

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**CIKLINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS KONCENTRACIJOS
ZONOSE ESANT GRYNAJAM LENKIMUI**

Magistro baigiamasis darbas

Autorius – Marius Dargis (MM-4 gr.)

Vadovas – doc. dr. A. Sabaliauskas

Recenzentas – doc. dr. S. Rimovskis

Šiauliai, 2010

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Marius Dargis. CIKLLINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS KONCENTRACIJOS ZONOSE ESANT GRYNAJAM LENKIMUI. Magistro baigiamasis darbas, vadovas doc.dr. A. Sabaliauskas.

Santrauka

Straipsnyje pateiktas analitinis ir eksperimentinis sukietinto plieno 45 ilgaamžiškumo įvertinimas pritaikius kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų sumavimą. Esant minkštam mažacikliam apkrovimui, medžiagoje kaupiasi nuovargio d_N ir kvazistatiniai d_K pažeidimai. Šių pažeidimų visuma mažina detalių ilgaamžiškumą. Darbe pateiktos plieno 45 ir plieno 45 po elektromechaninio apdirbimo mažaciklio simetrinio apkrovimo nuovargio analitinės kreivės, esant minkštajam apkrovimui, įvertinančios tik nuovargio pažeidimus d_N . Nustatytas ryšys tarp kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų grynojo lenkimo atveju esant įtempių koncentracijos zonoms.

Raktiniai žodžiai: mažaciklis nuovargis, elektromechaninis apdirbimas, grynasis lenkimas, įtempių koncentracija.

ŠIAULIAI UNIVERSITY
FACULTY OF TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Marius Dargis. INVESTIGATION OF CYCLIC CHARACTERISTICS IN
CONCENTRATION ZONES UNDER PURE BENDING. Master final work, research advisor Assoc.
Prof. dr. A. Sabaliauskas

SUMMARY

This paper provides experimental and analytical evaluation of durability of nonhardened and hardened by EMT specimens of grade 45 steel with stress concentrators, under low cycle pure bending. For this type of loading modes was carried out durability analysis, taking into account fatigue and quasi-static damage depending on loading level and number of semicycles. Stress and strain concentration coefficients were calculated by analytical and finite element methods (FEM) under elastic plastic cyclic loading. It was determined, that in specimens with the stress concentrators under low cycle pure bending, hardened surface has nonsignificant influence on durability. Performed analytical investigation showed, that suggested method for quasi-static and fatigue damage summation, when accumulated plastic strain and the width of the hysteresis loop are taken into account, provides a very good agreement with the experimental results at stress concentration zones of surface-hardened parts under pure bending.

Key words: low cycle fatigue, electromechanical treatment, pure bending, stress concentration.

TURINYS

LENTELIŲ SARAŠAS	2
PAVEIKSLŲ SARAŠAS	3
IVADAS	4
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA	6
2. BANDIMŲ METODIKA IR PRIEMONĖS.....	11
2.1 Elektromechaninis apdirbimas.....	11
2.2 Baltasis sluoksnis.....	13
2.3 Mažaciklio grynojo lenkimo bandymų įranga.....	13
2.3.1 Apkrovimo įrenginys.....	13
2.3.2 Lenkimo momentų ir deformacijų matavimas bei skaičiavimas.....	15
2.4 Bandiniai, jų forma ir matmenys	17
2.5 Baigtinių elementų metodas.....	18
3. LENKIMO EKSPERIMENTŲ IR ANALITINIŲ SKAIČIAVIMŲ REZULTATAI ĮTEMPIMŲ KONCENTRACIJOS ZONOSE.....	22
3.1 Koncentracijos koeficientų skaičiavimas	22
3.2 Atsparumas mažacikliam deformavimui koncentracijos zonose.....	30
3.3 Atsparumas suirimui koncentracijos zonose esant minkštajam mažacikliam apkrovimui	36
3.4 Pažeidimų skaičiavimas koncentracijos zonose.....	37
IŠVADOS	40
LITERATŪRA.....	41

LENTELIŲ SARAŠAS

2.1 Skaitinio modelio medžiagų mechaninės charakteristikos plienui 45 (šerdis).....	23
2.2 Skaitinio modelio medžiagų mechaninės charakteristikos išoriniui „baltajam“ sluoksniui.....	23
3.1 Koncentracijos koeficientai grynojo lenkimo metu pagal N. Machutovą.....	31
3.2 Koncentracijos koeficientai grynojo lenkimo metu pagal G. Glinką.....	32
3.3 Koncentracijos koeficientai grynojo lenkimo metu pagal H. Neuberį.....	33

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

2.1 pav. EMA tekimo staklėse elektromechaninė schema.....	15
2.2 pav. Grynojo lenkimo įtaisas.....	18
2.3 pav. Bandinio grynojo lenkimo schema.....	18
2.4 pav. Bandinio paviršių deformavimo schema grynuoju lenkimu.....	19
2.5 pav. Deformometras apvalaus skerspjūvio bandinio grynojo lenkimo deformacijoms matuoti.....	20
2.6 pav. Statinio ir mažaciklio apkrovimo bandinys grynojo lenkimo atveju.....	21
2.7 pav. <i>SOLID95</i> tipo BE.....	23
2.8 pav. Lenkiamo strypo su koncentratoriumi BE modelio tinklelis.....	24
2.9 pav. Įtempių pasiskirstymas koncentracijos zonose esant grynajam lenkimui.....	25
3.1 pav. Įtempių ir deformacijų koncentracijos koeficientų nustatymo schema esant tampriai plastiniam deformavimui.....	26
3.2 pav. Koncentracijos koeficientų priklausomybė nuo $\bar{\sigma}_m$, N. Machutovo ir BEM metodu.....	31
3.3 pav. Koncentracijos koeficientų priklausomybė nuo $\bar{\sigma}_m$, G. Glinkos ir BEM metodu.....	32
3.4 pav. Koncentracijos koeficientų priklausomybė nuo $\bar{\sigma}_m$, H. Neuberio ir BEM metodu.....	33
3.5 pav. Ciklinių įtempių K_{sk} koncentracijos koeficientai.....	35
3.6 pav. Ciklinių deformacijų K_{ek} koncentracijos koeficientai.....	36
3.7 pav. Cikliniai stiprėjimo koeficientai m_k	37
3.8 pav. Ciklinių įtempių intensyvumo S_{ik} priklausomybė nuo k	38
3.9 pav. Ciklinių deformacijų intensyvumai ε_{ik} koncentracijos zonoje.....	38
3.10 pav. Ciklinis plastinių deformacijų δ_{ik} intensyvumas koncentracijos zonose.....	39
3.11 pav. Vienpusės plastinės deformacijos \bar{e}_{ipk} intensyvumo kaupimas koncentracijos zonoje.....	40
3.12 pav. Nesukietintų ir sukietintų bandinių su koncentratoriumi apkrautų grynuoju lenkimu eksperimento rezultatai (1) ir analitinės (2) nuovargio kreivės.....	41
3.13 pav. Nesukietintų ir sukietintų bandinių su koncentratoriumi apkrautų grynuoju lenkimu eksperimento rezultatai (1) ir analitinės (2) nuovargio kreivės.....	43

IVADAS

Nepaisant ilgalaikių tyrinėjimų susijusių su metalo nuovargiu, dar ir šiomis dienomis tai yra pakankamai didelė problema, net apie 90 procentų visų mechanizmų lūžta dėl šios problemos. Eksploatuojant dalis mechanizmo detalių yra veikiamos cikliniu lenkimu, o esant tam tikriems įrengimų darbo režimams galimi trumpalaikiai jų perkrovimai (pvz. ašys, sijos).

Eksploatuojant detales patvarumas dažniausiai priklauso nuo ne visos detalės, o tik nuo paviršinio sluoksnio savybių. Viena iš efektyviausių būdų padidinti detalės patvarumą yra paviršiaus sukietinimas, todėl kad dažniausiai pažeidimai atsiranda ant paviršiaus dėl blogos kokybės ar išorinių veiksnių poveikio.

Kad sustiprinti detalių paviršių yra sukurta daug sukietinimo būdų: mechaninio sukietinimo būdai, fizikiniai – terminiai paviršinio sluoksnio sukietinimo būdai, elektrofizikiniai sukietinimo būdai. Vienas iš elektrofizikinio sukietinimo būdų yra elektromechaninis apdirbimas (EMA). Tai labai efektyvus detalių darbinių paviršių sukietinimo būdas. Kaitinant ir deformuojant paviršių, labai susmulkėja plieno mikrostruktūra, dėl to EMA apdirbtų detalių paviršius sukietėja. Šis procesas yra spartus, dėl to nespėja pasireikšti rekristalizacija ir gaunamas specifinis smulkiagrūdis sustiprinto paviršiaus sluoksnis - „baltasis sluoksnis“. Labiausiai šis sluoksnis pasižymi išskirtiniu paviršiaus atsparumu abrazyviniam dilimui, todėl puikiai tinka įrengimų detalėms stiprinti.

Darbo tikslas – nustatyti elektromechaniškai sukietinto plieno 45 apvalaus skerspjuvio bandinių mažaciklio nuovargio charakteristikas, esant grynajam lenkimui ir esant įtempių koncentracijai.

Darbo uždaviniai:

1. Apskaičiuoti koncentracijos koeficientus pagal N. Machutovą, H. Neuberį ir G. Glinką ir sulyginti gautus rezultatus su baigtinių elementų metodu gautais rezultatais.
2. Įvertinti sukietinto paviršiaus įtaką plieninių detalių stiprumui ir ilgaamžiškumui įtempių koncentracijos zonose, esant nominaliam mažacikliam apkrovimui;
3. Pritaikius baigtinių elementų modelį, nustatyti didžiausių įtempių ir deformacijų zonas ir apskaičiuoti įtempių ir deformacijų būvį, esant grynajam lenkimui;
4. Atlikti analitinį – eksperimentinį sukietintų detalių su įtempiu koncentratoriais stiprumo ir ilgaamžiškumo įvertinimą.

Tyrimo metodai – įtempių ir deformacijų būvio tyrimai atlikti baigtinių elementų metodu, naudojant baigtinių elementų metodo programą ANSYS. Atsparumas mažacikliam deformavimui koncentracijos zonose ir pažeidimų skaičiavimas buvo atliktas naudojant analitinius tyrimo metodus.

1. LIERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

1.1 Paviršiaus sukietinimas

Sparčiai besivystant kvantinei elektronikai, jonų ir elektronų spinduliavimo, plazminiams, elektrofiziniais procesams, sukurti nauji metalų paviršių sukietinimo būdai koncentruotu energijos srautu. Daug autorių tyrinėjo kaip prailginti detalių tarnavimo laiką įvairiais būdais apdirbant paviršius. Dauguma šių būdų yra brangūs, tačiau yra ir paprastesnių. Vienas iš paprastesnių būdų yra elektromechaninis paviršiaus sukietinimas (EMA). EMA naudojo V.P. Bagmutovas, S. Markauskas, A. Jutas [1...4]. EMA sustiprinant paviršius, pastarasis veikiamas koncentruotu šiluminiu srautu bei deformuojamas plastiškai. Toks kompleksinis paviršiaus poveikis yra elektromechaninio apdirbimo technologijos esmė. Koncentruotas šilumos srautas gaunamas tekant elektros srovei kontaktų įrankis - detalė. Dėl didelio srovės stiprio (100 ... 1200 A) paviršius gali būti įkaitinamas virš 900 °C temperatūros. Kaitinant ir deformuojant paviršius labai susmulkinama plieno mikrostruktūra. Kadangi procesas spartus, nespėja pasireikšti rekristalizacija, gaunamas specifinis smulkiagrūdis sustiprinto paviršiaus sluoksnis - "baltasis" sluoksnis. EMA sustiprintas sluoksnis labai atsparus abrazyviniam dilimui. Stiprinant kintama elektros srove, gaunamas segmentinės makro struktūros sustiprintas sluoksnis - periodiškai besikeičiantys sukietinto ir termiškai atleisto metalo ploteliai. Toks paviršius pasižymi geromis tribologinėmis savybėmis. EMA sustiprintų gaminių paviršius yra daug kietesnis ir atsparesnis dilimui bei nuovargiui, negu sustiprintų įprastiniu terminiu apdirbimu. EMA plačiai taikomas stiprinti gaminamų ir atnaujinamų mašinų detalių paviršiams. Didelis efektas pasiekiamas stiprinant atnaujintų detalių aplydytas, užpurkštas ir elektrolitines dangas.

V.P. Bagmutovo ir kitų Volgogrado universiteto autorių darbuose buvo nagrinėjama sukietinto sluoksnio įtaka cikliniam nuovargiui, kai bandiniai po EMA buvo cikliška konsoliškai lenkiami. Nustatyta, kad ilgaamžiškumas iki suirimo ir statinės medžiagos charakteristikos priklauso nuo „baltojo sluoksnio“ smulkios struktūros, storio ir vijų persidengimo atstumo. Apkrauti minėtu nuovargio tipu, bandinio ilgaamžiškumas po EMA yra 22 % didesnis už nekietinto plieno 45. Autoriai rekomenduoja naudoti EMA detalėms, kurios dirba dinaminėmis, didelio apkrovimo sąlygomis ir kur vyrauja įtempių koncentracijų zonos.

Kiti būdai sukietinti paviršių:

Lazerinis paviršių apdorojimas. Paviršiaus sukietinimas (grūdinimas) lazeriu. Dideli įkaitinimo ir aušimo greičiai užtikrina didelio kietumo grūdinimo struktūrų susidarymą. Dėl intensyvaus kaitinimo nespėja išaugti austenito grūdėliai, o auštant ši smulkiagrūdė struktūra "užfiksuojama". Naudojant lazerį, galima sustiprinti visus metalus ir jų lydinius, stiprinamus terminiu būdu. Dėl galimų labai mažų

(iki 1 μm) termino poveikio zonos matmenų įmanoma modifikuoti net atskiras metalo struktūrinės dedamosias, pvz., apdoroti atskirus grūdelius, tvarkyti karbidų išsidėstymą lydinyje.

Elektrokibirkštinio padengimo (ar legiravimo) esmė - elektros kibirkštis (elektrinė erozija), kurios trukmė $10^{-5} \dots 10^{-3}$ s, o temperatūra siekia $10 \dots 15 \cdot 10^3$ °C. Vibratorius su elektrodu (50 Hz dažniu) pradeda veikti srovei pratekėjus tarp anodo (padengiamo gaminio) bei elektrodo. Elektroda prilietus prie anodo (detalės) prašoka kibirkštis –elektronų srautas teka iš anodo į elektroda ir dėl didelės energijos koncentracijos lokalus elektrodo paviršius aplydomas, susidaro didelis slėgis, kuris išlydytus elektrodo lašelius išmeta ant anodo. Čia lašeliai difunduoja į aktyvuotą anodo paviršių.

Elektroimpulsinis užpurškimas (arba padengimas) - elektros srovės laidininkų ar puslaidininkų dangų gavimas naudojant jų elektrinį sproginimą. Jo esmė yra ta, kad pratekiant laidininku stipriam srovės impulsui - ($1011 \dots 1012 \text{ A/m}^2$), laidininko medžiaga per $10^{-5} \dots 10^{-7}$ s užverda, perkaista, dalis laidininko medžiagos išgaruoja, likusi - pavirsta kelių mikrometrų dydžio lašeliais, kurie $600 \dots 700$ m/s greičiu pasiekia paruoštą padengimui paviršių, kondensuojasi ir prisivirina prie paviršiaus - formuojama danga.

Polimerinės dangos. Atnaujinant detales polimerai gali būti užliejami, aplydomi dujų liepsna ar beliepsniu sukūriniu būdu ir kitaip. Tribotechninės paskirties polimerinės medžiagos (fluorooligomerai, PTFE ir kt.) padengiamos pagal specialias tam skirtas technologijas.

Mechaninis paviršių sustiprinimas. Mechaninis detalės apdirbimas (atnaujinimas spaudimu) yra detalės matmenų ir formos pakeitimas perstumiant metalą iš nedirbančios detalės vietos. Tokio apdirbimo metu vyksta detalės plastinė deformacija. Ji gali būti:

- Šaltoji –kai apdirbama nekaitinant ir taip pakeičiamos mechaninės detalės savybės (padidėja kietumas, takumo ir atsparumo ribos, sumažėja plastiškumas)
- Karštoji –kai detalė apdirbama ją įkaitinus (pvz.: plienas - iki $1000 \dots 1200$ °C) ir vyksta metalo grūdelių rekristalizacija.

Mechaniškai apdirbama įvairiais metodais: susodinimas, išspaudimas, išplėtimas, tiesinimas, ištempimas, tačiau dauguma šių metodų nesusiję su tribotechninių savybių gerinimu. Tribotechniškai gali būti svarbus trinties paviršių sukietinimas naudojant apspaudimą arba apritinimą (valcavimą).

Grafitinimas. Grafitinimui naudojamas koloidinio grafito, gaunamo sumalant sluoksninį grafitą iki 1 μm dalelių, tirpalas. Po užpurškimo danga 2 val. džiovinama 180 °C. Gaunama $0,03 \dots 0,08$ mm storio grafito danga. Tokia danga pasižymi geromis tribotechninėmis savybėmis:

- Pagreitina trinties porų prisidirbimą;
- Pagerina antifrikcines savybes, 3 $\dots 8$ kartus padidindama tepamosios medžiagos pasiskleidimą paviršiuje;

- Sumažina paviršių dilimą;
- Žymiai sumažina trinties poros užsikirtimo tikimybę, pritrūkus tepimo medžiagos.
- Tuo pačiu prailgina tepalų naudojimo laikotarpį ir jų sąnaudas.

Metalizavimas. Metalizavimo proceso esmė – į metalizatorių tiekiamo metalo (viela ar milteliai) išlydymas ir išpurškimas panaudojant suspaustą orą ar inertines dujas ant ruošinio paviršiaus. Dangai gali būti naudojamas plienas, varis, cinkas, švinas, bronzos, žalvaris, aliuminis, kadmio, kietieji lydiniai. Optimalių savybių dangų storis – 0,5 ... 3 mm.

Aplydymo proceso metu ant pagrindiniu metalo yra aplydomas darbinis paviršiaus sluoksnis, kurio medžiaga pernešama iš elektrodo. Taip gaunamos nuo 0,25 mm ir storesnės dangos, atsparios abrazyviniams ir kavitaciniams dilimams, korozijai, erozijai, terminiam ir kontaktiniam nuovargiui.

Terminis paviršių sustiprinimas arba paviršinis užgrūdinimas naudojamas plieno ir ketaus detalių atsparumo dilimui padidinimui, iš dalies – pagerinti atsparumą nuovargiui. Šių savybių pagerinimas pasiekiamas pagerinant detalės paviršiaus struktūrą ir užgrūdintame sluoksnyje sudarant liekamuosius gniuždymo įtempimus. Grūdinimo gylis paprastai būna 1,5 ... 2,0 mm ir daugiau, jei po to paviršius apdorojamas arba jei numatomos didelės apkrovos.

Galvaninės dangos. Galvaninės ar elektrocheminės dangos – metalų ar jų lydinių sluoksniai, susidarę elektrolizės būdu ant elektrai laidžių paviršių. Elektrolitinės disociacijos metu cheminiai junginiai skaidosi į jonus veikiant tirpikliui (vandeniui). Metalų ir vandenilio jonai turi teigiamą krūvį, rūgščių liekanų ir hidroksilų – neigiamą. Detalė, kurią norima padengti metalo sluoksniu, yra jungiama atitinkamai prie neigiamo nuolatinės srovės poliaus – ji tampa katodu.

1.2 Mažaciklis deformavimas

Medžiagų mažaciklio deformavimo charakteristikų tyrimų metodika plačiai išnagrinėta L.F. Coffin, R.W. Landgrafo, N. Machutovo, [5...7]. Šiuose darbuose autoriai pateikia įvairių medžiagų vienalyčio apkrovimo mažaciklio deformavimo ir suirimo tyrimų duomenis, kurie priklauso nuo deformavimo režimų ir lygių, ciklo asimetrijos, ciklų skaičiaus bei temperatūros.

Mašinų elementai ir konstrukcijos, veikiamos atsitiktinių intensyvių apkrovų, suyra nuo sukauptų pažeidimų. Sukaupti pažeidimai atsiranda dėl daugiacyklio ir mažacyklio nuovargio, susijusio su ciklinėmis perkrovomis, sukeliančiomis tamprią plastinę deformaciją. Mažacyklis apkrovimas tai ciklinis tampriai plastinis deformavimas kai viršijama medžiagos proporcingumo riba ir detalėje atsiranda plastinės deformacijos žymiai sumažinančios jos ilgaamžiškumą. Ilgaamžiškumas esant

mažacikliam deformavimui priklauso nuo apkrovimo tipo, t.y. nuo to kas yra ribojama ar įtempiai ar deformacijos.

