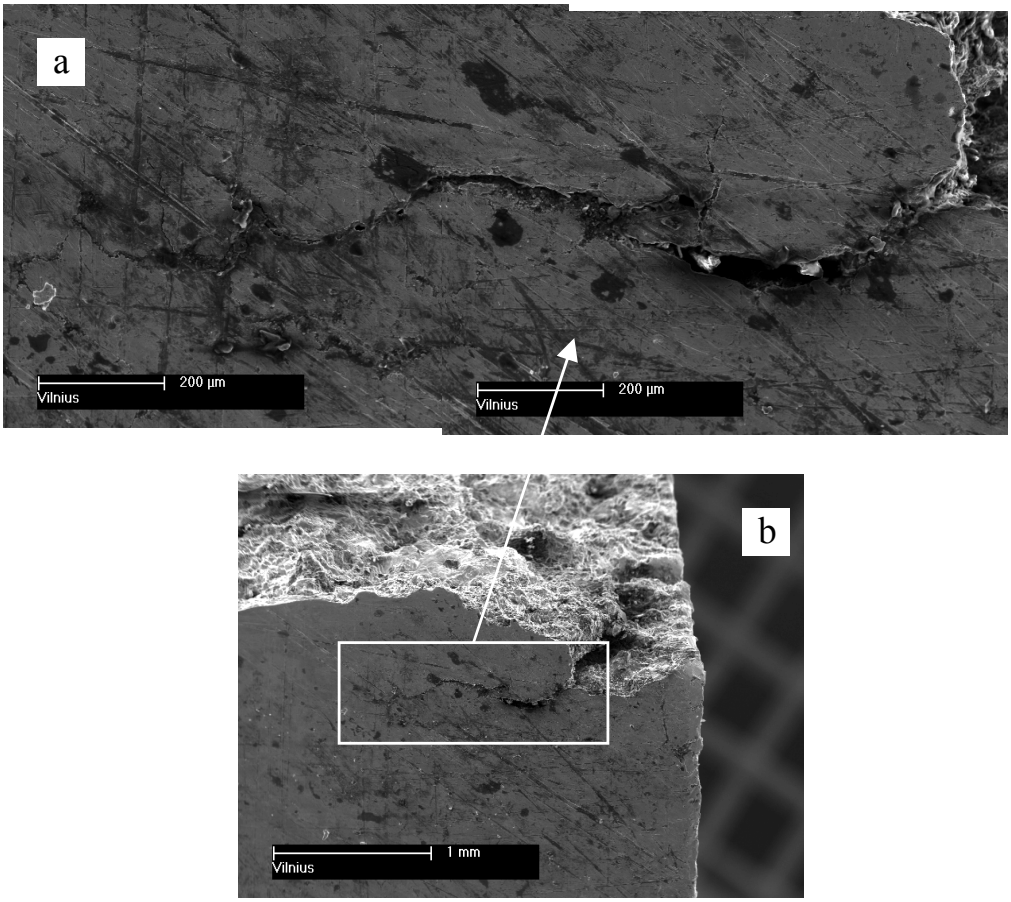
3.27 pav. 1 bandinio lūžis: 1 – droso sluoksnis, 2 – tarpinis sluoksnis, 3 – pagrindinis metalas

3.28 paveiksle parodytas irimo paviršius arti bandinio krašto. Spėjama, kad apskritimu pažymėta vieta, gali būti plyšio atsiradimo židinys, vadinamas „žuvies akimi“. Vadinasi, droso sluoksnyje, nepaisant daugybės defektų, plyšys užsimezgė ne nuo paviršiaus, kuriame daug struktūros defektų, bet iš gilesnių sluoksnių, kaip ir nurodoma literatūroje. Bandinyje iš droso sluoksnio plyšio susidarymas ir plitimas priklauso nuo daugelio veiksnių. Plyšio atsiradimas ypač didelio nuovargio (gigaciklio) režime iš esmės yra staigus. Plyšio branduolys auga labai greitai po atsiradimo ir tada stabdomas mikrostruktūros barjerų, tokių kaip grūdų ribos ar kietos mikrostruktūros fazės, pavyzdžiui, perlito. Nuovargio plyšys dažniausiai atsiranda tarp grafito ir struktūros matricos dėl silpno tarpusavio ryšio ir mažo grafito atsparumo. Tačiau nuovargio plyšiai gali atsirasti ir prie nemetalinių intarpų, mikroįtrūkimų-porų, kaip ir nustatyta šiame tyrime. Atsiradę žemiau nuovargio ribos plyšiai nepaliauja plisti ir tampa stabiliais (ilgais).



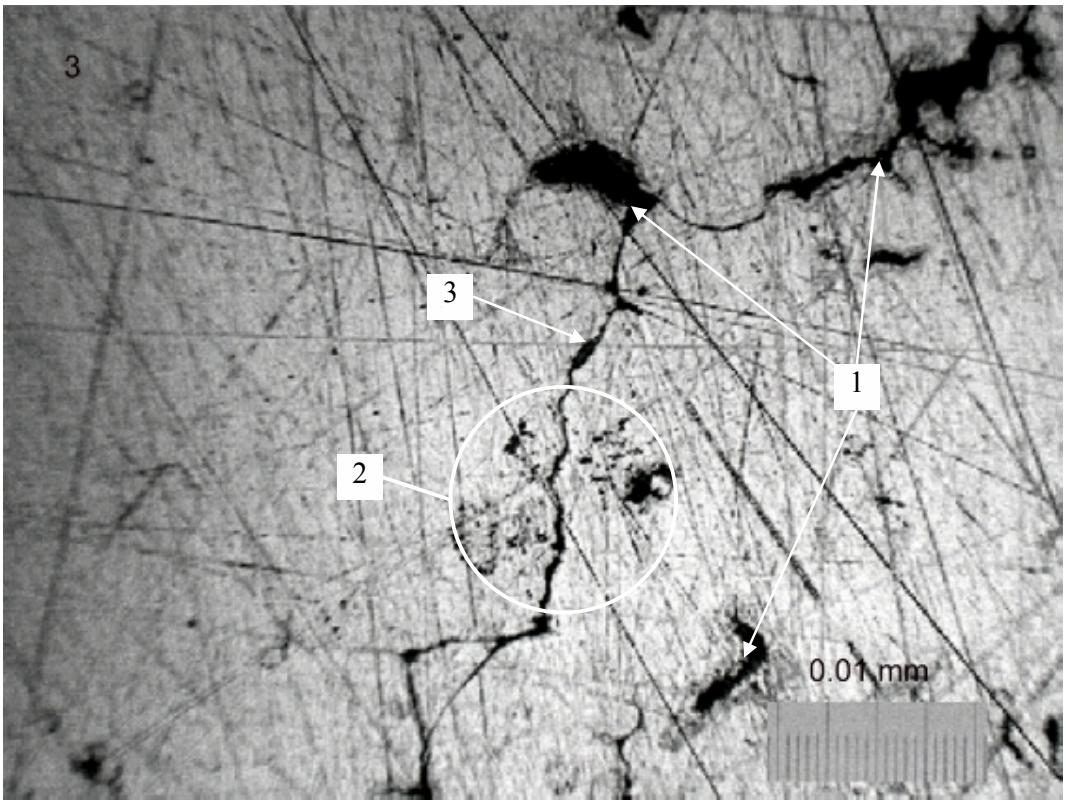
3.28 pav. Spėjama plyšio atsiradimo vieta – „žuvies akis“ (a), padidintas vaizdas (b)

Bandinio paviršiuje susidarė daug antrinių plyšių, kurie plito įvairiomis kryptimis (3.29 pav.). Tolesnis jų susijungimas lėmė magistralinio plyšio susidarymą.



3.29 pav. Antriniai plyšiai: a – padidintas vaizdas, b – bendras vaizdas

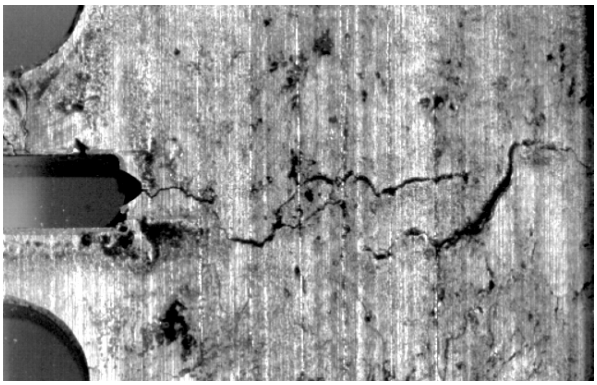
Plyšio plitimui didelę įtaką turi medžiagos nevienalytiškumas ir atskirų struktūros elementų anizotropija: tuštumos, nevienalyčiai dariniai ir intarpai keičia įtempimų deformacijų būvį plyšio viršūnėje. 3.30 paveiksluose parodyta, kaip susiformavęs nuovargio plyšys plito bandinio paviršiumi. Matosi, kad jis apėmė visus lokalinėje zonoje matomus defektus.



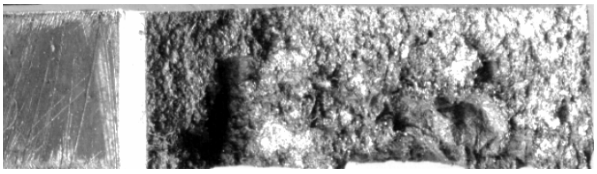
3.30 pav. Droso sluoksnio paviršius: 1, 2 – defektai, 3 - plyšys

3.31 paveiksluose parodyta plyšio trajektorija kompaktiniame (CT) bandinyje. Matosi, kad CT bandinio iš droso sluoksnio šone plyšys ne tik keičia kryptį, bet ir šakojasi į atskirus frontus. Integralinis struktūros poveikis atskirose zonose lemia plyšio plitimą taip, kad jo trajektorija įvairiu kampu praeina per slinkties plokštumas ir tuštumas. Palyginimui pateikiamas bandinio iš pagrindinio sluoksnio nuovargio irimo paviršius. Matosi, kad jis gerokai lygesnis. Droso sluoksnyje plyšys apeina atskirus intarpus ir tuštumas taip, kad kai kurios makrodalelės visiškai atsiskiria. Didelę įtaką struktūros ypatumai turi arti plyšėjimo slenksčio (ΔK_{th}). Šis jautrumas pasireiškia dėl to, kad mažų plyšių viršūnėje susidaranti plastiškumo zona yra vienos eilės su struktūros grūdų dydžiu. Dėl to nuovargio plyšys turi įveikti kiekvieną struktūros barjerą atskirai. Čia pasikeičia įtempimų laukas, vienu metu susidaro normalaus atotrūkio ir išilginės šlyties sąlygos plyšiui plisti. Skirtingi apkrovų deriniai gali veikti bandinį ištisus

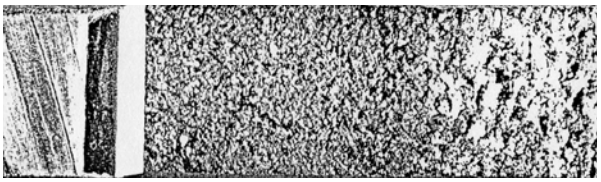
tūkstančius ciklų arba labai trumpai. Tai sukelia zigzaginį plyšio plitimą ir keičia plitimo greitį. Todėl gautas droso sluoksnio plyšėjimo slenkstis ΔK_{th} yra sąlyginis, nes daroma prielaida, kad plyšys statmenas normaliniams įtempimams. Tačiau reikia pastebėti, kad gauti rezultatai abiems bandiniams yra panašūs.



a



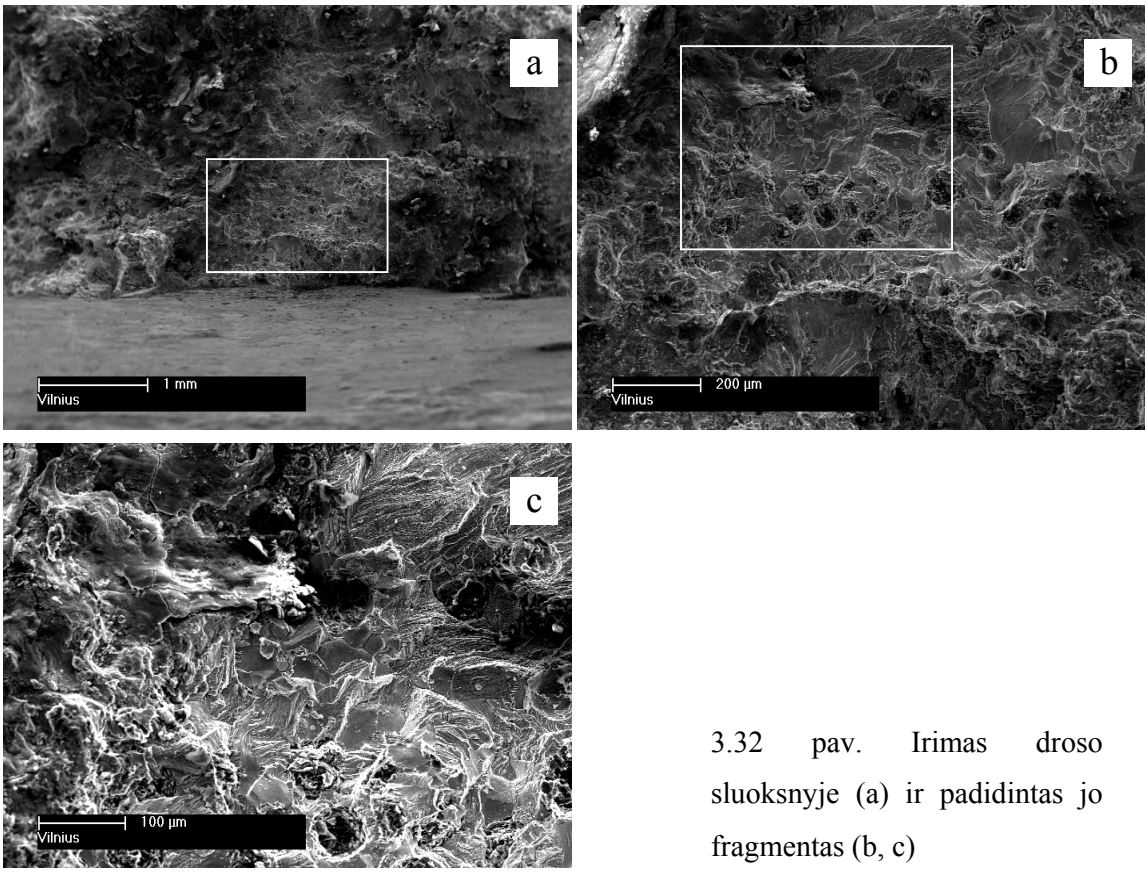
b



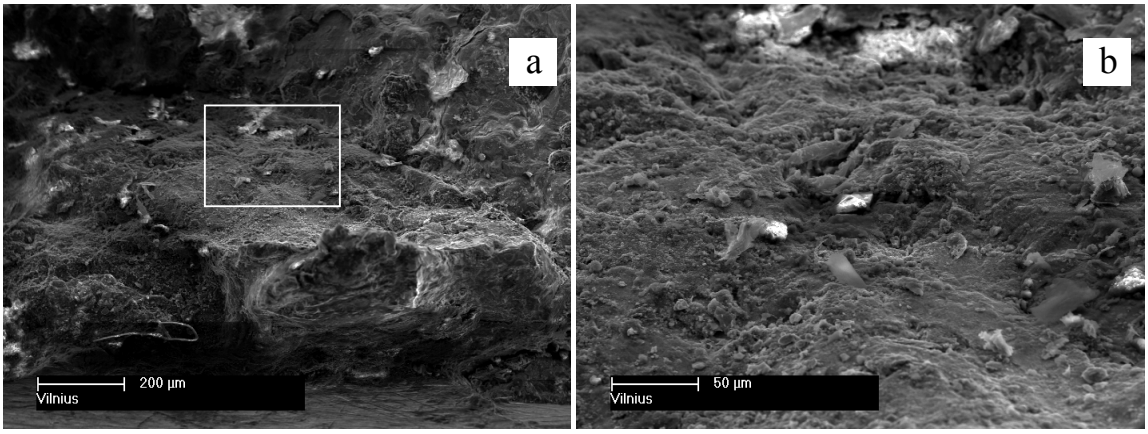
c

3.31 pav. Nuovargio plyšio plitimas CT bandiniuose: a, b – bandinys iš droso sluoksnio, c – bandinio iš pagrindinio metalo lūžis

Iš 3.32 ir 3.33 paveiksluose pateiktų droso sluoksnio lūžių matosi daugybė nevienalytiškumo darinių, tai patvirtina prielaidą, kad droso sluoksnyje susidaręs nuovargio plyšys plito per struktūros defektus. Vadinasi, droso sluoksnio atsparumas plyšių plitimui labiausiai priklauso nuo struktūros defektų dydžio ir skaičiaus. Ypač tai svarbu, kai struktūros defektai (3.34 pav.) yra arti bandinio paviršiaus.