P. Chakraborti tyrinėjo plienus (IBQ30 ir IBQ60) su skirtingu martensito kiekiu [8]. Kaip parodė eksperimentiniai tyrimai, ciklinis stiprėjimas ir mažaciklio nuovargio charakteristikos plienui su mažesniu martensito kiekiu yra geresni, tuo tarpu didesnę martensito kiekį turinčiame pliene pastebimas ciklinis silpnėjimas. Ciklinis stiprėjimas - silpnėjimas aiškinamas dislokacijų atsiradimu ciklinių plastinių deformacijų procese. Abu metalai gerai atitinka Coffin - Manson modelį.

M. Higuchi ir kt. darbe [9] atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad mažaciklio sukimo ilgaamžiškumas yra mažesnis nei gryojo lenkimo. Šie autoriai nustatė, kad sukimo atveju bandinio visas paviršius yra veikiamas maksimalių deformacijų, tuo tarpu, esant grynajam lenkimui bandiniuose šios deformacijos atsiranda tik viršutiniuose ir apatiniuose bandinio sluoksniuose. Tokiu būdu, gryojo lenkimo atveju tikimybė, kad silpniausia bandinio paviršiaus vieta patiria didžiausius įtempius ir deformacijas, sumažėja.

1.3 Mažaciklis deformavimas įtempių koncentracijos zonose

Mašinų detalėse konstrukciniuose elementuose, veikiant ciklinei apkrovai, įtempiai ir deformacijos dažnai pasiskirsto netolygiai - įtempių (deformacijų) koncentracijos zonose įtempių koncentracijos stengiamasi išvengti parenkant aptakesnės formos detales, laikantis terminio apdirbimo ir nustatytų gamybos režimų. Tačiau dėl konstrukcinių detalės geometrinių ypatumų visiškai išvengti neįmanoma.

Įtempių koncentracijos koeficientas nustatomas analitiniais, skaitiniais ir eksperimentiniais metodais. Vietiniams arba šalia koncentratorių atsirandantiems įtempiams analitiškai skaičiuoti taikomi tamprumo ir plastiškumo teorijų metodai. Šie skaičiavimai yra labai sudėtingi ir geresni rezultatai gaunami esant tampriajam apkrovimui; esant tampriajam plastiniam apkrovimui, skaičiavimas dar labiau komplikuojasi, be to, sumažėja jo patikimumas, todėl dabar šie uždaviniai daug paprasčiau sprendžiami skaitiniais metodais, daugiausia baigtinių elementų metodu. Iš eksperimentinių metodų paminėtini fototampriųjų dangų ir holografijos metodai. Šie metodai reikalauja sudėtingos aparatūros todėl dažniau naudojamas skaitinis metodas

Mažaciklio apkrovimo tyrimai įtempių koncentracijos zonose, atsižvelgiant į medžiagos mechanines ir ciklines charakteristikas, koncentratorių formas, nominalios apkrovos pobūdį ir ciklą asimetriškumą, nagrinėti M. Daunio, D. Norkuvienės ir E. Narvydo [10...12] ir kitų darbuose. Tačiau

paviršiaus sukietinimo įtaka koncentracijos zonose mažaciklio nuovargio charakteristikoms beveik netirinėta, nors daugelyje darbų yra nurodoma teigiama paviršiaus sukietinimo įtaka, kai apkroviam yra daugiacyklis, t.y., vyksta tamprių deformacijų zonoje.

Analitinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, atlikus atsižvelgiant į konstrukcinę įtempių ir deformacijų koncentraciją esant mažaciklei apkrovai, pateikti [12] straipsnyje. Ciklinių deformavimo diagramų koncentracijos zonose skaičiavimo kiekviename apkrovimo pusciklyje metodika buvo patikrinta ir pagrįsta eksperimentu. Tyrimai buvo atlikti su koncentratoriais $\alpha_\sigma = 1,4; 2,5; 3,5$ ir cikliška silpnėjančia medžiaga – plienu 15X2MΦA. Straipsnyje pateikta įtempių ir deformacijų būvio koncentracijos zonose analizė parodė, kad, esant stacionariai nominalinei apkrovai, koncentracijos zonose nestacionariai keičiasi įtempių ir deformacijų koncentracijos bei asimetrijos koeficientai ir susidaro didelės plastinės deformacijos. Analitinių ir eksperimentų rezultatų palyginimas parodė, kad įtempių ir deformacijų būvio koncentracijos zonose skaičiavimo rezultatai neblogai atitinka eksperimentų duomenis.

Kadangi įtempių koncentracija turi didelę reikšmę cikliniam detalių patvarumui, techninėje literatūroje yra sukaupta labai daug duomenų apie įtempių koncentraciją esant dažniausiai pasitaikančios formos koncentratoriams.

Įtempių koncentracijos poveikis detalei priklauso nuo apkrovimo tipo ir detalės medžiagos. Esant statiniam apkrovimui, plastiškoms medžiagoms įtempių koncentracija neturi didelės reikšmės. Šiuo atveju koncentracijos zonoje, pavyzdžiui, plokštelėje šalia skylės, atsiranda tamprios plastinės deformacijos zonos, tačiau bendram plokštelės pasipriešinimui tempimo jėgai jos neturės žymios įtakos. Esant trapiam medžiagai, kada statinio apkrovimo diagrama beveik neturi tampriai plastinės dalies, koncentracijos zonoje gali būti viršyta medžiagos stiprumo riba ir prasidėti irimas supleišėjimas.

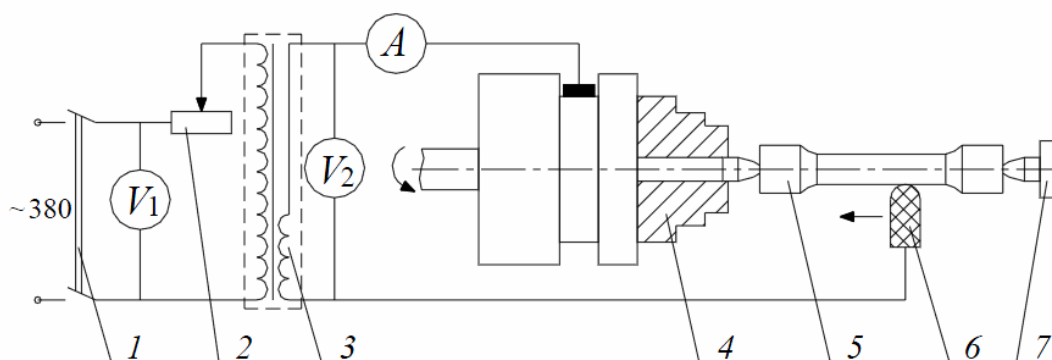
Įtempių koncentracija turi lemiamą reikšmę detalių cikliniam patvarumui (ilgaamžiškumui). Praktikoje beveik visi detalių pažeidimai, esant cikliniam apkrovimui, įvyksta įtempių koncentracijos zonose, dėl netinkamai įvertinto įtempių koncentracijos poveikio. Todėl projektuojant detales reikia ne tik labai kruopščiai nustatyti įvairių formos pasikeitimo zonų įtaką stiprumui, bet ir sumažinti, įtempių koncentracijos poveikį, keičiant geometriją bei koncentracijos koeficientų dydį detalėse. Konstrukcinius formos pakeitimus reikia daryti mažesnių įtempių zonoje, skersmenų pasikeitimo zonose ir kitose geometrijos pasikeitimo vietose, naudoti didesnius suapvalinimų spindulius ir t.t.

2. BANDIMŲ METODIKA IR PRIEMONĖS

2.1 Elektromechaninis apdirbimas

Elektromechaninis apdirbimas (EMA) – metalinių detalių paviršiaus apdirbimo būdas, gautas sujungus du žinomus būdus, t.y. plastinį paviršiaus deformavimą su elektrokontaktiniu kaitinimu. Dėl to gautas kompleksinis poveikis paviršiui – paviršius kaitinamas pratekant stipriai elektros srovei bei išsiskiriant šilumai dėl trinties, tuo pat metu paviršius plastiškai deformuojamas. Kadangi srovės šilumos energija veikia labai mažame ($\approx 1 \dots 2 \text{ mm}^2$) plote, EMA priskiriamas prie paviršiaus apdirbimo būdų koncentruota energija.

Detalių EMA dažniausiai naudojamos tekinimo staklės. Principinė įrenginio schema pavaizduota 2.1 paveiksle.



2.1 pav. EMA tekinimo staklėse elektromechaninė schema: 1 – įtampos jungiklis; 2 – reostatas; 3 – įtampos žeminantis transformatorius; 4 – griebtuvas; 5 – apdirbama detalė; 6 – specialus kietlydinio T15K6 plokštelės prispaudimo įtaisas; 7 – arkliukas.

Elektromechaniniam detalių apdirbimui buvo naudotos universalios tekinimo staklės 1K62, žeminimo transformatorius 3, reguliavimo reostatas 2, įtampos ir srovės reguliavimo ir matavimo įtaisai. Elektros srovė teka per transformatoriaus antrinę apviją 3, kurios viena grandinės šaka prijungta prie staklių griebtuvo 4. Srovė per griebtuvą perduodama į apdirbama ruošinį 5. Tuo tarpu kita grandinės šaka prijungta prie apdirbimo įrankio 6. Srovės stipris antrinėje grandinėje reguliuojamas, atsižvelgiant į įrankio ir apdirbamosios detalės lietimosi vietos varžą, ir apdirbto paviršinio sluoksniui kokybės keliamus reikalavimus. Srovės stipris gali būti keičiamas nuo 100 iki 1000 A, o įtampa – 0,25...8 V.