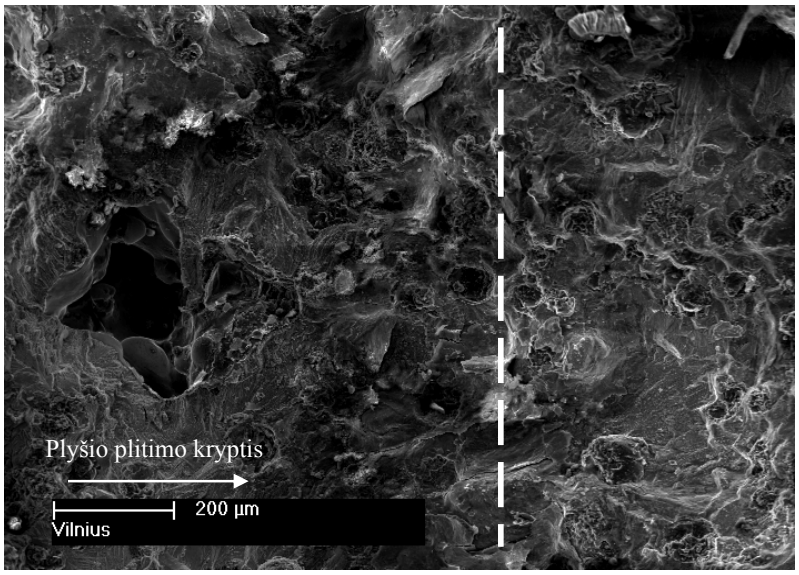


3.32 pav. Irimas droso sluoksnyje (a) ir padidintas jo fragmentas (b, c)



3.33 pav. Oksidacijos ir šlako požymiai irimo paviršiuje (a) ir padidintas fragmentas (b)

Dėl mikrostruktūros barjerų plyšio plitimo greitis gali labai sulėtėti. Plyšio perėjimas iš droso sluoksnio į pagrindinio metalo medžiagą parodytas 3.34 paveiksle. Jame sluoksniai atskirti punktyrine linija.



3.34 pav. Nuovargio irimas plyšiui pereinant iš droso sluoksnio į pagrindinį

Plyšiui perėjus į pagrindinį metalą, irimo paviršius labai pasikeičia: įsivyrauja tarpkristalinis irimas. Nuovargio irimo paviršius pagrindiniame metale parodytas 3.35 paveiksluose. Matome, kad plyšys plinta tarp struktūros grūdų, per rutulio formos grafito darinius. Vietose, kur didesnės ferito sankaupos, pastebimos mikroskopinio dydžio bangelės, tai reiškia, kad vietomis vyko ir plastinis irimas. Tai rodo, kad lokalizuotose vietose buvo susidaręs skirtingas įtempimų laukas. Tai yra svarbi nuovargio proceso ypatybė, įrodanti, kad plyšys auga esant įvairioms apkrovoms.

Pagal atliktą 1.3 ir 1.4 poskyriuose analizę plyšio prieaugis vieno ciklo metu įvyksta esant tokiai sąlygai:

$$K = K_c . \tag{3.17}$$

Staigaus suirimo sąlyga :

$$K_{max}(l_c) = K_c , \tag{3.18}$$

čia l_c – plyšio ilgis staigaus irimo momentu. Kadangi iki staigaus suirimo plyšio ilgis $l_N < l_c$, tai

$$K_{\max}(l_N) < K_{\max}(l_c) = K_c . \tag{3.19}$$

Tokiu būdu plyšio augimo sąlygą galima išreikšti tokia lygybe:

$$K_{\max}(l_N) = K_c(l_N), \tag{3.20}$$

čia $K_c(l_N)$ – kritinė įtempimų intensyvumo reikšmė medžiagai plyšio viršūnėje. $K_c(l_N)$ kinta ciklinio apkrovimo metu tokiose ribose:

$$K_{\max}(l_N) \le K_c(l_N) < K_c . \tag{3.21}$$

Nuovargio plyšio plitimas vyksta po to, kai kritinė įtempimų intensyvumo reikšmė $K_c(l_N)$ plyšio viršūnėje sumažėja nuo K_c iki $K_{\max}(l_N)$ pagal 3.21 lygybę. Taigi, kad plyšys paaugtų reikia, kad plyšio viršūnėje sumažėtų irimo tąsumas, t. y. padidėtų trapumas.

Stabilūs neplintantys plyšiai, atsiradę prie grafito intarpų ir mikroplyšių-porų, gali susidaryti ferito-perlito matricoje žemiau nuovargio ribos. Tai būdinga, nes plyšiai stabdomi dėl struktūros barjerų, tokių kaip feritas–perlitas.

Kodėl plyšys plinta per ferito matricą? Feritas plastiškesnis nei perlitas, todėl plastinė deformacija daugiausia susikoncentruoja jame, padarydama jį trapesnį. Tokiu būdu tąsesnis pradinėje būsenoje feritas greičiau tampa trapesnis, nei mažiau tąsus pradiniu momentu perlitas, trapėjantis per didesnį ciklų skaičių. Veikiant ciklinėms apkrovoms nuovargio plyšys plinta ferite. Net perlitinėje struktūroje esant mažoms ΔK, plyšys plinta per feritą. Todėl, patikslinant plyšio plitimo sąlygą, galima užrašyti:

$$K_{\max}(l_{Ni}) = K_c^F(l_{Ni}), \tag{3.22}$$

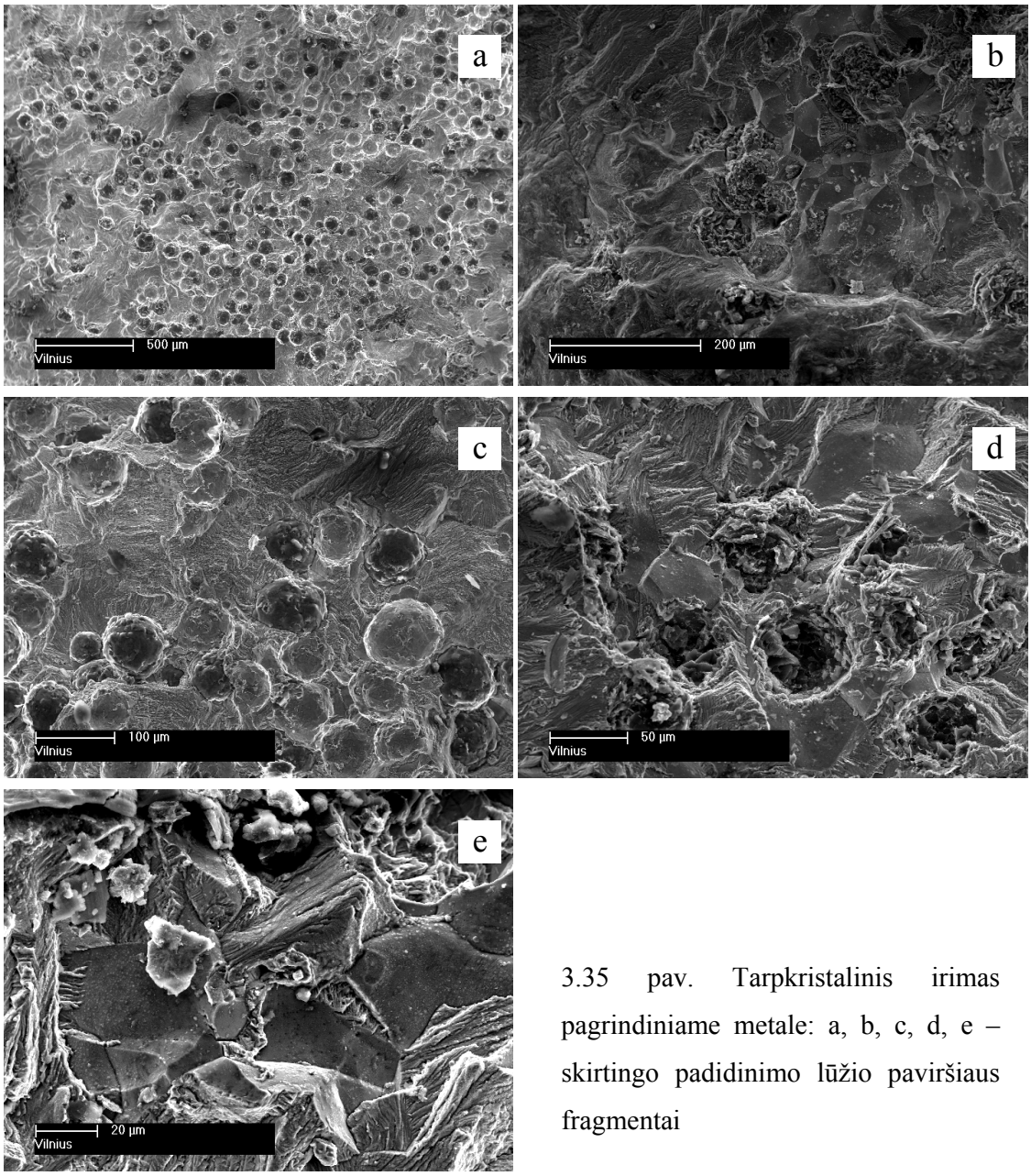
čia $K_c^F(l_{Ni})$ – kritinė cikliškai sukietinto ferito įtempimų intensyvumo koeficiento reikšmė.

Kai didelės ΔK reikšmės, stiprumui turi įtaką didelis grafito kiekis. Taip yra dėl to, kad didėjant ΔK, plastinė zona palaipsniui apima ne tik ferito dedamąją, bet ir visą struktūros konglomeratą, kurio tąsumas dabar jau nulemia plyšio plitimą. Tada plyšio plitimo sąlyga :

$$K_{\max}(l_{Ni}) = K_c^F(l_{Ni}), \tag{3.23}$$

čia $K_c^P(lNi)$ – kritinė cikliškai sukietinto perlito įtempimų intensyvumo reikšmė

Kadangi $K_c^P < K_c^F$ – tai plyšio plitimo greitis ferite mažesnis nei perlite.



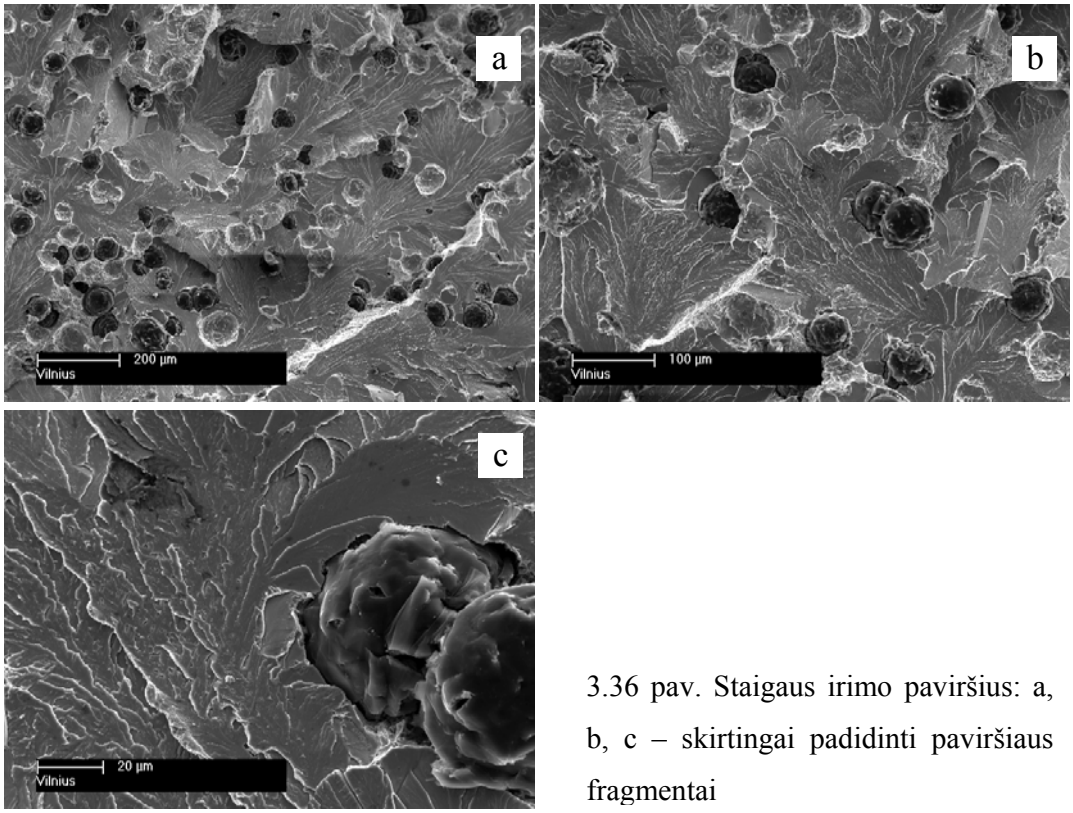
3.35 pav. Tarpkristalinis irimas pagrindiniame metale: a, b, c, d, e – skirtingo padidinimo lūžio paviršiaus fragmentai

Vienu metu lūžyje esantys nuovargio ir vienkartinio trūkio ruožai priklauso nuo medžiagos nevienalytiškumo. Todėl plastiškesnio irimo ruožai susidaro pagal nuovargio irimo mechanizmą. Trapesni ruožai susidaro pagal vienkartinį mechanizmą.

Aišku, kad feritinėse struktūrose plyšys plis lėčiau nei perlitinėse. Perlito-ferito struktūrose plyšio plitimo greitis bus mažesnis nei struktūrose vien tik iš perlito. Geresnės kokybės struktūros liejiniams, kurie neturi mikroįtrūkimų-porų ne didesnių kaip 500 μm, tai gali būti žymus veiksnys. Taip yra dėl defektų ir mikrostruktūros tarpusavio sąveikos, kai defektas yra mikrostruktūriškai trumpas. Tai svarbu, kai gaminių ilgaamžiškumas viršija 10^7 ciklų.

Galima konstatuoti, kad ten, kur struktūros defektų beveik nėra, nuovargio plyšio plitimas priklauso nuo struktūros fazių apimties bei išsidėstymo.

Plyšio plitimas staigaus suirimo metu parodytas 3.36 paveiksle.



3.36 pav. Staigaus irimo paviršius: a, b, c – skirtingai padidinti paviršiaus fragmentai

Plyšio plitimo pagreitėjimai ir sulėtėjimai buvo pastebėti didėjant plyšio greičiui ir ilgiui. Trumpi plyšiai nustatyti žemiau plyšėjimo slenksčio. Stabdymai atsiranda ten, kur plyšio viršūnė prieidavo ferito perlito ribas. Taip plyšys stabdomas jam pereinant tarp perlito kolonijų pačiame perlite. Tačiau tiksli trumpų plyšių ir mikrostruktūros sąveika bei atsiradimas kol kas nežinomas. Plyšiui plintant jo kelyje gali pasitaikyti įvairūs barjerai, vienaip ar kitaip veikiantys plitimo kinetiką. Laikoma, kad tam tikromis sąlygomis šie struktūros defektai gerokai keičia atsparumą plyšio plitimui.

Vienfaziuose metaluose žymų poveikį greitų plyšių plitimui gali turėti grūdų ribos ir sudvejintos pasluoksnės. Todėl visai tikėtina, kad tąsios pasluoksnės sluoksniuotose medžiagose gali stabdyti irimą. Todėl reikia tirti magistralinio plyšio susidūrimo kampą su sluoksnių riba ir geometrinės formos sujungimo zonos plyšio plitimui.

Apibendrinant galima padaryti išvadą, kad nevienalytės terpės, susidarančios didelių gabaritų konstrukcijų elementų gamybos procesų metu, ypač esančios liejinių išoriniuose sluoksniuose, blogina ketaus atsparumo irimui rodiklius, o standartinė skaičiavimo metodika to beveik neįvertina. Nuovargio plyšiai atsiranda ir plinta jose greičiaus nei struktūrose be defektų. Todėl būtina, kad šią įtaką galėtų įvertinti projektuotojai ir pasiūlyti metodiką konstrukcijų elementų su liejimo defektais stiprumo skaičiavimui.

3.5. Konstrukcijų elementų stiprumo skaičiavimo metodikos patikslinimas

Žinoma, kad atsiradus ir plintant nuovargio plyšiams konstrukcijos elementas netenka stiprumo [81-92]. Kritinė būklė yra prasidėjęs nestabilus plyšio plitimas, kurio metu elementas galutinai suyra. Irimo mechanikos tikslas yra nustatyti kritinę konstrukcijos su plyšiu būseną, nusakančią plyšio plitimo arba neplitimo sąlygas. Tačiau kaip gi skaičiuoti konstrukcijos elemento stiprumą? Kai kurios detalės dirba su plyšiais 90% viso eksploatacijos laiko, o kai kurių detalių plyšiai gana dažnai tampa jų gedimo priežastimis. Labiausiai paplitę ilgaamžiškumo įvertinimai esant programiniam apkrovimui, pagrįsti tiesiniu ir netiesiniu santykinio ilgaamžiškumo sumavimu esant skirtingam apkrovimui. Šiuo atveju netiesiškumas įvertinamas įvedant pastovų koeficientą. Detalių su plyšiais inžineriniame skaičiavime susiduriama ne tiek su matematiniais, kiek su metodologiniais sunkumais. Taip yra ir dėl to, kad tiesinės irimo mechanikos rezultatai yra nepakankamai tikslūs esant trumpiems plyšiams ir todėl neleidžia galutinai išspręsti stiprumo klausimų. Pastebimas konstrukcijų stiprumo skaičiavimo metodų, įvertinančių medžiagos atsparumo irimui savybes ir neprieštaraujančių eksploataciniams stebėjimams, trūkumas.

Konstrukcijų elementams, eksploatacijos metu veikiamiems cikliškai pasikartojančios apkrovos, būtina nustatyti plyšio neplitimo sąlygas jau atsiradus plyšiams. Irimo mechanikos taikymas šiuo atveju suvedamas į įtempimų intensyvumo koeficiento K_{th} skaičiavimą. Šis parametras leidžia rasti įtempimų, prie kurių tolimesnis plyšio plitimas medžiagoje nevyktų, lygį. Plyšėjimo slenksčiai prie skirtingų ciklo asimetrijos koeficientų siejami tokia priklausomybe [6]:

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0}\left(1-r\right)^{\gamma}, \tag{3.24}$$

čia ΔK_{th} – plyšėjimo slenksčio įtempimų intensyvumo koeficientas, esant bet kokiam teigiamam ciklo asimetrijos koeficientui r, ΔK_{th0} – plyšėjimo slenksčio įtempimų intensyvumo koeficientas, kai $r = 0$, γ – medžiagos savybes nusakantis rodiklis, ketui $\gamma = 1$.

Plyšėjimo slenkstį, kai $r = 0$, galima apskaičiuoti taip:

$$\Delta K_{th0} = \frac{\Delta K_{th}}{(1-r)^{\gamma}}. \tag{3.25}$$

Bet kokį teigiamą ciklo asimetrijos koeficientą, atitinkantį plyšėjimo slenksčio įtempimų intensyvumo koeficientą $\Delta K_{th}^{'}$, galima apskaičiuoti taip:

$$\Delta K_{th}^{'} = \frac{\Delta K_{th}}{(1-r_{th})^{\gamma}}(1-r)^{\gamma}, \tag{3.26}$$

arba

$$\Delta K_{th}^{'} = \Delta K_{th}\left(\frac{1-r}{1-r_{th}}\right)^{\gamma}, \tag{3.27}$$

čia r – esama ciklo asimetrija, r_{th} – ciklo asimetrija, prie kurios buvo nustatytas plyšėjimo slenkstis.

Eksploatacijos metu įtempimai konstrukcijos elemento plyšio viršūnėje skaičiuojami iš deformacijų ir lyginami su leistinais, kurie šiuo atveju atitinka plyšėjimo slenksčio įtempimų intensyvumo koeficientą ΔK_{th}. Leistinieji įtempimai, atitinkantys plyšėjimo slenksčio įtempimų intensyvumo koeficientą, išreiškiami iš žinomos irimo mechanikoje [1, 2, 5, 6] formulės:

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}\, f(\alpha). \tag{3.28}$$

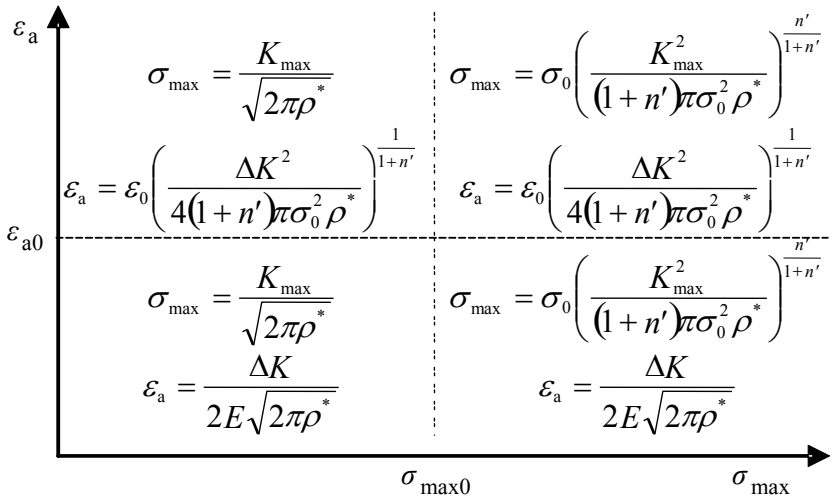
Įtempimų kitimo intervalas, atitinkantis plyšėjimo slenksčio įtempimų intensyvumo koeficientą, įvertinant ciklo asimetriją, apskaičiuojamas iš formulių 3.27 ir 3.28:

$$\Delta\sigma_{th}^{'} = \frac{\Delta K_{th}}{\sqrt{\pi a}}\left(\frac{1-r}{1-r_{th}}\right)^{\gamma} f(\alpha). \tag{3.29}$$

Formulė (3.28) galioja, kai $r > 0$. Realiose konstrukcijose gali būti atvejų, kai $r < 0$. Tuomet dažniau naudojamas maksimalus įtempimų intensyvumo koeficientas $K_{\max}$. Ryšys tarp šių parametrų išreiškiamas tokia priklausomybe:

$$K_{max} = \frac{\Delta K}{1-r}. \tag{3.30}$$

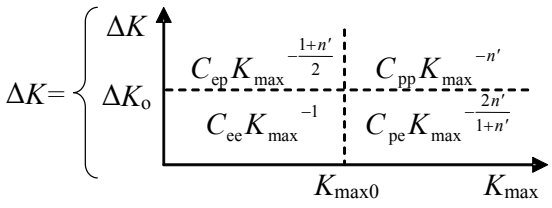
Norint pritaikyti vieningą skaičiavimo metodiką, reikia nustatyti ryšį tarp dviejų irimo mechanikos rodiklių ΔK ir $K_{\max}$. Teoriškai gali būti keturi skirtingi santykio ryšiai tarp konkrečių ΔK ir $K_{\max}$ kombinacijų, kurias galima išreikšti tokiu pavidalu [92]:



(3.31)

čia ε_0 ir σ_0 – takumo įtempimų deformacija ir įtempimai.

Šios sistemos sprendinį galima išreikšti ir tokia forma:



(3.32)

čia koeficientai C_{pp}, C_{ee}, C_{ep}, C_{pe} apskaičiuojami iš formulių:

$$C_{pp} = 2\left((1+n')\pi E\rho^* \mathrm{SWT}\right)^{(1+n')/2}, \tag{3.33}$$

$$C_{\text{ee}} = 4E\pi\rho^{*}\,\text{SWT}, \tag{3.34}$$

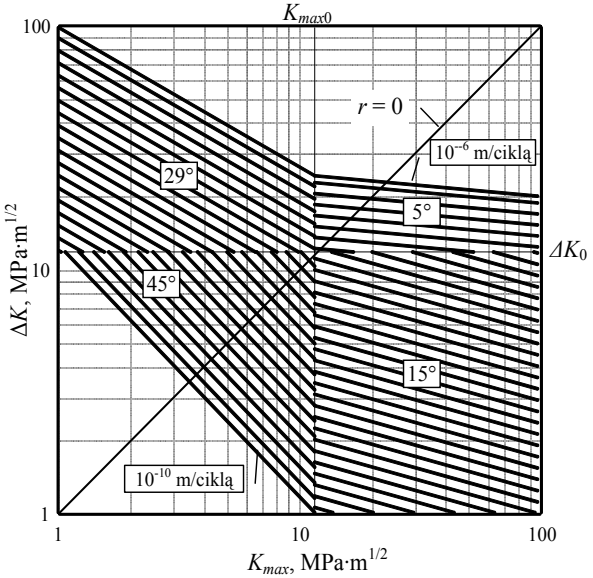
$$C_{\text{ep}} = \left(\text{SWT}\,\frac{\sqrt{2\pi\rho^{*}}\left(4\left(1+n'\right)\pi\sigma_0^2\rho^{*}\right)^{(1+n')/2}}{\varepsilon_0} \right), \tag{3.35}$$

$$C_{\text{ep}} = 2\text{SWT}\,\frac{\sqrt{2\pi\rho^{*}}\left(\left(1+n'\right)\pi\sigma_0^2\rho^{*}\right)^{n'/(1+n')}}{\varepsilon_0}, \tag{3.36}$$

$$\text{SWT} = \sigma_f^{'}\varepsilon_f^{'}\left(\frac{2\rho^{*}}{da/dN}\right)^{b+c} + \frac{\sigma_f^{'2}}{E}\left(\frac{2\rho^{*}}{da/dN}\right)^{2b}. \tag{3.37}$$

čia SWT – Smito-Watsono-Topperio parametras, ρ^{*} – irimo plotas, n’ – deformacijos stiprėjimo eksponentė, b ir c – medžiagos parametrai.

Iš šių formulių galima nubraižyti diagramą, pavaizduotą 3.37 paveiksle.



3.37 pav. Ryšys tarp rodiklių ΔK ir K_{max}

Ciklo asimetrija daro įtaką nuovarginiam irimui. Tai siejama su plyšio užsivėrimo reiškiniu ir efektyviuoju įtempimų intensyvumo koeficientu K_{eff}. Tuo tarpu ketaus stiprumo ribos tempiant ir gniuždant skiriasi ($3\sigma_{ut} \approx \sigma_{uc}$). Todėl ciklo asimetrijos įtaka plyšio plitimui neaiški ir mažai tyrinėta. Maksimalūs įtempimai, atitinkantys plyšėjimo slenkstį, apskaičiuojami pagal tokią formulę:

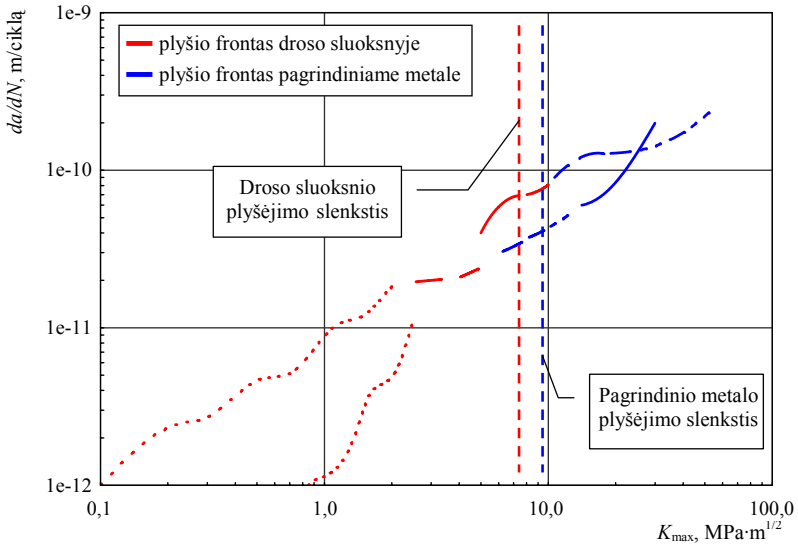
$$\sigma_{\max,th} = \frac{\Delta K_{th}}{\sqrt{\pi a}} \frac{(1-r)^{\gamma}}{(1-r)^{1+\gamma}} f(\alpha). \tag{3.38}$$

Šiuo atveju veikiančių įtempimų intervalas atitinka maksimalius ciklo įtempimus $\Delta\sigma_{th} = \sigma_{\max,th}$.

Reikia nepamiršti, kad sluoksniuotose medžiagose įtempimai pasiskirsto kitaip nei vienalytėje medžiagoje. Jeigu nagrinėjama konstrukcijos elemento dalis turi stačiakampį skerspjūvį, tuomet įtempimai priklauso nuo sluoksnių:

$$\sigma_{\max,th} = \frac{M_{\max} E_i}{\sum_{i=1}^{n} E_i I_i} y_i. \tag{3.39}$$

Pasinaudojus (3.38) išraiška, buvo perskaičiuotas ΔK_{th} – specialiajam sluoksniui – 8,1 MPa·m$^{1/2}$, pagrindiniam metalui – 9,8 MPa·m$^{1/2}$. Diagramos, parodytos 3.17–3.18 paveiksluose, peskaičiuotos ir pateikiamos pateikiama 3.38 paveiksle.



3.38 pav. Perskaičiuota plyšio plitimo greičio priklausomybė nuo įtempimų intensyvumo koeficiento

Iš 3.38 paveikslo matosi, kad plyšius, esančius į kairę nuo plyšėjimo slenksčių, galima priskirti prie trumpų. Plyšiai laikomi ilgais, kai šių viršūnėje atsiranda plastinė deformacija ir

ima galioti tiesinės irimo mechanikos dėsningumai [54]. Kai medžiagoje atsiranda ilgi plyšiai, t. y. $a > a_i$, jų plitimą lemia prieširiminės zonos dydis ρ^*. Jis priklauso nuo medžiagos mikrostruktūros, ir yra gerokai didesnis nei struktūros grūdai. Plyšio plitimas tada priklauso nuo dviejų parametrų, įtempimų lygio vietinėse zonose ir plastinės zonos dydžio, kuris dar siejamas su plastinio sukietinimo reiškiniu plyšio viršūnėje. Kai prieširiminės zonos dydis viršija ilgų plyšių dydį $\rho^* > a_i$, plyšiai laikomi neplintančiais. Plyšiui viršijus ilgų plyšių dydį a_i, šių jautrumas mikrostruktūrai sumažėja, o plitimą ima veikti plyšio užsivėrimo reiškinys. Plyšio užsivėrimo reiškinys, turi didelę įtaką plyšio plitimo kinetikai arti plyšėjimo slenksčio. Didėjant medžiagos stiprumui, užsivėrimo reiškinio dalis plyšio plitimui mažėja. Žemiau plyšėjimo slenksčio plyšiai turi įveikti kiekvieną struktūros grūdą (defektą) atskirai, todėl plyšiai įgauna zigzago formą. Sumažėja normalaus atotrūkio komponentės įtaka, kuri yra laikoma pagrindine plyšio plitimo varomąja jėga ir padidėja šlyties komponentės įtaka. Taip pat reikia įvertinti, kad šakojantis plyšiui, didėja jo ilgis, kas taip pat reikalauja papildomos energijos ir veikia kaip stabdantis plyšio plitimą veiksnys. Taigi, plyšio trajektorijos vingiuotumas padidina plyšėjimo slenkstį.

3.6. Skyriaus išvados

1. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad veikiant daugiacikliam asimetriniam lenkimui, stipriojo sluoksniuotojo ketaus technologiškai pažeistame sluoksnyje intarpų ir kitų nevienalyčių darinių aplinkoje susidaro daug plyšio židinių, o magistralinis plyšys turi sudėtingą konfigūraciją.
2. Kompaktinių bandinių iš droso sluoksnio tyrimas parodė, kad dėl struktūros defektų šiame sluoksnyje vienu metu susidaro normalaus atotrūkio ir išilginės šlyties sąlygos plyšiui plisti, kurios iškraipo plyšio trajektoriją.
3. Remiantis sudarytomis plyšio plitimo greičio priklausomybėmis galima teigti, kad, nuovargio plyšiui pereinant tarp skirtingų savybių sluoksnių plyšio plitimas yra stabdomas.
4. Įtempimų intensyvumo koeficientai, apskaičiuoti įprastais skaitiniais metodais, skiriasi nuo eksperimentinių-analitinių, tai patvirtina medžiagos nevienalytiškumo įtaką.
5. Pasiūlyta daugiaciklio stiprumo skaičiavimo metodika rekomenduota pritaikyti didelio gabarito ketaus liejinių projektiniams stiprumo skaičiavimams.

4. TERMINIO APDOROJIMO IR SLUOKSNIUOTUMO ĮTAKA PLYŠĖJIMO SLENKSČIUI

Šiame skyriuje analizuojama, kokią įtaką nuovargio plyšių plitimui daro terminis apdorojimas, po kurio medžiagoje išlieka zonos su nevienodu mechaniniu būviu. Analizuojama dviejų rūšių termiškai apdoroto ketaus eksperimentinių tyrimų medžiaga, struktūra, statinių mechaninių savybių rodikliai, jų ryšys su atsparumo plyšėjimui rodikliais.