Sukietinimo metu apdirbimo įtaisas tvirtinamas tekimo staklių suporte. Nuo staklių jis izoliuojamas tekstolitinėmis plokštelėmis. Apdirbama detalė tvirtinama tekimo staklėse tarp centrų. Sukimo judesys perduodamas nuo staklių griebtuvo. Įrankio laikikliui privesti prie detalės yra naudojama staklių skersinė pastūma. Įrankio prispaudimo jėga F reguliuojama prispaudimo įtaiso indikatoriumi. Apdirbimo metu įrankiui suteikiama išilginė staklių pastūma s , todėl visas detalės paviršius apdirbamas vienodu režimu. Kadangi įrenginio prispaudimo jėga, išilginė pastūma ir detalės sukimosi greitis yra pastovūs, tai šie veiksniai leidžia deformuoti ir sulyginti detalės paviršiaus nelygumus

Elektromechaninio sukietinimo metu naudotasi šiais režimais:

- kietlidinio plokštelė T15K69 prispaudimo jėga $F = 200$ N;
- apdirbimo greitis $v = 7,85$ m/min.;
- elektros srovės stiprumas $I = 220$ A;
- bandinio apsisukimai $n = 250$ r/min.;
- įrankio pastūma $s = 0,11$ mm/r;
- praėjimų skaičius $i = 2$.

Lyginant elektromechaniniu būdu metalo paviršių ir jį kietinant, keičiasi paviršiaus ir negiliai nuo paviršiaus esančio metalo savybės. Nustatyta, kad sumažinus elektromechaninio apdirbimo greitį arba padidinus praėjimų skaičių nuo 1 iki 3-4, apdirbtas paviršius esti glotnesnis. Glotniausias paviršius gaunamas, panaudojus maždaug 500 – 650 A srovę ir apie 800 N spaudimą.

Elektromechaniniu būdu apdirbtas paviršius tampa glotnesniu nes, apdirbant šiuo būdu elektros srovė įkaitina paviršiaus mikronelygumus, o įrankis juos mechaniškai sulygina. Aišku, apdirbant mažesniu greičiu ir stipresne srove, labiau įkaista mikronelygumai, o didesne jėga spaudžiamas prie apdirbamojo paviršiaus įrankis juos geriau išlygina. Toliau keičiant minėtus režimus, glotnų paviršių galima sugadinti, nes nuo didelio įkaitimo greičiau nudyla apdirbančioji kietlydininė plokštelė. Jos nudilęs nelygus paviršius pradeda draskyti metalą. Esant per didelei spaudimo jėgai, įrankis gali išdraskyti paviršių. Šiurkštesniam paviršiui apdirbti reikia naudoti stipresnę srovę ir jėgą. Glotnesniam paviršiui pakanka švelnesnių režimų.

2.2 Baltasis sluoksnis

Vykstant elektromechaniniui apdirbimui, įrankio ir detalės kontakto zona įkaista iki aukštos temperatūros, kurios pakanka, kad įvyktu austenitinis virsmas. Įkaitinto paviršiaus sluoksnio tūris yra ganėtinai mažas, todėl šiluma greitai nuvedama gilyn link detalės šerdies. Tokiu būdu, detalės įkaitintas paviršinis sluoksnis greitai ataušta ir dėl jame vykstančių struktūrinių pakitimų, sukietėja. Susidaro vadinamasis „baltasis“ sluoksnis, kuris susideda iš liekamojo austenito ir smulkios dispersijos martensito. Struktūros pokyčiai ir liekamieji įtempiai „baltajame“ sluoksnyje pagerina šio sluoksnio ir plieno 45 po EMA mechanines savybes. Bendras bandinio plastinių deformacijų prieaugis priklauso nuo liekamojo austenito grūdelių orientacijos. Tai skatina atskirus kristalų grupių plastinius slydžius tarpatominiuose plokštumose. Šie veiksniai kai kuriais atvejais apunkina deformavimą, padidindami maksimalių tangentinių įtempių poveikį ir pagerindami tampriąsias savybes.

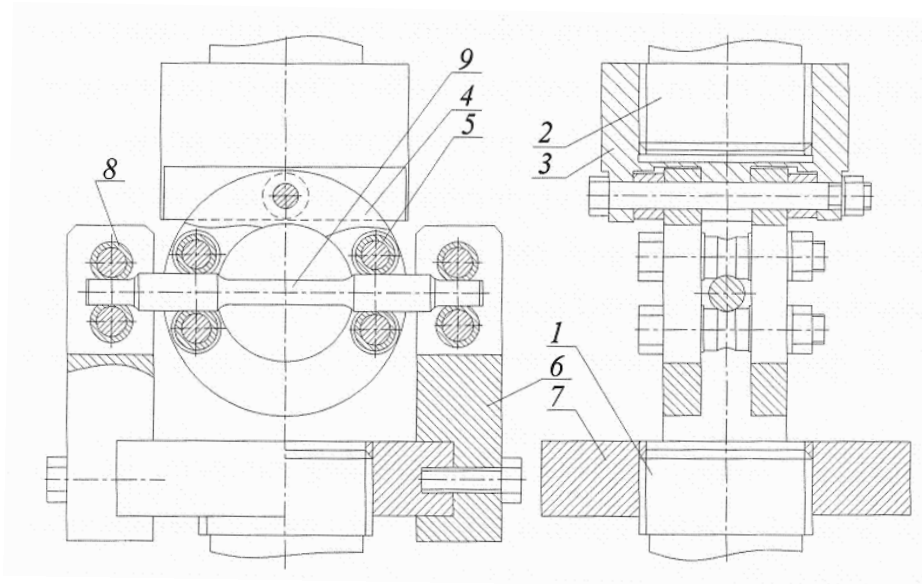
Be to, išmatavus šio sluoksnelio kietumą, matyti, kad sluoksnelis yra kietesnis už kiečiausiai užgrūdintą plieną. Taigi baltasis sluoksnelis, tarytum koks kiaukutas, apgaubia detalę ir prailgina jos amžių, padidina patvarumą.

2.3 Mažaciklio grynojo lenkimo bandymų įranga

2.3.1 Apkrovimo įrenginys

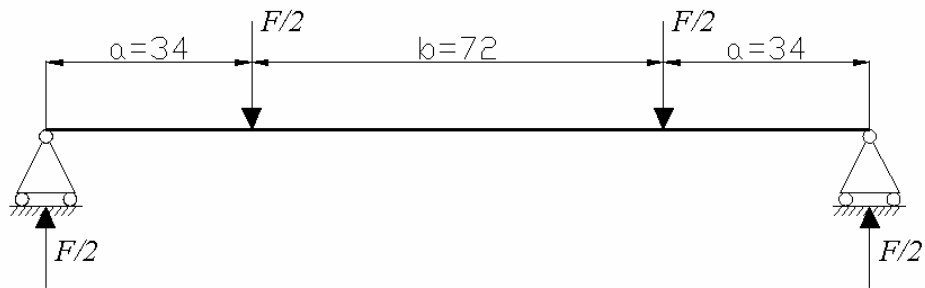
Mažaciklio grynojo lenkimo eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti 50 kN tempimo-gniuždymo bandymų mašina, kurios griebtuose papildomai buvo sumontuotas specialus įrenginys, skirtas įtvirtinti lenkimą bandinį. Šio įtaiso bendras vaizdas pateiktas 2.2 paveiksle.

Šiuo įtaisu bandinio darbinėje dalyje sukuriamas pastovus lenkimo momentas M_b . Ant mašinos viršutinio standžiai įtvirtinto griebto 2 užsukama veržlė 3, kurioje varžtu tvirtinami du žiedai 4 su dviem atraminių ritinėlių 5 poromis. Apatiniame slankiojančiame mašinos griebte 1 fiksuojamas pagrindas 7 su dviem laikikliais 6. Laikikliuose 6 sumontuotos kitos dvi atraminių ritinėlių 8 poros. Bandinys 9 įstatomas tarp ritinėlių 5 ir 8.



2.2 pav. Grynojo lenkimo įtaisas

Ritinėliai veikia bandinį apkrovomis $F/2$ ir darbinėje jo dalyje sukeliamas lenkimo momentas $M_b = \left(\frac{F}{2}\right) \cdot a$. $a = 34$ mm. Kadangi buvo naudotas simetrinis apkrovimo ciklas, tai periodiškai kitos jėgos $F/2$ dydis ir ženklas. 2.3 paveiksle pateikta bandinio grynojo lenkimo schema.



2.3 pav. Bandinio grynojo lenkimo schema

Ritinėliuose 5 yra apskritimo lauko formos griovelis atitinkantis bandinio paviršių. Griovelis padidina kontakto plotą su bandinio paviršiumi, tuo pačiu sumažina įtempimų koncentraciją kontakto vietoje. Kad eksperimento metu bandinys nepasisuktų apie savo ašį, naudojami ritinėliai 8, kurie remiasi į bandinio galų plokštumas. Tarp ritinėlių porų 5, 8 ir bandinio atraminių paviršių turi būti paliktas tarpelis, kuris didelių deformacijų metu neleistų bandiniui strigti. Eksperimentų metu nustatyta, kad nagrinėjamu atveju šis tarpelis negali būti mažesnis nei 0,8 mm. Be to, visi ritinėliai ir pats žiedas 4

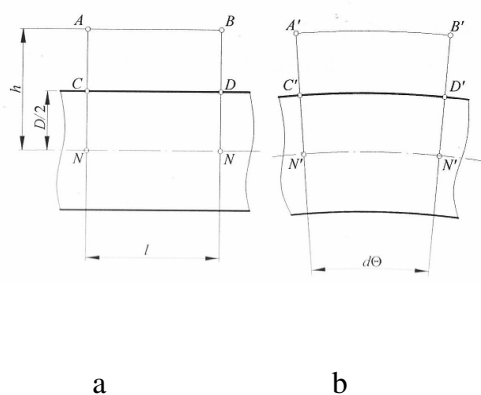
turi lengvai sukinėtis savo ašyse, taip kad bandinio darbinėje dalyje būtų užtikrintas lenkimas. Eksperimentų metu labiausiai labiausiai apkraunami ritinėliai 5. Todėl jie buvo termiškai apdoroti iki kietumo HRC 40...45.

Esant grynajam lenkimui nereikalingas didelis bandinio tvirtinimo įtaiso mazgų padėties tikslumas. Lenkiamo bandinio tvirtinimo prietaiso matmenų a ir b (2.3 schema) nuokrypos $\pm 0,15$ mm. Todėl maksimalus lenkimo momento M_b kitimas visame bandinio darbinės dalies ilgyje neviršija 1,6%.

2.3.2 Lenkimo momentų ir deformacijų matavimas bei skaičiavimas

Atliekant mažaciklio grynojo lenkimo eksperimentus, savirašis prietaisas užrašo kintančią bandymų mašinos dinamometro matuojamą jėgą F . Pagal jėgą F nustatome stygo darbinėje dalyje veikiančią lenkimo momentą. Svarbu yra nustatyti grynojo lenkimo apkrauto bandinio nulinio pusciklio maksimalius įtempius σ_{\max} , veikiančius išoriniuose bandinio sluoksniuose. Esant tamriajai deformacijai, įtempių reikšmę galime nesunkiai apskaičiuoti, nes tiek lenkimo momentas M_b , tiek lenkimo atsparumo momentas W_x yra žinomi. Kai deformacija viršija proporcingumo ribą, σ_{\max} įtempius apskaičiuoti sudėtingiau, nes priklausomybė M_b - σ šioje apkrovimo zonoje netiesinė, o jos analitinė išraiška yra sudėtingesnė.

Svarbiausia nustatyti bandinio vietas, kuriose veikia didžiausi įtempimai. Grynojo lenkimo atveju tai viršutinis ir apatinis stygo sluoksniai. Šiuo atveju stygo deformacijos gaunamos dėl plokščių skerspjūvių pasisukimo deformavimo tiesėje l . Tempiamo stygo dalyje atstumas tarp šių skerspjūvių padidėja, o gniuždomoje dalyje sumažėja. Neutraliojo sluoksnio (neutraliosios linijos) ilgis l nesikeičia 2.4 pav.



2.4 pav. Bandinio paviršių deformavimo schema grynuoju lenkimu: a – vaizdas iki deformacijos; b – vaizdas po deformacijos

Labiausiai deformuojamų sluoksnių santykinis pailgėjimas:

$$e = \frac{Dd\Theta}{2l}; \quad (2.1)$$

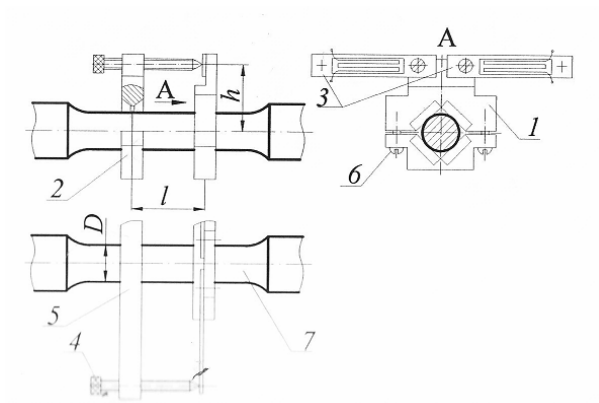
čia e – labiausiai deformuojamų apvalaus skerspjūvio strypo sluoksnių santykinis pailgėjimas; l – nuotolis tarp skerspjūvių; $d\Theta$ - plokščių skerspjūvių pasisukimo kampas; D – bandinio skersmuo.

2.4 pav. a pavaizduotos atkarpos CD ir NN atitinka viršutiniojo ir neutraliojo sluoksnių padėtis iki deformacijos. Po deformacijos 2.4 pav. b šiuos sluoksnius atitinka lankai $C'D'$ ir $N'N'$. Deformacijos matavimo plokštuma, kurią atitinka atkarpa AB , yra nutolusi nuo bandinio simetrijos ašies dydžiu h ir bandiniui deformuojantis išlinksta lanku $A'B'$. Deformometras matuoja šio lanko ilgio pokytį $A'B'-AB$, kurį pažymime $\Delta_{A'B'}$. Tada strypo viršutinio sluoksnio CD deformacija esant grynajam lenkimui galime apskaičiuoti pagal priklausomybę:

$$e = \frac{D\Delta_{A'B'}}{2hl} m_d; \quad (2.2)$$

čia m_d – deformacijos matavimo mastelis.

Grynojo lenkimo deformacijoms matuoti buvo suprojektuotas deformometras 2.5 pav.

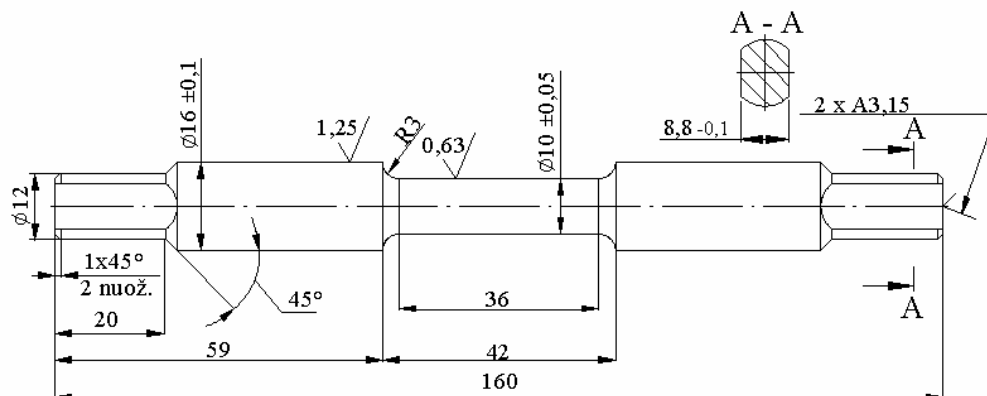


2.5 pav. Deformometras apvalaus skerspjūvio bandinio grynojo lenkimo deformacijoms matuoti

Deformometrą sudaro dvi prizminio skerspjūvio apkabėlės 1 ir 2, kurios varžteliais 6 tvirtinamos ant bandinio 7 darbinės dalies paviršiaus. Tarp apkabėlių išlaikomas atstumas l . Esant tokiam tvirtinimo būdai, bandinio paviršiniai sluoksniai lieka nepažeisti. Ant apkabėlės 1 konsoliškai pritvirtintos dvi plokštelės 3 ant kurių priklijuoti tenzorezistoriai, sujungti į tenzometrinių tiltelių. Ant apkabėlės 2 tvirtinasi laikiklis 5 su dvejomis reguliuojamo ilgio atraminėmis ašelėmis 4. Kai bandinys deformuojasi, apkabėlės pasisuka kampu $d\Theta$. Atraminės plokštelės palenkia plokšteles 3 ant kurių priklijuoti tenzorezistoriai deformuojami sukeldami atitinkamus tiltelio įtampos pokyčius. Šiuos pokyčius registruoja savirašis prietaisas. Dviejų plokštelių tenzometrinių keitiklių kompensuoja deformometro pastatymo paklaidą, o tenzorezistoriai priklijuoti priešinga kryptimi padidina matavimo jautrumą.

2.4 Bandiniai, jų forma ir matmenys

Statinio ir mažaciklio bandymams atlikti buvo pagaminti laiptuoti bandiniai su koncentratoriumi. Pagal EMA galimybes, įtempių koncentratoriams, bandinio skersmenų pasikeitimo vietoje, buvo parinkta 3 mm spinduliu suapvalinta dalis. Teorinis koncentracijos koeficientas lenkiant $K_t = 1,32$ [13]. Nesukietintų ir sukietintų po EMA bandinių matmenys ir formos yra identiški. Bandinio darbo brėžinys pateiktas 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Statinio ir mažaciklio apkrovimo bandinys grynojo lenkimo atveju

Naudojami bandiniai turi užtikrinti darbinės dalies įtempių būvio vienalytiškumą visose bandymo fazėse iki nuovarginio plyšio atsiradimo. Bandinio formos ir matmenų parinkimą lemia įtempių koncentracijos koeficientų mažiausios reikšmės darbinių ir atraminių paviršių perėjimo zonose,

taip pat reikia įvertinti ir įtempimų koncentraciją bandinio atraminio paviršiaus ir tvirtinimo įtaiso ritinėlių kontakto vietoje [14].

Visi bandiniai turi būti pagamintas iš vieno strypo, vienodos cheminės sudėties ir vienodo terminio apdirbimo. Tyrimams atlikti buvo pasirinkta cikliškai silpnėjanti medžiaga p kokybiškasis anglinis konstrukcinis plienas 45 iš 16 mm apvalaus skersmens valcuoto strypo.

Baigiamasis badinių mechaninis apdirbimas turi būti labai tikslus, svarbu išlaikyti užduotus darbinės dalies padėties ir formos tikslumus, maksimaliai sumažinti paviršių sukietinimą.

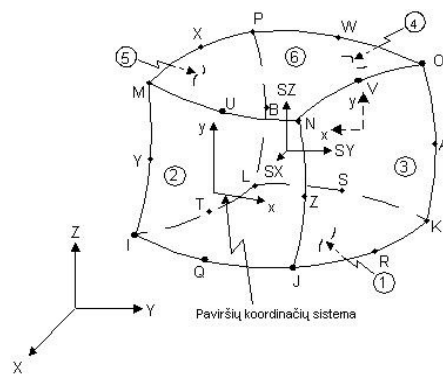
2.5 Baigtinių elementų metodas

Labiausiai paplitęs visų apytikslių skaičiavimo metodų tarpe yra baigtinių elementų metodas (BEM). BEM - skaitmeninis metodas, apimantis sistemos geometrinio modelio kūrimą bei jos fizikinių savybių modeliavimo procesą ir leidžiantis rasti apytikslus diferencialinių lygčių dalinėmis išvestinėmis ar integralinių lygčių sprendinius. BEM modeliavimo proceso pagrindą sudaro bet kokios fizinės sistemos skaidymas į baigtinių skaičių paprastos formos elementų. Tada daroma prielaida, kad kiekviename elemente nagrinėjamas nežinomas kinta nesudėtingu dėsniu ir diferencialinė lygtis jame pakeičiama į algebrinių lygčių sistemą. Sujungus visų elementų sistemas gaunama sistema, kurią išsprendus gaunamas atsakymas.

Teoriniu požiūriu BEM yra analogiškas kitiems skaitiniams metodams, tačiau, taikant jį įvairių techninių problemų sprendimui, metodas pasižymi keletu privalumų:

- 1) duomenys sudaromi automatiškai, panaudojant vartotojui labai patogius geometrinius įvaizdžius;
- 2) metodas leidžia įvertinti įvairiausias kraštines sąlygas;
- 3) tame pačiame modelyje galima naudoti įvairios formos elementus, o tai labai padidina metodo efektyvumą;
- 4) lengvai įdiegiamos tinklų sutankinimo įtempimų koncentracijos vietose galimybės.