Norint pagerinti mechanines savybes, ketaus liejiniams gali būti taikomi įvairūs terminio ar termocheminio apdorojimo procesai. Normalizuojant minkštas feritinis ketaus struktūros pagrindas pakeičiamas perlitiniu. Padidėja kietumas, stiprumas, atsparumas dilimui. Didelio sienelių storio ir sudėtingos konfigūracijos liejiniams vienas iš terminio apdorojimo ypatumų yra toks, kad kai kuriose jų vietose gali išlikti nepakitusios arba nepakankamai pakitusios struktūros ir defektai, kurių nustatymas neardančios kontrolės metodais yra neįmanomas. Todėl reikia ištirti, kaip tokia struktūra su išlikusiais termiškai nepaveiktais tūriais priešinasi nuovargio plyšių atsiradimui ir plitimui bei numatyti būdus šiai įtakai įvertinti skaičiuojant konstrukcinių elementų stiprumą [93-96, 108].

4.1. Struktūra ir mechaninių savybių rodikliai

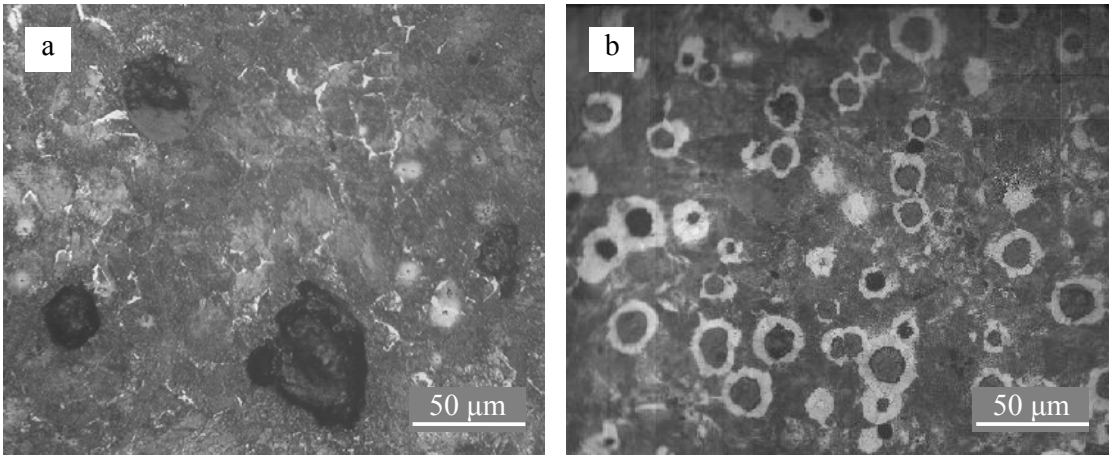
Eksperimentiniam tyrimui paruoštos dviejų rūšių ketaus (GI ir SGI) dvi lietos ir dvi normalizuotos plokštės. Cheminė šių ketų sudėtis pateikta 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Cheminė sudėtis

Ketaus rūšis	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cu	Cr
	%						
GI	3,64	1,75	0,87	0,497	0,52	0,518	0,062
SGI	4,96	1,17	0,083	0,68	0,19	1,01	–

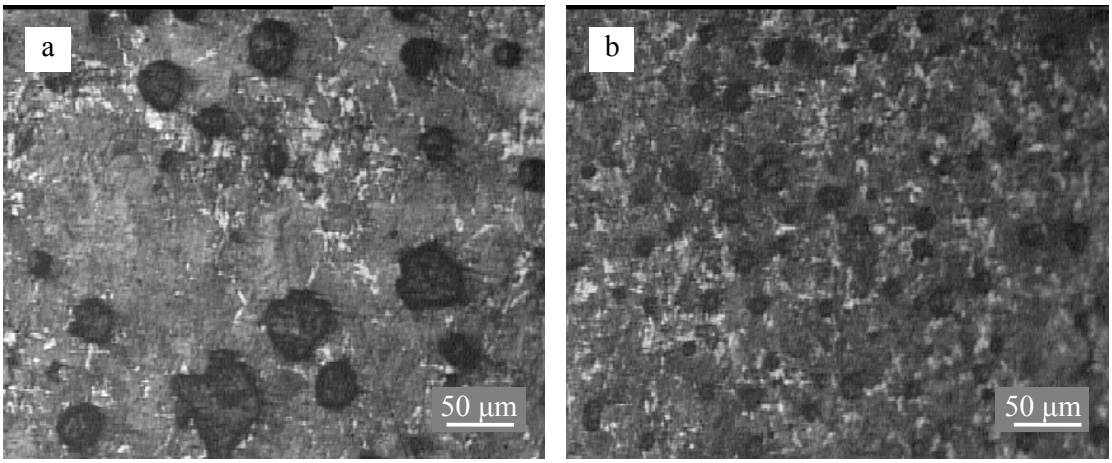
Cheminės sudėties modeliavimas ir liejimo procesas atliktas liejyklose ir skiriasi nuo žinomų panašios paskirties ketų, naudojamų Amerikoje, Vokietijoje ir Australijoje [19].

Lieto GI ketaus struktūra parodyta 4.1 a paveikslėlyje. Grafitas yra įvairaus dydžio, dribsnių pavidalu, struktūros matrica feritas–perlitas. Kai kuriose vietose susiformavęs rutulinio pavidalo grafitas. Normalizuoto GI ketaus struktūra parodyta 4.1 b paveikslėlyje. Struktūra smulkiagrūdė, grafitas yra rutulio formos, struktūros pagrindas perlitas su nedideliu ferito kiekiu.



4.1 pav. GI ketaus mikrostruktūros: a – lieto, b – normalizuoto

Lieto SGI ketaus struktūra parodyta 4.2 a paveiksle. Struktūrą sudaro įvairaus dydžio dribsnių ir rutulio pavidalo grafitas. Matrica perlitinė su netolygiai išsidėsčiusiu feritu, pasitaiko beinito. Struktūra po normalizacijos parodyta paveiksle 4.2 b Ją sudaro rutulinis grafitas, smulkiagrūdis perlitas, beinitas ir feritas. Kaip matome, normalizacija suvienodina ir susmulkina struktūrą, o gaunamas rutulinis grafitas yra panašaus dydžio (GI ir SGI).



4.2 pav. SGI ketaus mikrostruktūros: a – lieto, b – normalizuoto

Iš visų plokščių pagaminti cilindriniai tempimo bandiniai. Nustatyti statinių mechaninių savybių rodikliai, pateikti 4.2 lentelėje. Nustatytas lieto GI ketaus kietumas: 250 ... 277 BHN, normalizuoto – 228 ... 256 BHN ir lieto SGI ketaus kietumas – 289 ... 311 BHN, normalizuoto

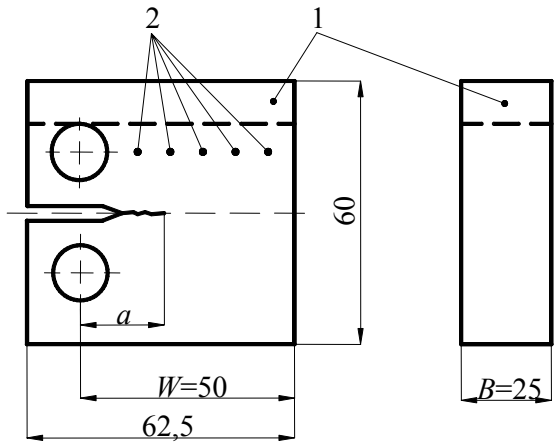
– 290 ... 317 BHN. Kaip matome, terminio apdorojimo procese kietumas pasikeičia nedaug. Terminio apdorojimo procesas susideda iš normalizacijos ir atleidimo ir atitinka realių konstrukcijų technologinio proceso sąlygas.

4.2 lentelė. Mechaninių savybių rodikliai

Ketus		Takumo įtempimai $R_{p0,2}$(MPa)	Stiprumo riba R_m (MPa)	Santykinis pailgėjimas, A (%).
GI	Lietas	443 ... 503	622 ... 671	1,80 ... 2,43
	Normalizuotas	454 ... 467	684 ... 727	6,13 ... 10,3
SGI	Lietas	630 ... 634	863 ... 933	3,70 ... 6,70
	Normalizuotas	607 ... 621	862 ... 882	3,60 ... 4,00

4.2. Eksperimentinis plyšėjimo rodiklių nustatymas

Plyšėjimo slenksčio nustatymui iš GI ir SGI ketaus išpjauti kompaktiniai necentrinio tempimo bandiniai (W = 50 mm ir B = 25 mm) parodyti 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Kompaktinis necentrinio tempimo bandinys: 1 – bandinio dalis tempimo bandiniams; 2 – kietumo matavimo taškai

Siekiant nustatyti plyšėjimo slenkstį, pagal 2.1 poskyryje aprašytą metodiką išbandyti 8 lieto, 8 normalizuoto GI ketaus ir 4 lieto bei 4 normalizuoto SGI ketaus bandiniai. Šiam tikslui naudojamas necentrinio tempimo plokščias bandinys su įpjova (CT bandinys). Įtvirtintas bandymų mašinos griebtuose, bandinys apkraunamas cikline apkrova. Bandymų metu plyšio

gyliai buvo matuojami bandinio šonuose mikroskopu. Skaičiavimui naudojamas plyšio gylis nustatytas, įvertinus plyšio kontūro netiesiškumą lūžyje. Plyšėjimo slenkstis nustatytas palaipsniui ir diskretiškai mažinant apkrovą kaip to reikalauja standartai. Šiame tyrime analizuojamos plyšėjimo slenksčio reikšmės, kai plyšio plitimo greitis artimas 10^{-12} m/ciklą. Sudarytos plyšio greičio priklausomybės nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo. Koeficiento ΔK (įtempimų intensyvumo koeficiento kitimo intervalas per vieną apkrovimo ciklą) skaičiavimui panaudota tokia formulė:

$$\Delta K = \frac{\Delta F}{B \cdot W^{1/2}} f(\lambda), \tag{4.1}$$

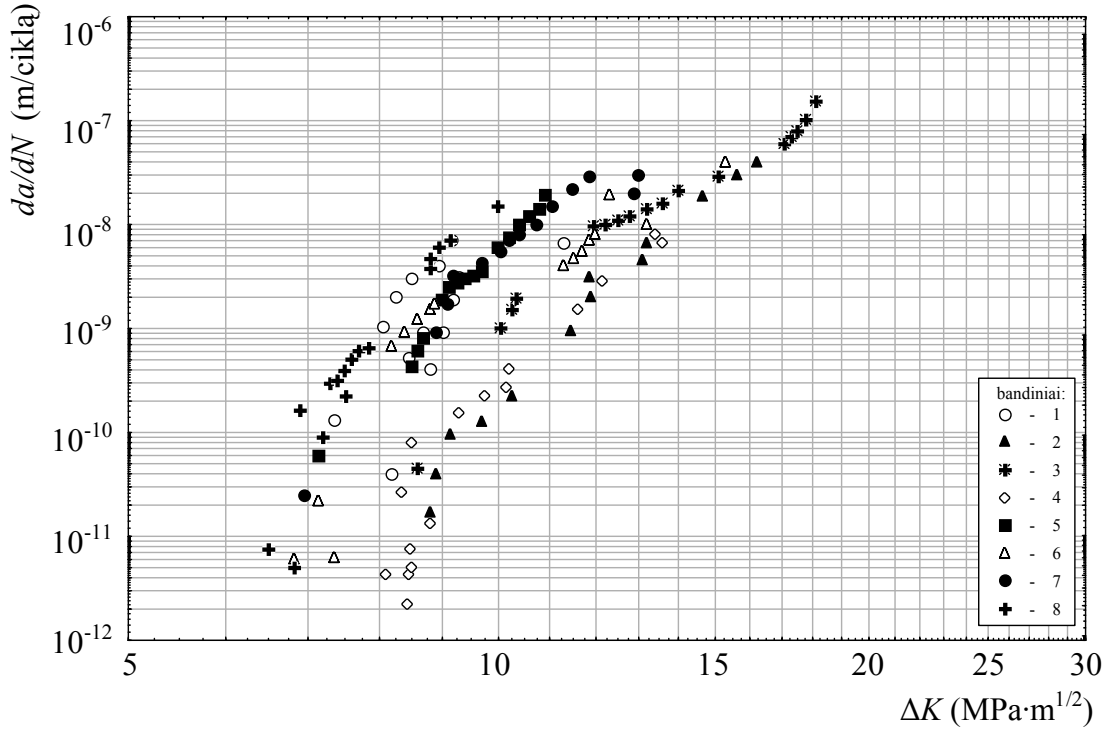
čia ΔF – apkrovos intervalas (skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios ciklo metu veikiančios jėgos), B – bandinio storis (4.3 pav.), W – bazinis bandinio ilgis, $f(\lambda)$ – geometrinė funkcija, skaičiuojama taip:

$$f(\lambda) = \frac{(2+\lambda)}{(1-\lambda)^{3/2}}\left(0{,}886 + 4{,}64\lambda - 13{,}32\lambda^2 + 14{,}72\lambda^3 - 5{,}6\lambda^4\right). \tag{4.2}$$

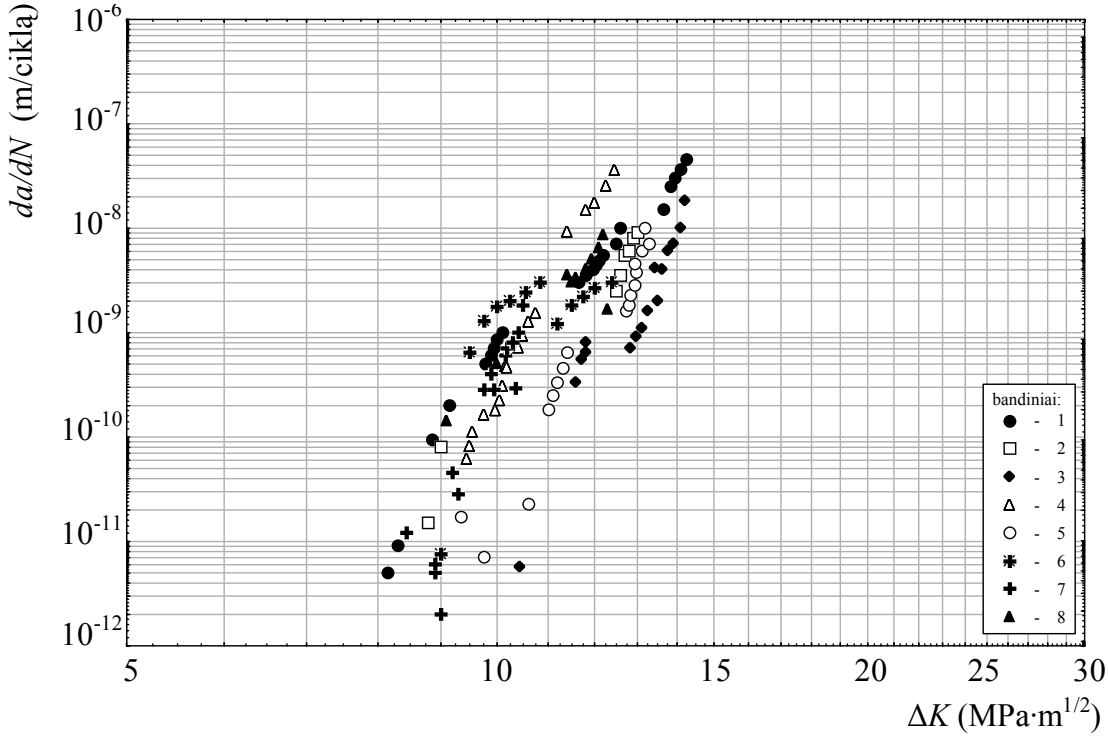
čia $\lambda = a/W$, a – plyšio gylis.

Bandinių iš GI lieto ketaus plyšio plitimo greičio priklausomybės nuo įtempimų intensyvumo koeficiento pateiktos paveikslėlyje 4.4. Normalizuoto ketaus plyšio plitimo greičio priklausomybė nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo pateikta 4.5 paveiksle. Plyšėjimo slenkstis lietam ketui ΔK_{th} = 6,5 ... 8,6 MPa $\cdot$ m$^{1/2}$; normalizuotam ketui ΔK_{th} = 8,2 ... 10,3 MPa $\cdot$ m$^{1/2}$. Šie duomenys rodo, kad normalizacija padidina atsparumą plyšio susidarymui ir plitimui t. y. padidina plyšėjimo slenkstį.

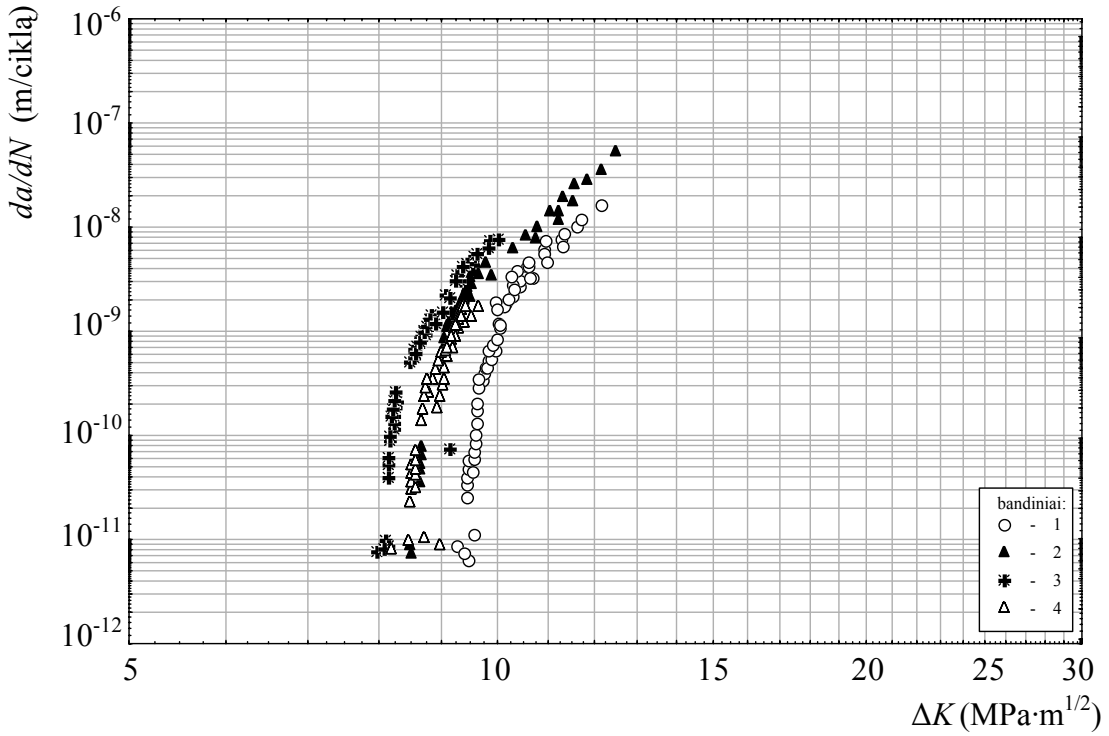
Bandinių iš SGI lieto ketaus nuovargio plyšio plitimo greičio priklausomybė nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo pateikta 4.6 paveiksle. Bandinių iš normalizuoto ketaus plyšio plitimo greičio priklausomybė nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo pateikta paveiksle 4.7.



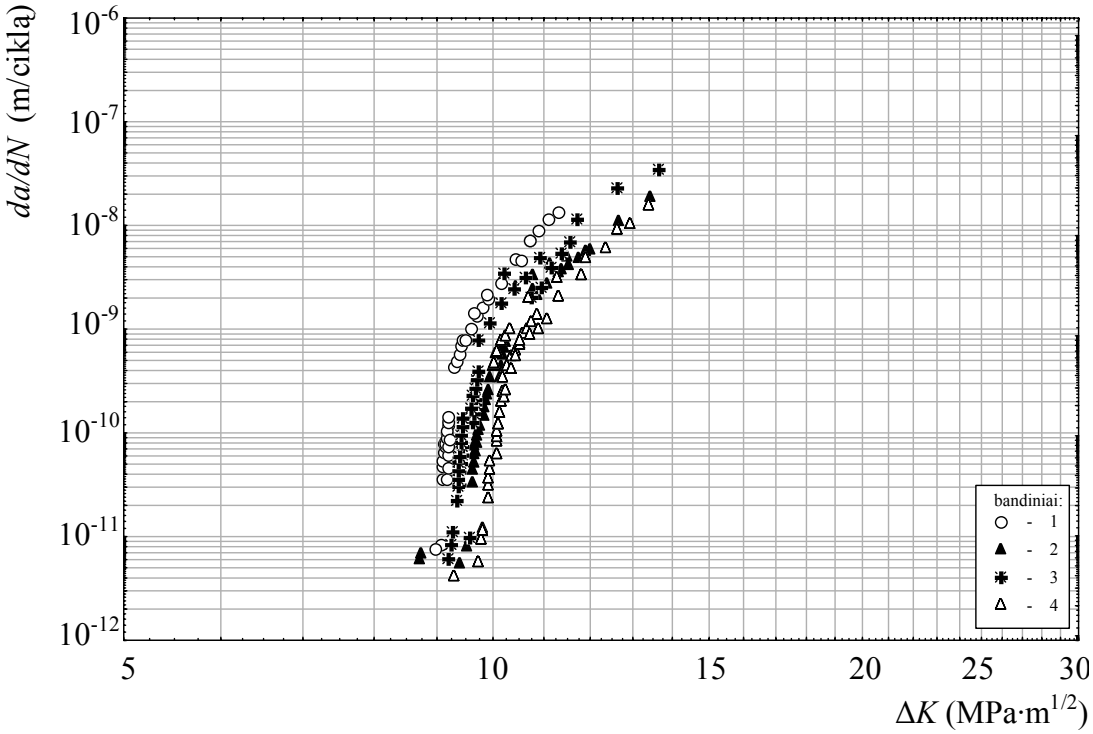
4.4 pav. Lieto GI ketaus plyšio plitimo priklausomybė nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo



4.5 pav. Normalizuoto GI ketaus plyšio plitimo priklausomybė nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo



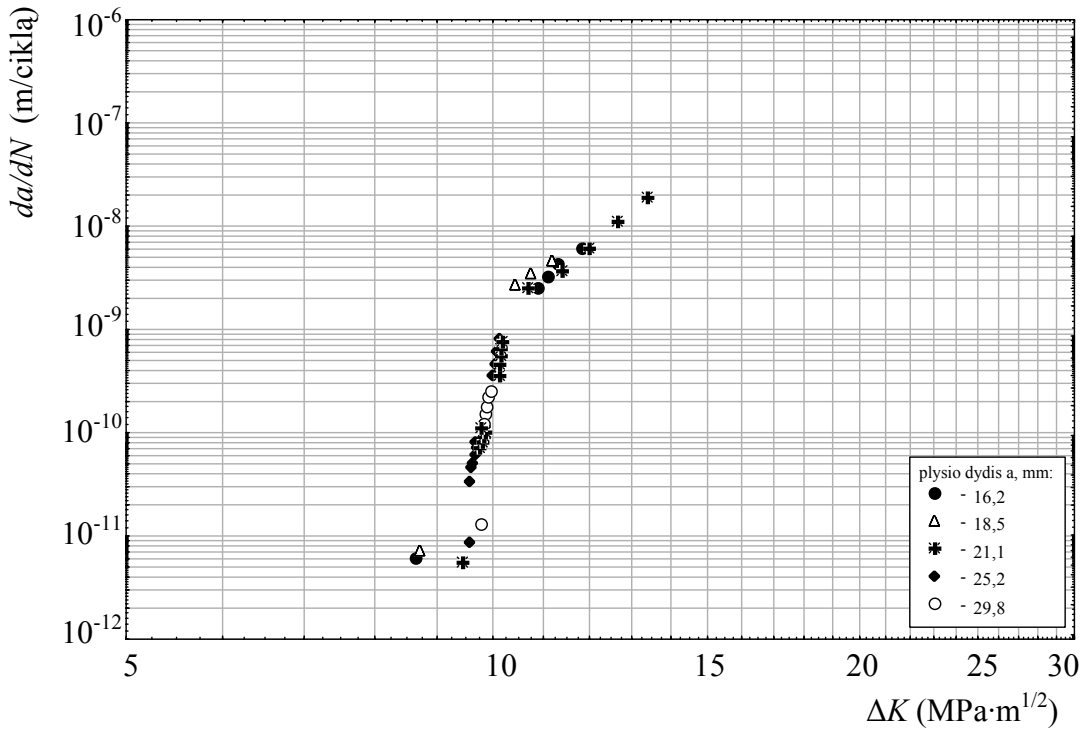
4.6 pav. Lieto SGI ketaus plyšio plitimo priklausomybė nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo



4.7 pav. Normalizuoto SGI ketaus plyšio plitimo priklausomybė nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo

Plyšėjimo slenkstis lietam SGI ketui ΔK_{th} = 8,0 ... 9,6 MPa · $m^{1/2}$; normalizuotam SGI ketui ΔK_{th} = 8,7 ... 9,8 MPa · $m^{1/2}$.

Iš plyšio plitimo greičio nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo priklausomybių, parodytų 4.4 ... 4.7 paveiksluose, matyti, kad kai kuriuose bandiniuose, esant skirtingam plyšio gyliui, gaunami nevienodi plyšėjimo slenksčiai: didėjant nuovargio plyšio gyliui, didėja ribinė įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo reikšmė. Norint paaiškinti šį reiškinį ir patikrinti, ar rezultatų nelėmė atsitiktiniai veiksniai, buvo atlikti papildomi bandymai su normalizuotu SGI ketaus kompaktiniu bandiniu. Sudaryta plyšio plitimo greičio priklausomybė nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo parodyta 4.8 paveiksle. Matome, kad skirtingus plyšio gylius (16,2, 18,5, 21,1, 25,2, 29,8 mm) atitinka skirtingos ΔK_{th} reikšmės. Tam tikras skirtumas gali susidaryti dėl plyšio fronto, įtempimų būvio plyšio viršūnėje, kurį sukelia nevienalytė struktūra po terminio apdorojimo, dėl ko keičiasi irimo mechanizmas. Irimo mechanizmui nustatyti būtini specialūs tyrimai plyšėjimo slenksčio aplinkoje.



4.8 pav. Papildomo kompaktinio bandinio iš SGI ketaus plyšio plitimo priklausomybė nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo

4.3. Tyrimų analizė

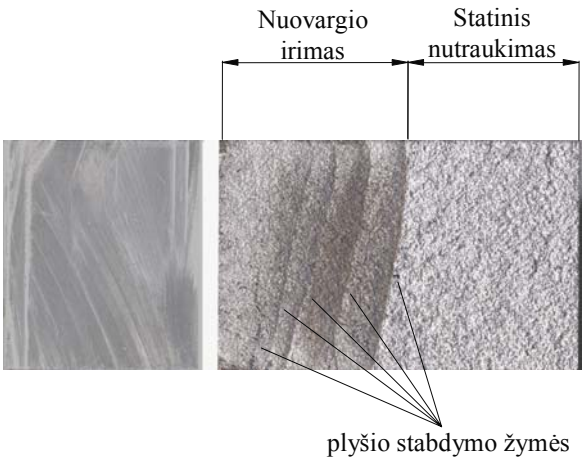
Iš įvairių terminio apdorojimo būdų stipriojo ketaus struktūrai pakeisti plačiai taikoma normalizacija, kuri su po to sekančiu atleidimu lemia smulkesnio perlito susidarymą ir sferoidizuoja struktūros matricoje įsiterpusius grafito intarpus. Sferoidinis mažo dydžio grafitas sumažina įtempimų koncentracijas, padidina plyšėjimo slenkstį. Normalizacijos procesu siekiama gauti mikrostruktūras su perlitine matrica, tačiau paprastai išlieka dalis ferito, kuris yra minkštas ir nelabai pageidautinas. Ferito matrica aplink grafito rutulėlius neigiamai veikia mechanines savybes: mažina kietumą ir stiprumą. Perlitinė matrica, būdama kietesnė bei stipresnė už ferito, padidina mechaninių savybių rodiklius, o tuo pačiu ir atsparumą nuovargiui. Atsparumas daugiacikliam nuovargiui padidėja, kai mikrostruktūra smulki. Esant ilgesniems plyšiams, kai plyšio plitimas siejamas su plyšio užsivėrimu, plyšio plitimui geriau priešinasi stambiagrūdė struktūra.

Normalizacija turi garantuoti mikrostruktūros pasikeitimą visame dideliame tūryje. Tačiau didelio gabarito gaminių terminio apdorojimo procesą sunku kontroliuoti, o turimos technologinės priemonės negarantuoja struktūros pokyčio kiekviename kūno mikrotūryje.

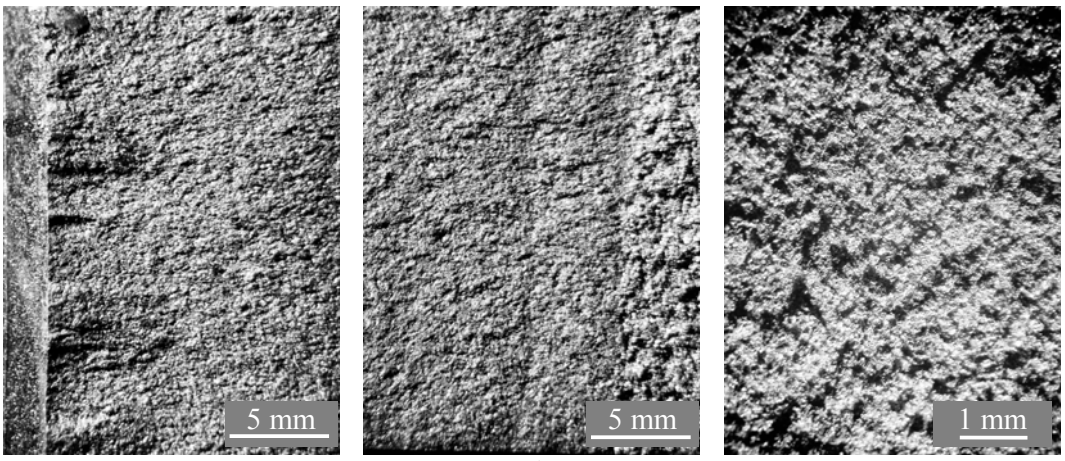
Fraktografinė lūžių analizė pateikia daug informacijos apie suirimo procesą. Papildomo bandinio lūžis parodytas 4.9 paveiksle (3 priedą). Plyšio susidarymo ir nuovarginio plitimo paviršius parodytas 4.10 a paveiksle. Lūžio struktūra turi trapaus suirimo pobūdį, kuris vyksta, kai tarpgrūdeliniai ryšiai dėl vienokių ar kitokių priežasčių (užteršti tarpgrūdeliniai sluoksniai, trapių antrinių fazių buvimas, legiravimo priedų segregacija ir kt.) yra silpnesni už struktūros grūdus. Bandinio išdrožos viršūnėje yra daug plyšio židinių (iki 1 mm ilgio), kurie įvairiame gylyje (1 ... 5 mm) susijungė į magistralinį plyšį. 4.10 b paveiksle parodyta vidurinė lūžio dalis. Pastebimos plyšio stabdymo linijos susidarė dėl apkrovos pasikeitimo. Plotai, esantys arti plyšio stabdymo vietų, yra skirtingo šiurkštumo. Vagotumas bei skirtingos plyšio stabdymo linijos rodo nevienodą plyšio fronto plitimą ir tam tikrą struktūros nevienalytiškumą

CT bandinio statinio laužimo paviršius parodytas 4.10 c paveiksle. Lūžio paviršius turi trapaus irimo pobūdį. Lūžyje matyti duobučių, kurios susidaro ertmių vietoje, o aplink – keteros sąsajų vietoje. Ertmės susidaro iš mikroporų, mikrotuštumų ir mikroįtrūkimų, esančių medžiagoje arba atsiranda didėjant deformacijoms. Jų dugne galima aptikti nevienalytiškumo darinių. Trapūs ruožai susidaro perlite, o plastiniai – ferite.

Plyšio auginimo ir stabdymo procedūros metu keičiasi irimo charakteris. Mažinant plyšio augimo greitį iki 10^{-12} m/ciklą, plyšėjimo slenkstis didėja, tačiau irimo mechanizmas tampa neaiškus, kaip ir jo ryšys su mikrostruktūra [93–97].



4.9 pav. 4 bandinio lūžis



4.10 pav. Irimo paviršius: a – nuovargio plyšio atsiradimo vieta, b – vidurinė irimo dalis, c – statinio nutraukimo paviršius

Nustačius atsparumo plyšio plitimui rodiklius, galima bus parinkti atsargos koeficientus, garantuosiančius nevienalytės medžiagos taikymą atsakingų detalių gamybai.

4.4. Mechaninių savybių ir plyšėjimo rodiklių analizė bei stiprumo skaičiavimas

Nustatytos kiekvieno CT bandinio mechaninės savybės, panaudotos ryšiui tarp plyšėjimo slenksčio ir stiprumo-takumo įtempimų santykio ($R_m/R_{p0,2}$) nustatyti.

Darbuose [98–101] bandoma rasti ryšį tarp plyšėjimo slenksčio ΔK_{th}, takumo įtempimų σ_y, stiprumo ribos σ_u, patvarumo ribos σ_R ir kitų rodiklių. Plyšėjimo slenkstis ΔK_{th} taip pat

priklauso nuo ciklo asimetrijos, temperatūros, aplinkos poveikio, perkrovimų, medžiagos struktūrinių ypatumų ir kitų veiksnių. Tačiau trūksta duomenų apie ΔK_{th} priklausomybę nuo mechaninių savybių ir struktūros, kuri gali būti keičiama terminio apdorojimo procese.

Irimo mechanikoje įtempimų intensyvumo koeficiento bendra išraiška [1, 2, 5, 6]:

$$K_{\mathrm{I}} = Y \cdot \sigma \sqrt{a + a_0} \ , \tag{4.3}$$

čia Y – geometrinis veiksnys; σ – įtempimai; a – plyšio gylis; a_0 – struktūros defekto dydis.