Panaudojus matematinio modeliavimo baigtinių elementų (BE) programą *ANSYS* buvo nustatyti įtempimų ir deformacijų dėsningumai. Taip pat buvo sukurti erdviniai BE modeliai, kurie savo matmenimis atitiktų 2.6 paveiksle pavaizduotus eksperimentinius bandinius. Modeliams sukurti galima pasirinkti iš įvairių tipų BE, kurių įtaka skaičiavimo tikslumui nagrinėta [15] literatūroje, bet atsižvelgiant į techninių priemonių pajėgumą, modeliams sukurti buvo parinkta *Solid9* tipo BE 2.7 pav.



2.7 pav. SOLID95 tipo BE

Solid9 elementai pasižymi tuo, kad kubo formos sudaryti iš 20 mazgų ir gali turėti bet kokią erdvinę orientaciją. Kiekvienas mazgas turi 3 laisvės laipsnius X , Y ir Z ašių kryptimis. Elemento poslinkiai aprašomi linijine aproksimacija. Taip pat, šie elementai puikiai tinka modeliuoti kreivus paviršius, todėl juos galima naudoti apvalaus skerspjūvio strypo modeliui kurti. Šio tipo elementais patogu atlikti skaičiavimus esant tampriai plastiniam deformavimui, nustatyti poslinkiams, deformacijoms, įtempiams ir pan. [13]. Naudojant šio tipo BE, yra patogus skaitinių eksperimentų rezultatų apdorojimas ir analizė.

Naudojant BEM programą ANSYS, sukurti dvisluoksniai (plieno 45 šerdis ir išorinis „baltasis“ sluoksnis) konstrukcinio elemento erdviniai skaitiniai modeliai. Skaičiavimams šerdies mechaninės charakteristikos paimtos pagal plieno 45 statinio tempimo bandymo duomenis, o išorinio „baltojo“ sluoksnio – pagal [1,4] literatūroje pateiktus analitinio skaičiavimo duomenis. Pagal tuos pačius paskaičiavimus buvo parinktas ir sukietinto „baltojo“ sluoksnio storis lygus $50 \mu m$. Modeliuojamų sluoksnių mechaninės charakteristikos pateiktos 2.1 ir 2.2 lentelėse.

2.1 lentelė

Skaitinio modelio medžiagų mechaninės charakteristikos plienui 45 (šerdis)

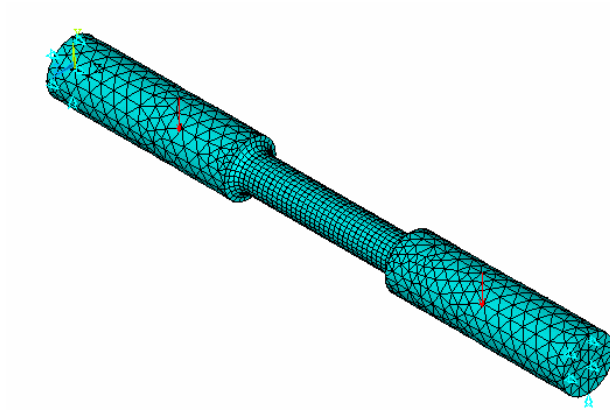
σ_{pr} , MPa	R_m , MPa	σ_f , MPa	e_{pr} , %	e_u , %	Z , %
375	786	882,5	0,22	29	30

2.2 lentelė

Skaitinio modelio medžiagų mechaninės charakteristikos išoriniui „baltajam“ sluoksniui

σ_{pr} , MPa	R_m , MPa	σ_f , MPa	e_{pr} , %	e_u , %	Z , %
709	2033	2033	0,355	4,4	4

Grynojo lenkimo atveju buvo sudaryti du BE modeliai (sukietinto ir nesukietinto plieno). Atitinkantys $\frac{1}{2}$ bandinio darbinės dalies. BE tinklelis sutankintas visame „baltojo“ sluoksnio paviršiuje. Modelis pavaizduotas 2.8 paveiksle.

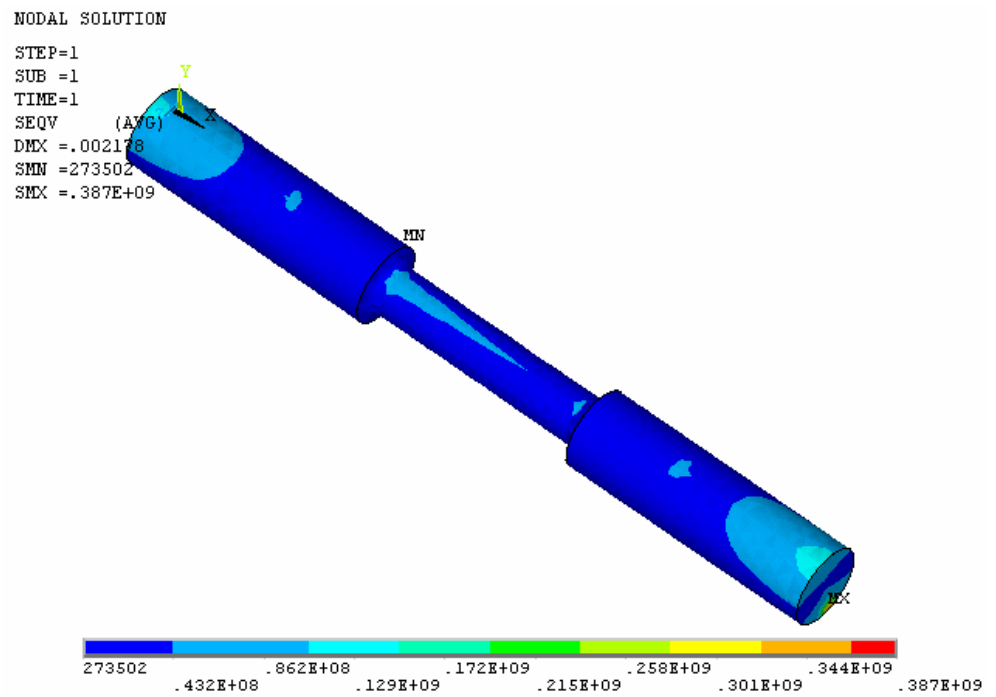


2.8 pav. Lenkiamo strypo su koncentratoriumi BE modelio tinklelis

Skaičiuojant modelį, mažesnio skersmens galas buvo įtvirtintas X ašies kryptimi. Be to didesnio skersmens gale pridėta taškinė atrama, suvaržanti poslinkius Y ašies kryptimi. Ties didesnio skersmens galu, pagal grynojo apkrovimo schema 2.3 pav., pridėta jėga, kuri sudaro lenkimo momentą M_b taip, kad nominalūs įtempimai $\bar{\sigma}_{in}$ neto skerspjūvyje būtų 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2 plieno 45 proporcingumo ribos. Skaičiavimas buvo atliekamas modeliui esant su sukietintu sluoksniu ir be jo.

Skaičiuojant modelius, buvo varijuojama elementų skaičiumi ir dydžiu ties koncentratoriumi, analizuojami gaunamų skaičiavimų rezultatai. Gavus nežymius rezultatų pokyčius, buvo laikoma, kad tinklelis tinkamas tolesniems skaičiavimams. BE tinklelis buvo generuojamas nurodant elemento kraštinės ilgius. Ties suapvalinimo spinduliu elemento kraštinė sutankinta iki $5h$ (čia $h = 50\mu$ sukietinto sluoksnio storis). Tuo tarpu per visą „darbinį bandinio“ ilgį elemento kraštinės ilgis $30h$, o nesukietintuose vietose – $50h$.

Įtempių pasiskirstymas koncentracijos zonose pavaizduotas 2.9 paveiksle.

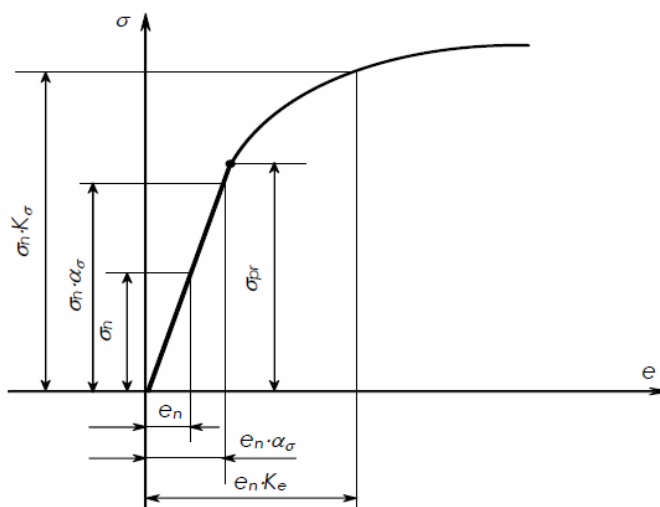


2.9 pav. Įtempių pasiskirstymas koncentracijos zonose esant grynajam lenkimui

3. LENKIMO EKSPERIMENTŲ IR ANALITINIŲ SKAIČIAVIMŲ REZULTATAI ĮTEMPIMŲ KONCENTRACIJOS ZONOSE

3.1 Koncentracijos koeficientų skaičiavimas

Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas koncentracijos zonoje, esant tampriai plastiniam apkrovimui, analizuojamas analitiniais, eksperimentiniais ir skaitiniais metodais. Tačiau šiuo atveju, skirtingai negu esant tampriam apkrovimui, uždavinys yra gerokai sudėtingesnis, nes turi būti sprendžiamas esant netiesiniams įtempių ir deformacijų tarpusavio ryšiams. Todėl dabar apytiksliai analitiniai metodai, kurie yra patenkinamai pagrįsti eksperimentais, tinka tikrai tipiniams koncentratoriams, pavyzdžiui, skylėms, suapvalinimo spinduliams, grioveliams. Pagrindiniai šiuolaikiniai įtempių ir deformacijų koncentracijos uždavinių sprendimo metodai yra skaitiniai baigtinių paviršinių elementų metodai. Kaip parodė konstravimo praktika, tinkamai parinkus elementų tinklą BEM gaunami tikslūs sprendiniai, todėl jis gali būti taikomas kitiems metodams tikrinti.



3.1 pav. Įtempių ir deformacijų koncentracijos koeficientų nustatymo schema esant tampriai plastiniam deformavimui

Esant tampriam deformavimui, t. y. tiesiniam ryšiui tarp įtempių ir deformacijų, pakanka vieno teorinio α_σ arba faktinio k_t koncentracijos koeficiento įtempimams ir deformacijoms koncentracijos zonoje apskaičiuoti (2.1 pav.), tai yra:

$$\bar{\sigma}_{\max} = \bar{\sigma}_n \alpha_\sigma$$

$$\bar{e}_{\max} = \bar{e}_n \alpha_\sigma$$

Perėjus į tampriai plastinį deformavimą, kaip matyti iš 3.1 pav., ryšys tarp įtempių ir deformacijų tampa netiesinis, jis priklauso nuo deformavimo diagramos sustiprėjimo dalies formos ir atsiranda du koncentracijos koeficientai: K_σ – įtempių ir K_e – deformacijų. Taigi, esant tampriai plastiniam deformavimui,

$$\bar{\sigma}_{\max} = \bar{\sigma}_n \cdot K_\sigma \quad (3.1)$$

ir

$$\bar{e}_{\max} = \bar{e}_n \cdot K_e \quad (3.2)$$

Esant tampriai plastiniam deformavimui, įtempių ir deformacijų būviui koncentracijos zonose nustatyti turi būti naudojami trys parametrai: tampriosios srities įtempių koncentracijos koeficientas α_σ ir tampriai plastinės srities įtempių K_σ bei deformacijų K_e koncentracijos koeficientai. Sprendžiant šį uždavinį, būtina nustatyti faktinį ryšį tarp šių trijų parametru, nes α_σ priklauso nuo detalės geometrijos ir apkrovimo būdo (tempimas, sukimas, lenkimas), o K_σ ir K_e – nuo deformavimo diagramos formos. Sprendžiant šį uždavinį analitiškai, darant įvairias prielaidas, buvo pasiūlyta keletas priklausomybių, siejančių šiuos tris parametrus.

H. Neuberio pasiūlyta lygybė [16]:

$$\frac{K_\sigma \cdot K_e}{\alpha_\sigma} = 1 \quad (3.3)$$

E. Stouelo [17]:

$$K_e = \frac{\alpha_\sigma - 1}{k_\sigma - 1} K_\sigma \quad (3.4)$$

Iš šių dviejų ilgai naudotų lygybių populiarsnė buvo H. Neuberio lygybė, nes ji yra gerokai paprastesnė ir gaunami geriau su eksperimentais sutampantys rezultatai. Tačiau kruopščiai patikrinus šias priklausomybes pasirodė, kad kai kuriais atvejais, pavyzdžiui, esant nedideliame medžiagos sustiprėjimo laipsniui, būna rezultatai nepatenkinami. Dėl šios priežasties N. Machutovas [7] pasiūlė patobulintą H. Neuberio priklausomybę: (3.3) lygybėje vietoj 1 panaudojo funkciją $F \neq 1$, priklausančią nuo koncentratoriaus geometrijos, nominaliųjų įtempių σ_n ir deformavimo diagramos, t.y. funkcijos $f(\sigma, e)$. Taip H. Neuberio priklausomybė buvo transformuota į:

$$\frac{K_\sigma \cdot K_e}{\alpha_\sigma} = F[\alpha_\sigma, \bar{\sigma}_n, f(\sigma, e)]; \quad (3.5)$$

$$F = \frac{1}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_n)^{n(1-m_0)[1-(\sigma_n-1/\alpha_\sigma)]}}; \quad (3.6)$$

$$F = \frac{1}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_n)^{n(1-G_T)[1-(\sigma_n-1/\alpha_\sigma)]}}. \quad (3.7)$$

Laipsninė deformavimo diagramos aproksimacija (3.6) ir tiesinė deformavimo diagramos aproksimacija (3.7 lygybėse konstanta $n = 0,5$).

Vėliau G. Glinka pasiūlė priklausomybę [18]:

$$\frac{1}{2}(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_n)^2 = \int_0^{\bar{e}_{\max}} \bar{\sigma}(\bar{e}) d\bar{e}. \quad (3.8)$$

Visos čia pateiktos (3.3), (3.4), (3.5) ir (3.8) lygybės yra sudarytos remiantis vienokiomis ar kitokiomis prielaidomis.

Taigi laikydami, jog

$$\bar{\sigma}_i = \bar{e}_i, \text{ kai } \bar{\sigma}_{in} \leq 1 \quad (3.9)$$

$$\bar{\sigma}_i = \bar{e}_i^{-m_0}, \text{ kai } \bar{\sigma}_{in} > 1 \quad (3.10)$$

iš (3.3) lygybės gauname, kad

$$K_{\sigma} = \alpha_{\sigma}^{\frac{2m_0}{1+m_0}} \cdot \bar{\sigma}_{in}^{\frac{m_0-1}{m_0+1}}; \quad (3.11)$$

$$K_e = \alpha_{\sigma}^{\frac{2}{1+m_0}} \cdot \bar{\sigma}_{in}^{\frac{1-m_0}{1+m_0}}; \quad (3.12)$$

kai $\bar{\sigma}_{in} \leq 1$

$$K_{\sigma} = \alpha_{\sigma}^{\frac{2m_0}{1+m_0}}; \quad (3.13)$$

$$K_e = \alpha_{\sigma}^{\frac{2}{1+m_0}}; \quad (3.14)$$

kai $\bar{\sigma}_{in} > 1$

Panaudojant (3.4) lygybę, gaunama:

$$K_e = \frac{\bar{\sigma}_{in}^{\frac{1-m_0}{m_0-1}}}{[K_e - (\alpha_{\sigma} - 1)]^{\frac{1}{m_0-1}}}, \text{ kai } \bar{\sigma}_{in} \leq 1; \quad (3.15)$$

$$K_e = \frac{1}{[K_e - (\alpha_{\sigma} - 1)]^{\frac{1}{m_0-1}}}, \text{ kai } \bar{\sigma}_{in} > 1. \quad (3.16)$$

Abiem atvejais:

$$K_{\sigma} = \frac{K_e}{K_e - (\alpha_{\sigma} - 1)} \quad (3.17)$$

Naudojant N. Machutovo priklausomybę (3.5), gaunama

$$K_{\sigma} = \frac{\alpha_{\sigma}^{\frac{2m_0}{1+m_0}} \bar{\sigma}_{in}^{\frac{m_0-1}{m_0+1}}}{\left(\alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_{in}\right)^{\frac{1-m_0}{1+m_0}} [1 - (\bar{\sigma}_{in}^{-1} / \alpha_{\sigma})]^{m_0}}; \quad (3.18)$$

$$K_e = \frac{\alpha_{\sigma}^{\frac{2}{1+m_0}} \bar{\sigma}_{in}^{\frac{m_0-1}{m_0+1}}}{\left(\alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_{in}\right)^{\frac{1-m_0}{1+m_0}} [1 - (\bar{\sigma}_{in}^{-1} / \alpha_{\sigma})]}; \quad (3.19)$$

kai $\bar{\sigma}_{in} \leq 1$, ir

$$K_{\sigma} = \frac{\alpha_{\sigma}^{\frac{2m_0}{1+m_0}}}{\left(\alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_{in}\right)^{\frac{1-m_0}{1+m_0} \left[1 - (\bar{\sigma}_{in} - 1/\alpha_{\sigma})\right] m_0}}; \quad (3.20)$$

$$K_{\sigma} = \frac{\alpha_{\sigma}^{\frac{2m_0}{1+m_0}}}{\left(\alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_{in}\right)^{\frac{1-m_0}{1+m_0} \left[1 - (\bar{\sigma}_{in} - 1/\alpha_{\sigma})\right] m_0}}; \quad (3.21)$$

kai $\bar{\sigma}_{in} > 1$

Pasinaudoję G. Glinkos pasiūlyta (3.8) lygybe, abiem atvejais gaunama [19]:

$$K_{\sigma} = \frac{\left\{1 + \frac{m_0 + 1}{2} \left[\left(\alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_{in} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{\frac{m_0}{m_0 + 1}}}{\bar{\sigma}_{in}}; \quad (3.22)$$

$$K_e = \frac{\left\{1 + \frac{m_0 + 1}{2} \left[\left(\alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_{in} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{m_0 + 1}}}{\bar{\sigma}_{in}}; \quad (3.23)$$

kai $\bar{\sigma}_{in} \leq 1$

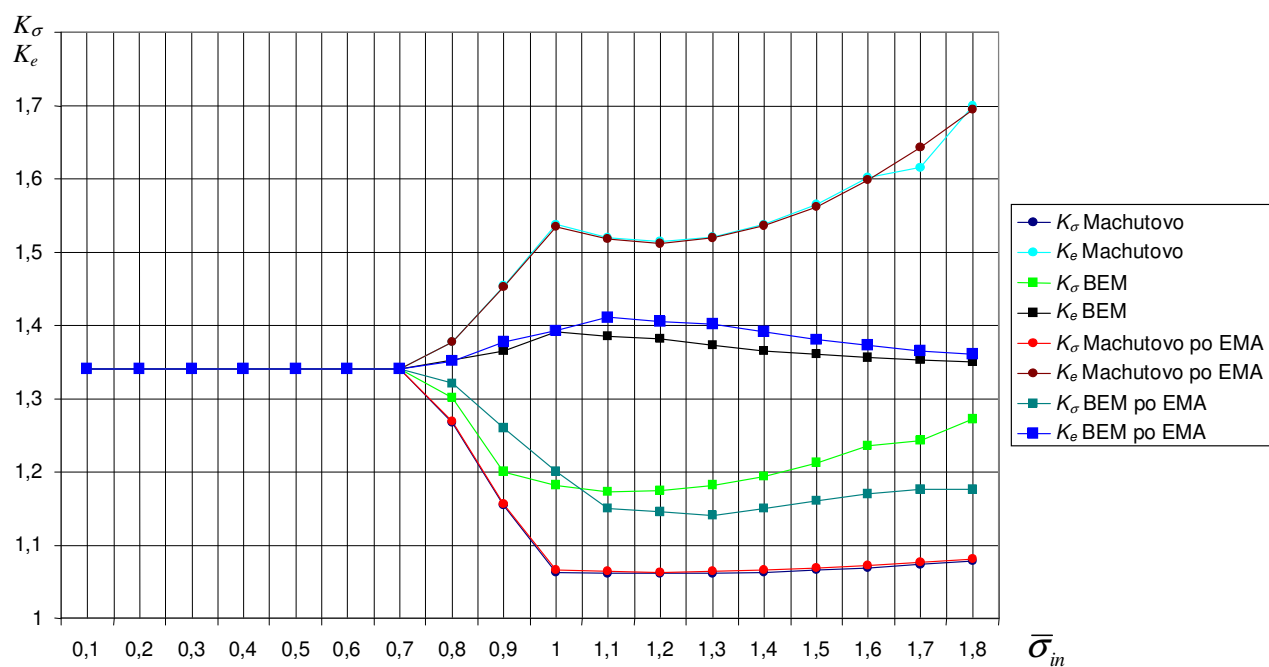
$$K_e = \frac{\left\{1 + \frac{m_0 + 1}{2} \left[\left(\alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_{in} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{m_0 + 1}}}{\bar{\sigma}_{in}^{1/m_0}}; \quad (3.24)$$

kai $\bar{\sigma}_{in} > 1$

Buvo sudarytas BE modelis su koncentratoriumi, kurio teorinis įtempių koncentracijos koeficientas pagal [20] α_{σ} yra lygus 1,46. Esant tampriajam deformavimui koncentracijos zonose baigtinių elementų metodu apskaičiavus α_{σ} , gauta 1,48 reikšmė. Analitiškai ir BEM paskaičiuoti K_e ir K_{σ} pateikti 3.1-3.3 lentelėse ir 3.2, 3.3 paveiksluose. Didėjant nominalios apkrovos lygiui, BEM ir priklausomybes apskaičiuotų koncentracijos koeficientų skirtumas didėja. Ypač tai pažymėtina apie deformacijų koncentracijos koeficientus.