Tam atvejui, kai a = 0, $\sigma = \sigma_{\mathrm{R}}$ (patvarumo riba), $K_{\mathrm{I}} = \Delta K_{th}$ turėsime ribinį įtempimų intensyvumo koeficientą:

$$\Delta K_{th} = Y \cdot \sigma_R \sqrt{a_0} \ . \tag{4.4}$$

Atsparumas plyšio susidarymui ir plitimui priklauso nuo daugelio veiksnių ir lemia konstrukcijos elemento ilgaamžiškumą – tiesiogiai priklauso nuo mikrostruktūros ir defektų (pašalinių intarpų, tuštumų, slinkties juostų, gamybos ir eksploatacijos defektų). Plyšių plitimo greičių priklausomybių nuo įtempimų intensyvumo koeficiento, pateiktų 4.4-4.7 paveiksluose, analizė rodo pakankamai didelį ir neaiškų plyšėjimo slenksčių išsibarstymą, kuris gali būti nulemtas nevisai vienodos struktūros, ką patvirtina ir statinių mechaninių savybių rodiklių platus išsibarstymas. Pagal gautus eksperimentinius duomenis nustatytas ryšys tarp plyšėjimo slenksčio ΔK_{th} ir mechaninių savybių rodiklių santykio $R_m/R_{p0,2}$ kiekvienam CT bandiniui, pateiktas 4.11 paveiksle.

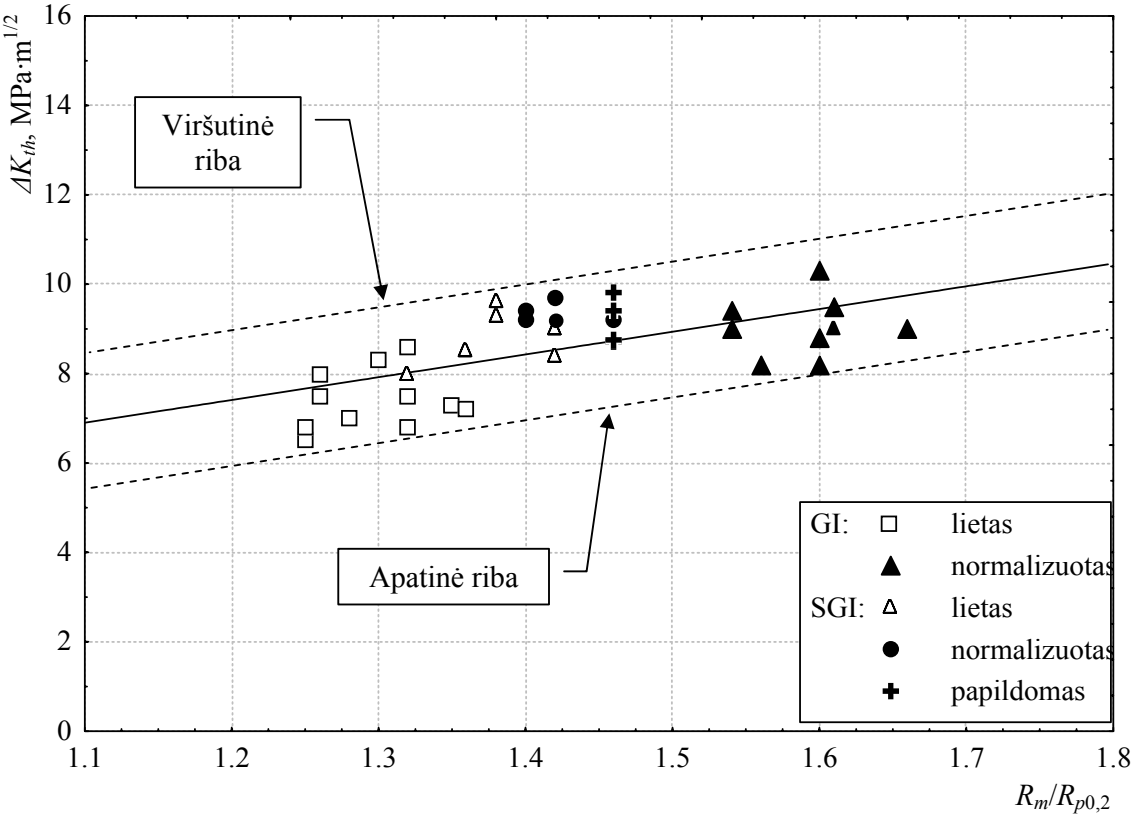
Apdorojus gautus razultatus statistiškai, tiesinės regresijos metodu nustatyta tiesinė priklausomybė $R_m/R_{p0,2}$ nuo plyšėjimo slenksčio ΔK_{th}:

$$\Delta K_{th0} = 5{,}1 \frac{R_m}{R_{p0,2}} + 1{,}3 \ . \tag{4.5}$$

Ištirtai medžiagų grupei galima išvesti dvi papildomas aproksimacines tieses, apimančias visas eksperimetiškai gautas reikšmes:

$$\Delta K_{th0} = 5{,}1 \frac{R_m}{R_{p0,2}} + 2{,}7 \ , \tag{4.6}$$

$$\Delta K_{th0} = 5{,}1\frac{R_m}{R_{p0,2}} + 0{,}059\,. \tag{4.7}$$



4.11 pav. Priklausomybė tarp ΔK_{th} ir $R_m/R_{p\,0,2}$

Gautas formulės (4.5) koreliacijos koeficientas, lygus 0,62, patvirtina pakankamai gerą tiesinės priklausomybės buvimą. Skaičiavimo pagal formulę (4) rezultatai palyginti su eksperimentiškai gautais ir pateikti 4.3 lentelėje. Eksperimentinės plyšėjimo slenksčio reikšmės paimtos iš plyšio plitimo greičio priklausomybės nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo diagramų. Pagal ASTM reikalavimus plyšėjimo slenksčio reikšmės imamos, kai plyšio greitis yra 10^{-10} m/ciklą. Tačiau kalnakasybos įrenginių ilgaamžiškumui užtikrinti plyšėjimo slenksčio reikšmė imama nuo 10^{-10} m/ciklą iki 10^{-12} m/ciklą. Skaičiuojamosios $\Delta K_{th,\text{skaič}}$ reikšmės apskaičiuotos pagal formulę (4.5). Papildomi taškai 3 lentelėje charakterizuoja plyšėjimo slenksčių išsibarstymą. Galima pastebėti, kad lieto ketaus bandinių plyšėjimo slenksčių reikšmės nuo išvestos priklausomybės skiriasi labiau nei normalizuotų.

Plyšėjimo slenkstis ΔK_{th} taip pat priklauso ir nuo ciklo asimetrijos, temperatūros, aplinkos poveikio, perkrovimų, nevienalytiškumo ir kitų veiksnių. Tai siejama su tuo, kad didesni vidutiniai įtempimai lemia didesnį plyšio plitimo greitį. Tyrimai [3-4] rodo plyšėjimo slenksčio ΔK_{th} ir nuovargio plyšio plitimo greičio didėjimą, kintant ciklo asimetrijos koeficientui nuo 0 iki 0,9. Esant didesniems ciklo asimetrijos koeficientams (r > 0,6 ... 0,7), irimo procesas pasikeičia: irimo mechanizmas ima artėti prie statinio irimo. Kadangi plyšys apkrovimo ciklo metu išlieka visą laika atvertas, tai ribinis intervalas ΔK_{th} ir nuovargio plyšio plitimo greitis, esant vienodam įtempimų intensyvumo koeficiento intervalui, tampa labiau nepriklausomi nuo asimetrijos. Esant labai mažam įtempimų kitimui (r > 0,9), ciklinis irimas tampa dar artimesnis statiniam irimui. Kinetinės nuovargio diagramos forma išsikreipia ir, pasiekus didesnes įtempimų reikšmes, staigiai nutrūksta. Esant neigiamai asimetrijai, jos poveikis ribiniam plyšėjimo slenksčio intervalui ΔK_{th} gerokai sumažėja, o tai susiję su plyšio užsivėrimu. Esant neigiamai ciklo asimetrijai, dažnai nepaisoma gniuždymo įtempimų, laikant $K_{\min} = 0$ ir $\Delta K = K_{\max}$.

Praktikoje kinetinės diagramos dažniausiai sudaromos prie palyginus mažų įtempimų intensyvumo koeficiento reikšmių (r = 0,05 … 0,2), nes didesnė ciklo asimetrija gali iškreipti plyšio plitimo kinetiką. Taikant neigiamus ciklo asimetrijos koeficientus, dažnai būna sudėtinga laboratorijose realizuoti neigiamą apkrovimo ciklo dalį.

Apkrovimo ciklo asimetrijos koeficientas eksploatacijos metu kinta tarp gan plačių ribų ir veikia plyšio plitimą. Skaičiuojant realias konstrukcijas, būtina daryti pataisas įtempimų būviui, matmenims, įtempimų koncentracijai ir paviršinėms sąlygoms. Praktiniams ΔK_{th} skaičiavimams, įvertinant asimetrijos koeficientą r, yra pasiūlyta nemažai formulių [11]:

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{max}(1-r),$$

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0}(1-r)^{1/2}, \tag{4.8}$$

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0}\left[(1-r)/(1+r)\right]^{1/2}.$$

Plačiai naudojama Klesnilo ir Lukašo [12] formulė:

4.3 lentelė

Skaičiuojamųjų ir eksperimentinių reikšmių palyginimas

Ketus		Bandinys	$R_m/R_{p0,2}$	$\Delta K_{th,\text{eksp}}$ (MPa·m$^{1/2}$)	$\Delta K_{th,\text{ skaič}}$ (MPa·m$^{1/2}$)	Skirtumas (%)
GI	Lietas	1	1,30	8,3	7,9	4,6
		2	1,35	7,3	8,2	12,0
		3	1,32	8,6	8,0	6,7
		4	1,26	7,5	7,7	2,3
		5	1,36	7,2	8,2	14,2
		6	1,32	6,8	8,0	18,0
		7	1,28	7,0	7,8	11,7
		8	1,25	6,5	7,7	17,9
	Normalizuotas	1	1,56	8,2	9,2	12,7
		2	1,60	8,8	9,4	7,3
		3	1,60	10,3	9,4	8,3
		4	1,54	9,4	9,1	2,8
		5	1,61	9,5	9,5	0
		6	1,66	9,0	9,8	8,3
		7	1,60	8,2	9,4	15,2
		8	1,54	9,0	9,1	1,6
SGI	Lietas	1	1,38	9,3	8,3	10,5
		2	1,32	8,0	8,0	0,26
		3	1,36	8,5	8,2	3,2
		4	1,42	9,0	8,5	5,2
	Normali-zuotas	1	1,40	9,4	8,4	10,3
		2	1,46	9,2	8,7	5,1
		3	1,40	9,2	8,4	8,4
		4	1,42	9,7	8,5	12,1
SGI Papildomo bandymo	Normali-zuotas	1	1,46	8,7	8,7	0
				8,75		0,19
				9,4		7,2
				9,8		11,0
Papildomi GI taškai	Lietas	4	1,26	8,0	7,7	3,6
		6	1,32	7,5	8,0	6,9
		8	1,25	6,8	7,7	12,7
	Normali-zuotas	5	1,61	9,0	9,5	5,5
Papildomi SGI taškai	Lie-tas	1	1,38	9,6	8,3	13,3
		4	1,42	8,4	8,5	1,5
	Normali-zuotas	4	1,42	9,2	8,5	7,3

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th\,0}(1-r)^{\gamma}, \tag{4.9}$$

čia ΔK_{th0} – ribinis įtempimų intensyvumo koeficiento intervalas, kai $r = 0$; γ – koeficientas, priklausantis nuo medžiagos ir svyruoja nuo 0,5 iki 1. Formulė (4.7) gerai tinka kai $0 < r < 0{,}6$.

Apibendrinant eksperimentinius duomenis ir atliktą analizę galima gauti lygybes, tinkamas konstrukcijų elementams skaičiuoti. Naudojantis 4.5 ir 4.7 formulėmis galima parašyti:

$$\Delta K_{th} = \left(5{,}1\frac{R_m}{R_{p0,2}} + 1{,}3\right)(1-r)^{\gamma}. \tag{4.10}$$

Kai detalės paviršiuje yra plyšys, kurio ilgis $2l$, jo plitimas bus sustabdytas, jeigu ribinių įtempimų intervalas neviršys $\Delta\sigma_{th}$, apskaičiuoto pagal formulę:

$$\Delta\sigma_{th} = \frac{\Delta K_{th}}{Y\sqrt{2l}}. \tag{4.11}$$

Pertvarkant formulę (4.9) gauname įtempimų kitimo intervalą, atitinkantį plyšėjimo intensyvumo koeficiento intervalą apkrovimo ciklams su teigiamu ir neigiamu ciklo asimetrijos koeficientu:

$$\Delta\sigma_{th} = \frac{\left(5{,}1\frac{R_m}{R_{p0,2}} + 1{,}3\right)(1-r)^{\gamma}}{Y\sqrt{2l}}. \tag{4.12}$$

Gauta išraiška rekomenduota didelio gabarito konstrukcijų elementų stiprumo skaičiavimui. Naudojantis šia priklausomybe prognozavimui, negalima kalbėti apie tikslų ΔK_{th} nustatymą, tačiau ji parodo ΔK_{th} kitimo tendenciją. Pagaminus detalę galima patikrinti cheminę sudėtį, struktūrą ir kietumą. Jeigu paaiškėja, kad atliekant terminį apdorojimą negautas struktūros pokytis, tuomet terminį apdorojimą galima pakartoti. Tačiau ir po kartotinio apdorojimo išlieka nedidelės nevienalytiškumo zonos. Tokią detalę galima eksploatuoti ir mechaninio būvio nevienodumą įvertinti projektavimo procese. Jeigu nagrinėjama didelių gabaritų detalė, kurioje dėl terminio apdorojimo gali atsirasti skirtingų savybių zonos, tai pagal (4.12) priklausomybę galima apytiksliai nustatyti ΔK_{th} reikšmę, kuri galėtų būti naudojama

projektavimui. Jeigu nagrinėjama atskira medžiaga su vienodomis savybėmis, tai suprantama, naudojama minimali ΔK_{th} reikšmė.

4.5. Skyriaus išvados

1. Tyrimais patvirtinta, kad terminis apdorojimas - normalizacija suvienodina stipriojo ketaus struktūrą, pagerina mechaninių savybių rodiklius, sumažina jų reikšmių sklaidą.
2. Eksperimentiniais bandymais nustatyta, kad terminis apdorojimas iki 22,5 % padidino GI ketaus atsparumą nuovargio plyšių plitimui: plyšėjimo slenkstis lietam GI ketui ΔK_{th} = 6,5 ... 8,6 MPa · $m^{1/2}$, normalizuotam GI ketui ΔK_{th} = 8,2 ... 10,3 MPa · $m^{1/2}$; ir iki 6 % padidino SGI ketaus atsparumą plyšių plitimui: plyšėjimo slenkstis lietam SGI ketui ΔK_{th} = 8,0 ... 9,6 MPa · $m^{1/2}$, normalizuotam SGI ketui ΔK_{th} = 8,7 ... 9,8 MPa · $m^{1/2}$.
3. Plyšių plitimo greičių nuo įtempimų intensyvumo koeficiento intervalo priklausomybės bei plyšėjimo slenksčiai nustatyti plyšio plitimo greičiui artėjant prie 10^{-12} m/ciklą parodė plyšėjimo slenksčio priklausomybę nuo plyšio gylio, kas patvirtino išlikusį tam tikrą struktūros nevienalytiškumą bei jo įtaką plyšėjimo slenksčiui.
4. Gauta ΔK_{th} ir santykio $R_m/R_{p0,2}$ priklausomybė naudojama ciklišk ai apkraunamų konstrukcijos elementų iš stipriojo ketaus su nevienodo mechaninio būvio zonomis projektiniam stiprumo skaičiavimui. Platesniam šios priklausomybės pritaikymui reikalinga papildoma analizė ir taravimas.

5. IŠVADOS IR APIBENDRINIMAI

Atlikus daugiaciklio nuovargio plyšių susidarymo ir plitimo sluoksniuotajame ketuje eksperimentinius, analitinius bei skaitinius tyrimus galima suformuluoti tokias galutines išvadas:

1. Išnagrinėjus literatūrą, galima teigti, kad daugiaciklio nuovargio plyšių atsiradimo ir plitimo mechanizmai sluoksniuotajame ketuje mažai žinomi ir neleidžia patikimai numatyti didelio gabarito konstrukcijų ilgaamžiškumo.
2. Pritaikyta originali eksperimentinių tyrimų metodika leido atkurti realių konstrukcijų elementų apkrovimą bei leido stebėti nuovargio plyšio atsiradimą ir plitimą daugiaciklio nuovargio srityje. Panaudojus pakeistą reglamentuojamą bandymo metodiką gauti daugiaciklio ir hiperciklio apkrovimo bandymo rezultatai.
3. Fraktografinė bandinių iš sluoksniuotojo ketaus (su liejimo procesų netobulumais) analizė parodė, kad sudėtingą plyšio fronto trajektoriją lėmė židiniai, susidarę skirtinguose paviršiaus pjūviuose ir židiniai popaviršiniuose sluoksniuose („žuvies akis“). Tolimesniam plyšio plitimui didelę įtaką turi nevienalytė specialiojo sluoksnio struktūra.
4. Eksperimentais nustatyta, kad pagrindinio metalo $\Delta K_{th} = 9{,}8\ \mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ ir specialiojo sluoknio $\Delta K_{th} = 8{,}1\ \mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ ribinis įtepimų intensyvumo koeficientas (plyšėjimo slenkstis) skiriasi 1,2 karto.
5. Termiškai apdoroto stipriojo ketaus eksperimentinis analitinis tyrimas parodė, kad didelio gabarito gaminiuose terminio apdorojimo procese struktūra pakeičiama ne visame liejinio tūryje, išlieka įvairaus dydžio ir formos grafitas, o atskiros zonos turi skirtingas mechanines savybes.
6. Eksperimentiniais bandymais nustatyta, kad terminis apdorojimas iki 22,5 % padidino GI ketaus atsparumą nuovargio plyšių plitimui ir iki 6 % padidino SGI ketaus atsparumą plyšių plitimui.
7. Gauta ΔK_{th} ir santykio $R_m/R_{p0,2}$ priklausomybė naudojama ciklškai apkraunamų kalnakasybos įrenginių elementų iš stipriojo ketaus su nevienodo mechaninio būvio zonomis projektiniam stiprumo skaičiavimui.

LITERATŪRA

1. T. L. Anderson. Fracture Mechanics: Fundamentals and Application. Boston: CRC Press, 1991. 794 p.
2. R. W. Hertzberg. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. New York–Singapore: John Willey & Sons Inc., 1996. 786 p.
3. W. D. Calister. Fundamentals of Material Science and Engineering. New York: Willey, 2000. 820 p.
4. W. D. Callister. Materials Science and Engineering. New York–Singapore: John Willey & Sons Inc., 1997. 852 p.
5. D. Broek. The Practical Use of Fracture Mechanics. Dorsdrecht–Boston–London: Kluwer Academic Publishers, 1989. 426 p.
6. В. В. Панасюк, М. П. Саврук, С. Я. Ярема, Н. А. Махутов, О. Н. Романив, А. Е. Андрейкив и др. Механика разрушения и прочность материалов. Киев: Наукова думка, 1988-1990, т. 1 – 488 с.; т. 2 – 620 с.; т. 3 – 436 с.; т .4 – 680 с.
7. M. K. Leonavičius. Mechaninis medžiagų irimas. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2000. 80 p.
8. L. Lawson, E. Y. Chen, M. Meshii. Microstructural fracture in metals fatigue // *Int. J. Fatigue*, Vol. 19, No 1, 1997. p. S61–S67.
9. А. А. Ежов. Л. П. Герасимов. Разрушение металлов. Москва: Наука, 2004. 400 с.
10. J. Schijve. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art // *Int. J. Fatigue*, 25 (2003) 679–702.
11. S. Kocanda. Zmęczenie pękne metali. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, 1985, 492 p.
12. B. Sundström. Handbook och formelsamling i Hållfasthetslära. KTH, 1997. 245 p.
13. В. С. Иванова. Природа усталости металлов. Москва: Металургия, 1975. 456 с.
14. Г. В. Щурбенский. Чугун как перспективный материал XXI столетия // *Металловедение и термическая обработка металлов*. Nr. 7 (601) 2005. с. 83–93.
15. И. В. Франценюк, Л. И. Франценюк. Альбом микроструктур чугуна, стали, цветных металлов и их сплавов. Москва: ИКЦ Академкнига, 2004. 192 с.
16. E. Dorazil. High strength austempered ductile cast iron. Prague: Ellis Harwood, 1991. 244 p.
17. R. Boschen, H. Bomas, P. Mayr, H. Vetters. Proc. World Conf. Austempered Ductile Iron. American Foundrymen's Society, Des Plaines. IL, USA 1991. 468 p.

18. S. M. Jones, V. Svalbonas. Крупногабаритные мельницы измельчения // *Горная промышленость*, Но. 2, 2003. p. 2–7.
19. J. Žvinys. Konstrukciniai lydiniai. Ketus. Kaunas, Technologija, 1999. t. 1. 203 p.
20. C. Bathias In: Proceedings of the Int. Conf. on Fatigue in the Very High Cycle Regime. Vienna, Austria. (Eds. S.Stanzl-Tschegg and H. Mayer) 2001, p. 97-109.
21. N. A. Makhutov. Fatigue of metals in a wide range of cyclic loading. *Industrial laboratory*, 2004, Vol 70, p. 37–41. (in Russian).
22. P. Lukas, L. Kunz. Specific features of high-cycle and ultra-high-cycle fatigue // *Fatigue Fract Engn Mater Struct,* Vol 25, p. 747–753.
23. D. L. McDowell. Basic issues in the mechanics of high cycle metal fatigue // *International Journal Fracture,* Vol 80, 1996. p. 103–145.
24. V. Troshchenko, Deformation and Fracture of Metals in High Cyclic Loading. Kiev. 1981. . (in Russian).
25. B. Balina, G. Medekšas. Strength, live time and resistance for crack of structures under long time cyclic loading. Sankt Peterburg: Politechnika, 1994. 207 p.
26. M. Daunys. Ciklinis konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas. Monografija. Kaunas: Technologija, 2005. 288 p.
27. A. Žiliukas, N. Meslinas, K. Juzėnas. Fracture investigation of layered composite struktural elements // *Mechanika.* Nr.1(57) 2006. p 12-16.
28. D. Ninic. A stress-based multiaxial high-cycle fatigue damage criterion // *Int J Fatigue,* Vol 28, 2006. p. 103–113.
29. I. V. Papadopulos, P. Davoli, C. Gorla, M. Filippini, A. A. Bernasconi. Comparative study of multiaxial high-cycle fatigue criteria for metals // *Int J Fatigue,* Vol 19, No 3, 1997. p. 219–235.
30. A. Banvillet, T. Palin-Luc, A Lasserre. Volumetric energy based high cycle multiaxial fatigue criterion // *Int J Fatigue*, Vol 25, 2003. p. 755–769.
31. N. A. Noda. Stress intensity formulas for three-dimensional cracks in homogeneous and bonded dissimilar materials // *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 71, 2004. p. 1–15.
32. K. P. Herrmann, V.V. Loboda. Special approach for the determination of fracture mechanical parameters at an interface crack tip // *Applied Mechanics*, Vol. 68, 1998. p. 227–236.
33. M. M. Hammouda, H.E.M. Sallam, H.G. Osam. Significance of crack tip plasticity to early notch fatigue crack growth // *Int J Fatigue*, Vol. 26, 2004. p. 173–182.

34. П. М. Витвицкий, В.В. Панасюк, С.Я. Ярема. Пластические деформации в окресности трещин и критерии разрушения // *Проблемы прочности*, № 2, 1973. с. 3–19.
35. Л. А. Копельман. О точности оценки поля напряжений у кончика трещинй линейной механики разрушения // *Проблемы прочности*, № 4, 1975. с. 84–89.
36. Л. И. Доможиров. О пороговом значении коэфициента интесивности напряжений для тел с короткими трещинами // *Заводская лоборатория*, № 52 (7), 1986. с. 59–63.
37. D. P. Miannay. Fracture mechanics. New York–Tokyo: Springer.1998. 339 p.
38. R. Kienzler, G. Herrmann. Mechanics in Material Space. Berlin–Tokyo: Springer. 2000. 298 p.
39. А. Ю. Жилюкас. Разрушение конструкционных елементов. Вильнюс: Мокслас, 1988. 106 с. ил.
40. А. И. Кренявичюс. Малоцикловая усталость резбовых соединений при повышенных температурах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Вильнюс: ВИСИ. 1983.199 с.
41. R. Barauskas, R. Belevičius, R. Kačianauskas. Baigtinių elementų metodo pagrindai. Vilnius, Technika, 2004. 612 p.
42. M. H. Aliabadi. A new generation of boundary element methods in fracture mechanics // *Int J Fracture*, Vol 86, 1997. p. 91–125.
43. S. H. Pundale, R.J. Rogers, G.R. Nadkarni. Finite element modelling of elastic modulus in ductile irons: effect of graphite morphology // *AFS transactions,* p. 99–105.
44. T. Billaudeau, Y. Nadot. Support for an environmental effect on fatigue mechanisms in the long life regime // *Int J Fatigue*, Vol 26, 2004. p. 839–847.
45. А. В. Гурев, В.Я. Митин. Особености развития локальных микронеоднородных деформаций и накопления усталостных повреждений в углеродистых сталях // *Проблемы прочности*, № 11, 1978. с. 19–24.
46. Y. Nadot, J. Mendez, N. Ranganathan, A.S. Beranger. Fatigue life assessment of nodular cast iron containing casting defects // *Fatigue Fract Mater Struct*, Vol 22, p. 289–300.
47. V. T. Troshchenko, S. M. Lyakov. The influence of surface defects on high – cycle fatigue of engineering material // *Strength problems*, Vol 1, 1996. p. 5–16.
48. Y. Nadot, J. Mendez, N. Ranganathan. Influence of casting defects on the fatigue limit of nodular cast iron // *Int J Fatigue,* Vol 26, 2004. p. 311–319.
49. M. A. Magiolaro, J. T. Castro. Propagation of 2D fatigue cracks under complex loading. 56 congresso anual da ABM – 16 a 19 de juho 2001, Belo horizonte ,MG p. 1740–1750.

50. S. C. Lin, T. S. Lui, L. H. Chen, J. M. Song. Effects of pearlite on the vibration-fracture behaviour of spheroidal graphite cast irons under resonant conditions // *Metallurgical and materials transactions A,* Vol 33A, august 2002. p.
51. Y. Nadot, J. Mendez, N. Ranganathan. Influence of casting defects on the fatigue limit of nodular cast iron // *Int J Fatigue*, Vol 26, 2004. p. 311–319.
52. Y. Qiao, Chakravarthula. Effects of randomness of grain boundary resistance on fatigue initiation life // *Int J Fatigue*, Vol 27, 2005. p.1251–1254.
53. V. T. Troschenko. Various stages of fatigue crack development.
54. O. P. Ostash, V. V. Panasyuk. A unified approach to fatigue microcrack initiation and propagation // *Int J Fatigue*, Vol 25, 2003. p. 703–708.
55. S. Glodež, Š. Mraml, J. Kramberger. A computational model for determination of service life of gears. *Int. J, of Fatigue*, 2002, Vol 24, p. 1013-1020.
56. R. K. Nalla, J. P. Campbell, R. O. Ritchie. Mixed-mode, high-cycle fatigue crack growth thresholds in Ti-6Al-4V: Role of small cracks // *Int. J, of Fatigue*, 2002, Vol 24, p. 1047-1062.
57. H. El Haddad, K. N. Smith, T. H. Topper. Fatigue Crack Propagation of Short Crack // *Journal Materials and Technology*, Vol 101, No 1, 1979. p. 42–46.
58. T. J. Marrow, H. Centinel, M. Al Zalmah. Fatigue Crack Nuclei in Austempered Ductile Cast Iron // *Fatigue & Fracture of Engineering & Structures*, Vol 25(7), 2002. p. 635–649.
59. T. J. Marrow, H. Centinel, S. H. Macdonald, A. Venslovas, M. Leonavičius. X–ray Tomography of Short Fatigue Cracks in Ductile Iron. Proceedings of the 14th Bienel Conference on Fracture. Eds.: Niemetz, A., Rokach, I. V., Kocanda D., Golos K. ECF 14 Fracture Mechanics Beyond 2000, Vol II/III 2002. Krakow p. 443–450.
60. M. Yamazaki. Fatigue data sheets //*Nims Now*, Vol. 2, No. 8, 2004. pp. 3-4
61. H. Kagawa, M. Ishiguro, S. Hisamatsu. Influence of fatigue strength of carburized and shot peened gear steel.
62. П. Любушки, М. Билы. Фрактография усталостных разрушений // *Проблемы прочности*, № 3, 1975. с. 3–12.
63. A. Sugeta, Y. Uematsu, A. Hashimoto, M. Jono. Atomic force microscopy of fatigue crack growth behaviour in the low K region // *Int J Fatigue*, Vol 26, 2004. p. 1159–1168.
64. G. M. Goodrich. Explaining the Peculiar: Cast Iron Anomalies and Their Causes. Modern Casting, AFS Inc., 1998.
65. В. Т. Трощенко. Рассеянное усталостное повреждение металлв и сплавов. Сообщение 1. Неупругость: методы и результаты // *Проблемы прочности*, № 4, 2005. с. 5–32.

66. R. L. Naro Porosity defects in iron castings from mold-metal interface reactions // *AFS transactions*, p. 839–850.
67. ASTM E 647–00.: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates
68. ASTM E 1681–95.: Standard Test Method for Determining a Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials Under Constant Load
69. D. Garuckas, J. Bareišis. The influence of different factors on stiffness of multilayered composite elements // Mechanika, Nr. 5 (43), 2003. p. 19–24.
70. Bereicht WLP-T3994/97. Ermitlung bruchmechanicher Kennwerte und der Ermudungsfestigkeit von Proben mit Porositat bzw. Einwandfreiem Gefuse aus GGG-50. Dresden: Siempelkamp. 1998. 15 p.
71. S. R. Kiran Solamki Daniewicz, J. C. Jr. Newman. Finite element analysis of plasticity–induced fatigue crack closure: an overview // *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 71, 2004. p. 149–171
72. J. S. Park, S. J. Kim, K. H. Kim, H. S. Park, C. S. Lee. A microstructural model for predicting high cycle fatigue life of steels // *Int J Fatigue*, Vol 27, 2005. p. 1115–1123.
73. A. Ahmadi, H. Zenner. Simulation of microcrack growth for different load sequences and comparison with experimental results // *Int J Fatigue*, Vol 27, 2005. p. 853–861.
74. A. K. Soh, C. H. Yang. Numerical modelling of interactions between a macro-crack and a cluster of micro-defects // *Engineering Fracture Mechanics,* Vol 71, 2004. p. 193–217.
75. K. Kolk.Automatishe 3D-Rissfortschritts-simulation unter Berücksichtigung von 3D-Effekten und Anwendung schneller Randelement-formulierunggen. Düsseldorf: VDI Verlag GnbH, 2005. 145 p.
76. B. I. Imasogie, U. Wendt. Characterization of graphite particle shape in spheroidal graphite iron using a computer-based image analyzer // *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol 3, no 1, 2004. p. 1–12.
77. N. Gubeljak, J. Legat, M. Kocak. Effect of fracture path on the toughness of weld metal // *Int J Fracture*, Vol 115, 2002. p. 343–359.
78. П. Ромвари, Л. Тот, Д. Надь. Анализ закономерностей рапостранения усталостных трещин в металлах // *Проблемы прочности*, № 12, 1980. с. 18–28.
79. V. P. Bennett, D. L. McDowell. Polycrystal orientation distribution effects on microslip in high cycle fatigue // *Int J Fatigue*, Vol 25, 2003. p. 27–39.
80. А. Н. Подгорный, И. С. Гузь, М.Б. Милешкин. Исследование закономерностей развития и торможения быстрых трещин при разрушении слоистых металических матераалов // *Проблемы прочности*, №. 1, 1977. p. 9–13.

81. D. Stafanescu, L. Edwards, M. E. Fitzpatrik. Stress intensity factor correction for asymmetric through-thickness fatigue crack at holes // *Int J fatigue*, Vol 25, 2003. p. 569–576.
82. Н. А. Махутов. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. Москва: Машиностроение, 1973. 200 с.
83. Г. П. Мелников А. А. Соколов, Об оценке долговечности материала при ступенчатом негружении // *Проблемы прочности*, № 9, 1976. с. 25–30.
84. I. Chantier, V. Bobet, R. Billardon, F. Hild. A probabilistic approach to predict the very high-cycle fatigue behaviour of spheroidal graphite cast iron structures // *Fatigue Fract Engng Struct*, Vol 23, p. 173–180.
85. А С. Гусев. Прогнозирование живучести элементов контрукций с трещинамию // *Вестник машиностроения,* № 5, 1987. с. 6–9.
86. Li-Chun Bian, Jae-Kyoo Lim. Fatigue life prediction of the plates with an inclined surface crack // *Int J Fatigue*, Vol 25, 2003. p. 521–531.
87. B. M. Singh, H. T. Danyluk, A. P. S. Sevadurai, R. S. Dhaliwal, J. Rokne, J. Vrbik. Effects of inclusions in ductile cracks // *Z. Angew. Math. Pfys,* Vol 52, 2001. p. 680–695.
88. J. C. Jr. Newman, E. P. Philips, N. H. Swain. Fatigue – Life prediction methodology using small-crack theory // *Int J of Fatigue*, Vol 21, 1999. p. 109–119.
89. В. В. Федоров, В. Г. Байло, А. С. Рачков, Г. А. Кулаков, Р. В. Ромашов. Прогнозирование остаточной работаспособности деталей машин // *Проблемы прочности*, № 8, 1987. с. 111–115.
90. В. Т. Трощенко. Прогнозирование долговечности металлов при многоцикловом нагружении // *Проблемы прочности*, № 10, 1980. с. 31–40.
91. В. М. Маркочев. Прочность при наличии трещин и конструкционная прочность // *Проблемы прочности*, № 2, 1982. с. 6–10.
92. Li-Chun Bian, Jae-Kyoo Lim. Fatigue life prediction of the plates with an inclined surface crack // *Int J Fatigue*, Vol 25, 2003. p. 521–531.
93. S. Stychev, D. Kujawski. Analysis of crack propagation using ΔK and K_{max} // *Int J Fatigue*, Vol 27, 2005. p. 1425-1431.
94. M. Leonavičius, A. Krenevičius, M. Šukšta, J. Posa. The investigation and peculiarities of calculation of transport machine elements made of austempered ductile iron // *Transport*, Vol XVIII, No 4, 2003. p. 162–167.

95. V. Calonne, A.F. Gourgues, A. Pineau. Fatigue crack propagation in cast duplex stainless steels: thermal ageing and microstructural effects // *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 27, 31–

96. M. Leonavičius, R. Fliotovienė, E. Stupak. The stress-strain analysis in plates with operational and industrial defects. Archives of Civil Engineering. XLV, No 3, 1999, p. 443–452.

97. S. C. Foth, J. C. Newman, R. G. Forman. On generating fatigue crack growth thresholds // *Int J Fatigue*, Vol 25, 2003. p. 9–15.

98. Л. А. Солнцев, М. В. Кизима, А. М. Петреченко, Л. Д. Добрынина. Влияние термический обработки на длительную прочность магниевого чугуна // *Проблемы прочности*, № 6, 1975. с. 67–70.

99. В. П. Голуб. Некоторые особенности развития усталости и ползучести в жаропочных сплавах при асимметричном нагружении // *Проблемы прочности,* № 8, 1984. с. 17–22.

100. S. Kwofie. Equivalent stress approach to predicting the effect of stress ratio on fatigue threshold stress intensity range // *Int J Fatigue*, Vol 26, 2004. p. 299–303.

101. F. S. Silva. Crack closure inadequacy at negative stress ratios // *Int J Fatigue*, Vol 26, 2004. p. 241–252.

102. A. Baron, J. Bakchracheva. The method for lifetime estimation through the mechanical properties in tension // *Mechanika*, Nr. 3(47), 2004. p. 29–32.

AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA

103. M. Leonavičius, G. Petraitis, A. Krenevičius, M. Šukšta, S. Stupak. Investigation of High-Cycle Fatigue of Cast Iron with Porous Layer near Threshold Δ*K*th // *Kovove Materials*, 43, 2005, p. 348–357.

104. G. Petraitis, M. Leonavičius. Threshold Kth Investigation of High-Cycle Fatigue of Cast Iron with Porous Layer *// Mechanika*, 4(48). Kaunas: Technologija. 2004, p. 25–28.

105. M. Leonavičius, M. Šukšta, S. Stupak, G. Petraitis. Experimental investigation of Cyclic Bending Strength of Cast Iron with "dross" Layer // *Mechanika*, 5(43). Kaunas: Technologija. 2003, p. 13–18.

106. G. Petraitis, M. Leonavičius, S. Stupak, J. Raulynaitis. Dviejų sluoksnių ketaus atsparumo daugiacikliam lenkimui tyrimas. Tarpt. Konf. Mechanika – 2003 pranešimų medžiaga, Kaunas: Technologija. 2003. p. 161–166.

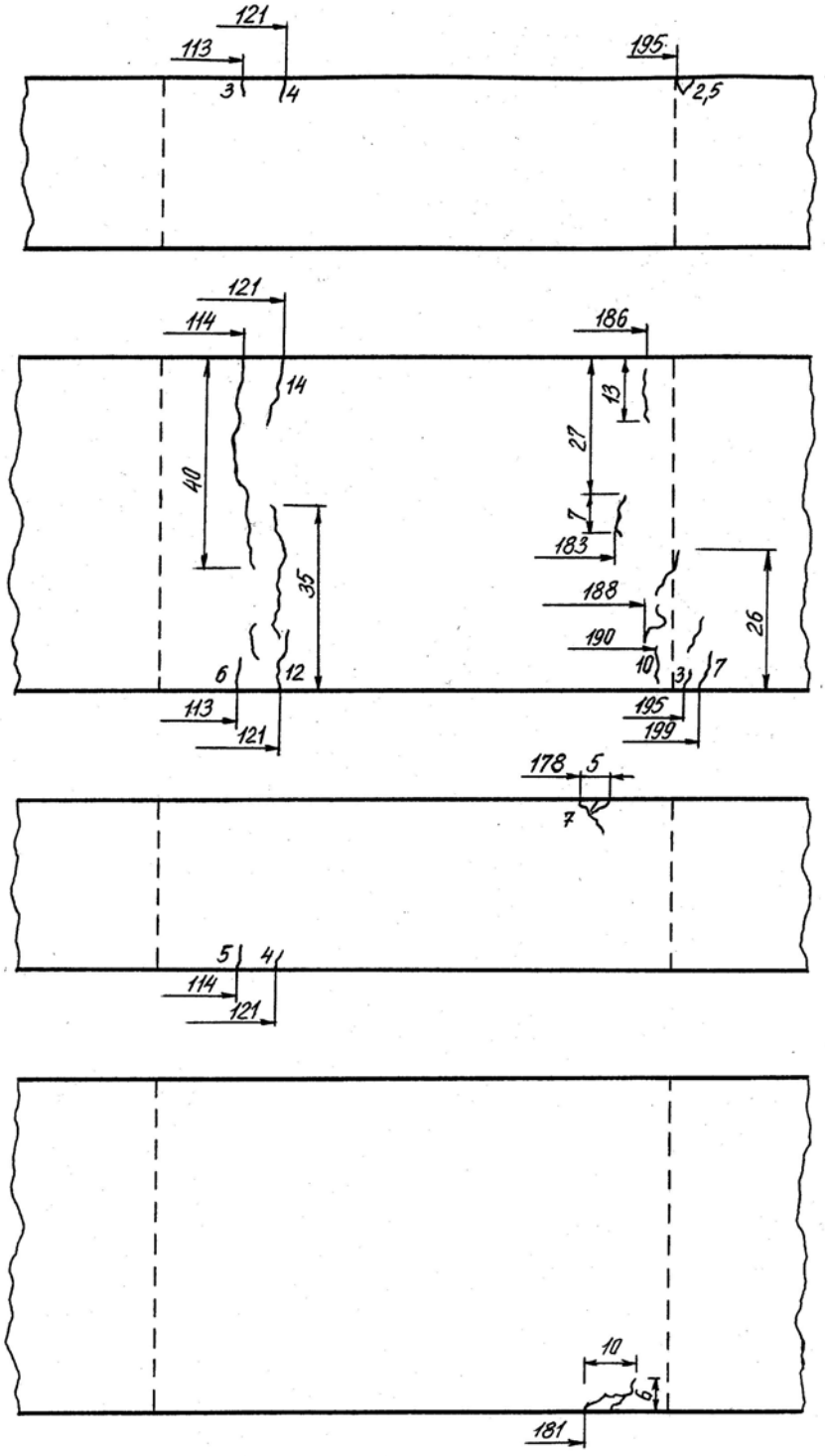
107. G. Petraitis, M. Šukšta, S. Stupak, M. Leonavičius. Ketaus su poringuoju sluoksniu daugiaciklio lenkiamojo stiprumo tyrimas. Tarpt. Konf. Mechanika – 2004 pranešimų medžiaga, Kaunas: Technologija. 2004. p. 115–119.

108. G. Petraitis, M. Leonavičius, S. Stupak. Ketaus su skirtingomis struktūromis atsparumas cikliniam apkrovimui. Tarpt. Konf. Mechanika – 2005 pranešimų medžiaga, Kaunas: Technologija. 2005. p. 51–55.

PRIEDAI

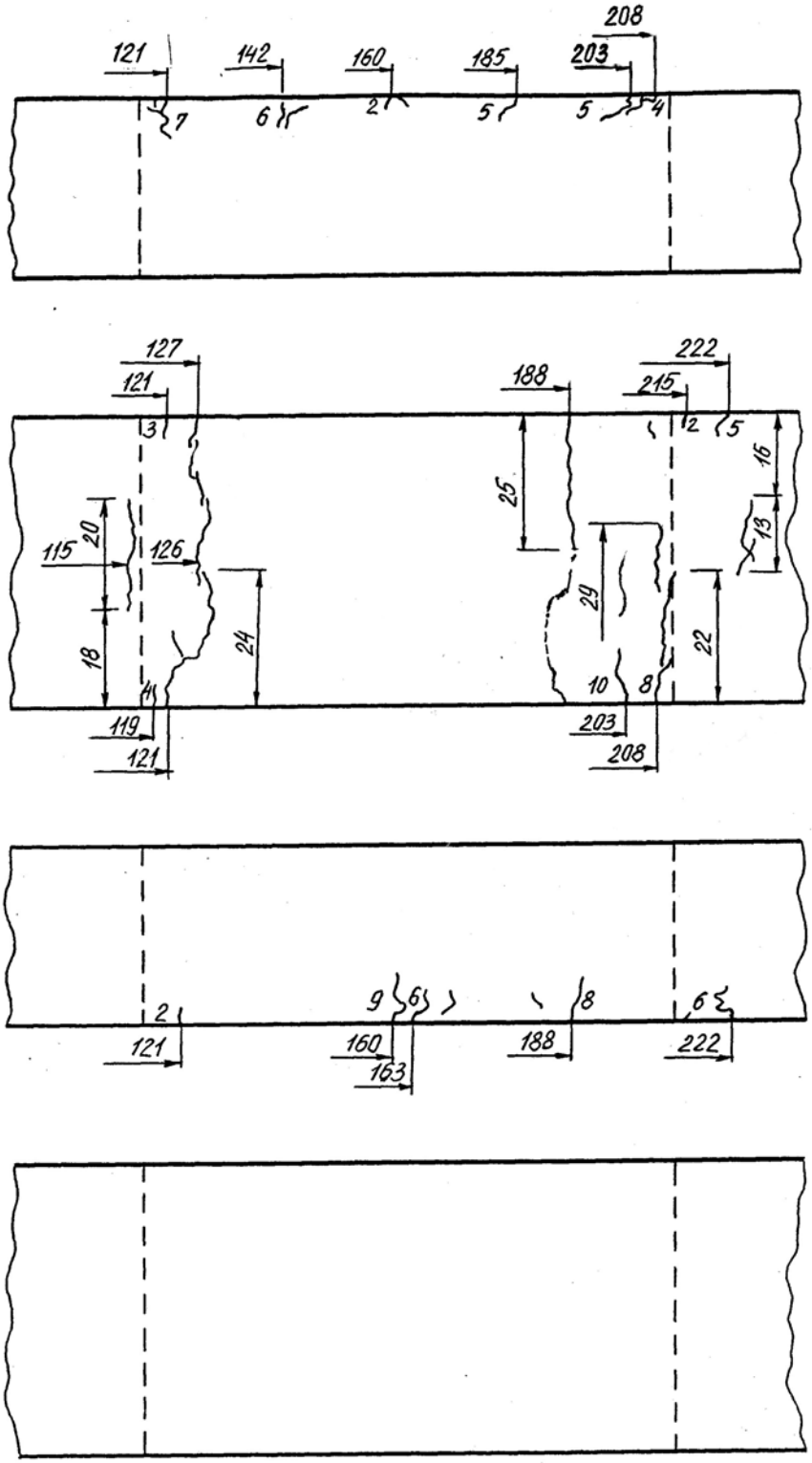
1 priedas. Įtrūkimai 1 bandinio paviršiuje

Ciklų skaičiaus $N = 2 \cdot 10^8$, apkrovimas $\sigma = 160$ MPa.



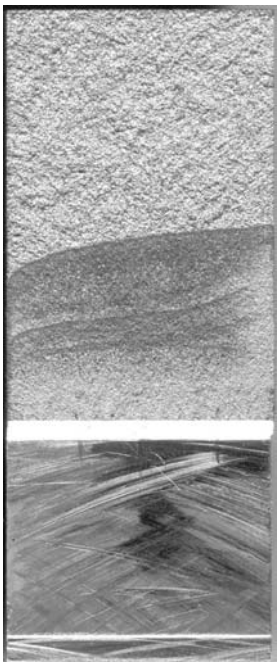
2 priedas. Įtrūkimai 2 bandinio paviršiuje

Ciklų skaičiaus $N = 1{,}2 \cdot 10^8$, apkrovimas $\sigma = 160$ MPa.

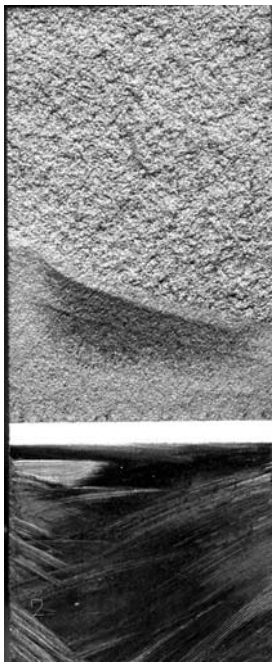


3 priedas. Normalizuotų bandinių lūžiai

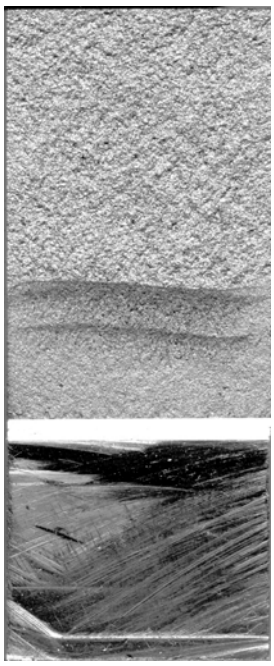
1, 2, 3 – bandiniai iš GI ketaus, 4, 5, 6, 7, 8 – bandiniai iš SGI ketaus



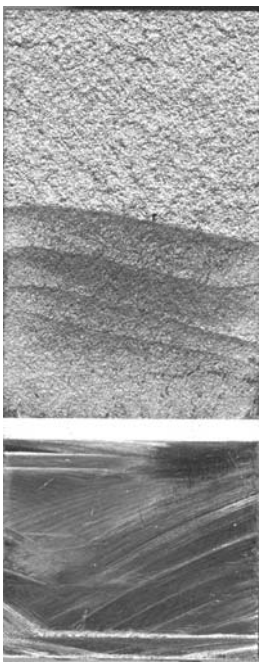
1



2



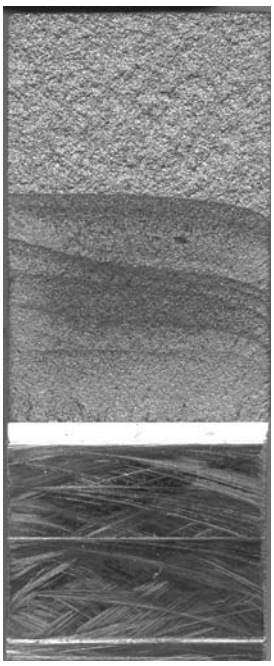
3



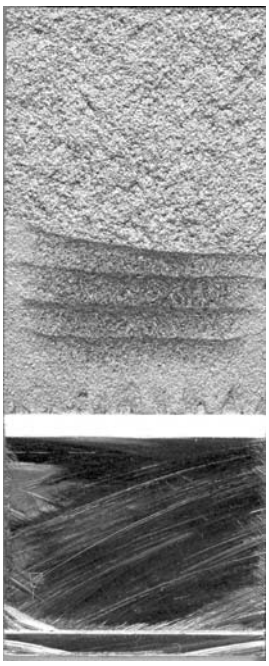
4



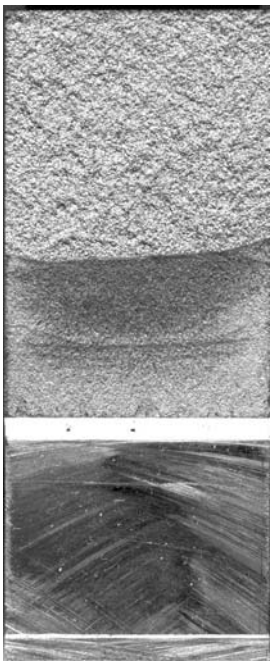
5



6



7



8