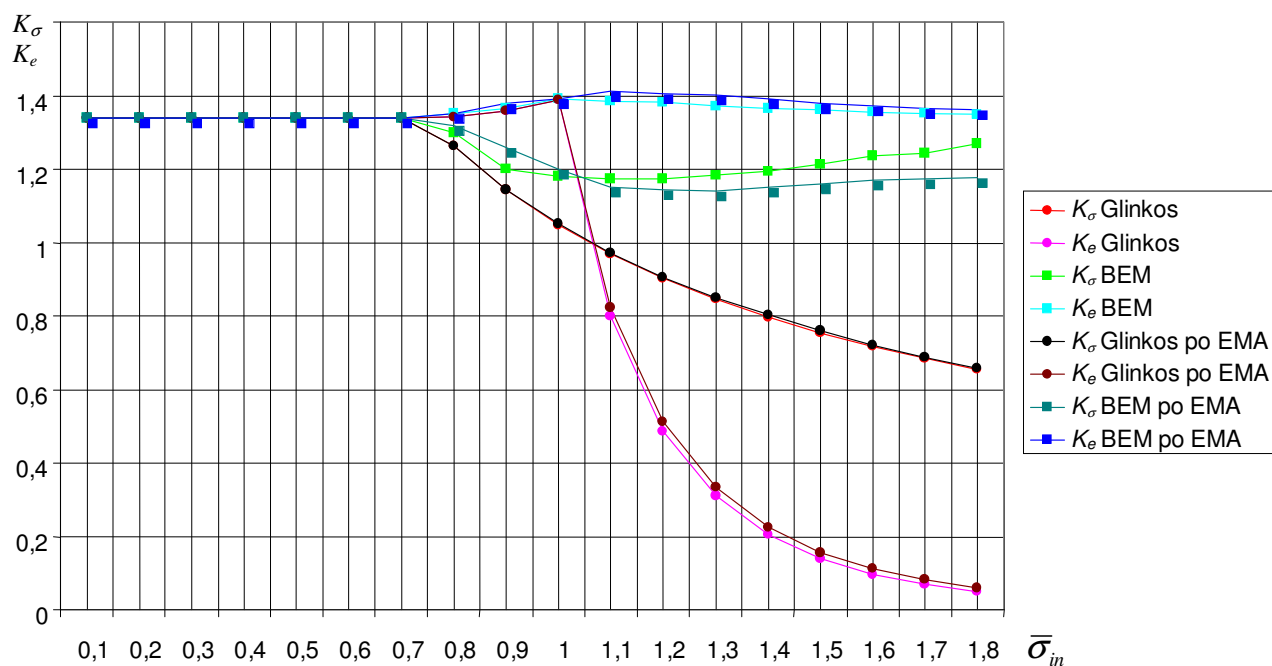
Koncentracijos koeficientai grynojo lenkimo metu pagal N. Machutovą

$\bar{\sigma}_{in}$	α_{σ}^{BEM}	Plienas 45		Plienas 45 (BEM)		Plienas 45 po EMA		Plienas 45 po EMA (BEM)	
		K_{σ}	K_e	K_{σ}	K_e	K_{σ}	K_e	K_{σ}	K_e
		$m_0 = 0,142$				$m_0 = 0,148$			
0,8	1,34	1,267	1,377	1,3	1,353	1,268	1,377	1,32	1,351
0,9		1,154	1,453	1,2	1,365	1,156	1,452	1,26	1,377
1,0		1,063	1,538	1,181	1,391	1,066	1,535	1,2	1,393
1,1		1,061	1,519	1,172	1,385	1,064	1,517	1,15	1,411
1,2		1,061	1,514	1,174	1,381	1,063	1,512	1,145	1,405
1,3		1,061	1,521	1,182	1,372	1,064	1,519	1,141	1,401
1,4		1,063	1,538	1,194	1,365	1,066	1,536	1,15	1,391
1,5		1,066	1,565	1,212	1,361	1,068	1,562	1,16	1,380
1,6		1,069	1,601	1,235	1,356	1,072	1,598	1,17	1,372
1,7		1,073	1,616	1,242	1,352	1,076	1,642	1,175	1,365
1,8		1,078	1,699	1,271	1,350	1,081	1,695	1,176	1,361

3.2 pav. Koncentracijos koeficientų priklausomybė nuo $\bar{\sigma}_{in}$, N. Machutovo ir BEM metodu

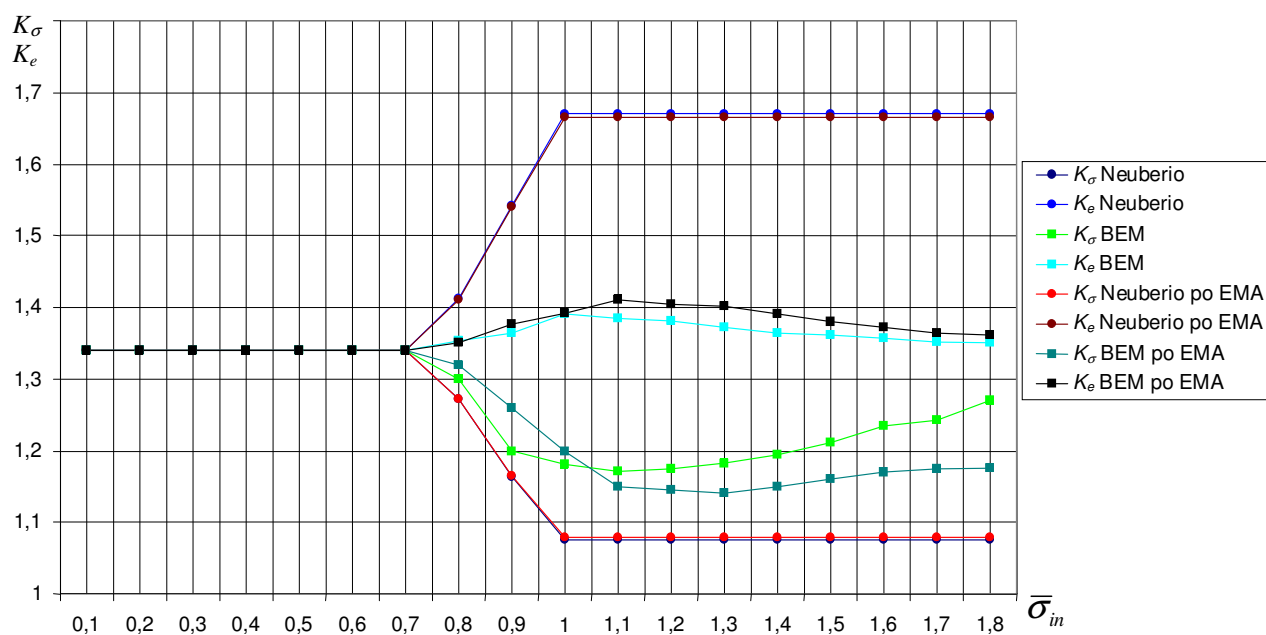
Koncentracijos koeficientai grynojo lenkimo metu pagal G. Glinką

$\bar{\sigma}_{in}$	α_{σ}^{BEM}	Plienas 45		Plienas 45 (BEM)		Plienas 45 po EMA		Plienas 45 po EMA (BEM)	
		K_{σ}	K_e	K_{σ}	K_e	K_{σ}	K_e	K_{σ}	K_e
		$m_0 = 0,142$				$m_0 = 0,148$			
0,8	1,34	1,263	1,343	1,3	1,353	1,263	1,343	1,32	1,351
0,9		1,143	1,360	1,2	1,365	1,145	1,360	1,26	1,377
1,0		1,048	1,388	1,181	1,391	1,050	1,388	1,2	1,393
1,1		0,969	0,801	1,172	1,385	0,971	0,822	1,15	1,411
1,2		0,903	0,487	1,174	1,381	0,906	0,513	1,145	1,405
1,3		0,846	0,310	1,182	1,372	0,850	0,333	1,141	1,401
1,4		0,798	0,204	1,194	1,365	0,802	0,224	1,15	1,391
1,5		0,755	0,139	1,212	1,361	0,759	0,156	1,16	1,380
1,6		0,718	0,097	1,235	1,356	0,722	0,111	1,17	1,372
1,7		0,684	0,069	1,242	1,352	0,689	0,081	1,175	1,365
1,8	0,654	0,051	1,271	1,350	0,659	0,06	1,176	1,361	

3.3 pav. Koncentracijos koeficientų priklausomybė nuo $\bar{\sigma}_{in}$, G. Glinkos ir BEM metodu

Koncentracijos koeficientai grynojo lenkimo metu pagal H. Neuberį

$\bar{\sigma}_{in}$	α_{σ}^{BEM}	Plienas 45		Plienas 45 (BEM)		Plienas 45 po EMA		Plienas 45 po EMA (BEM)	
		K_{σ}	K_e	K_{σ}	K_e	K_{σ}	K_e	K_{σ}	K_e
		$m_0 = 0,142$				$m_0 = 0,148$			
0,8	1,34	1,272	1,412	1,3	1,353	1,272	1,411	1,32	1,351
0,9		1,164	1,542	1,2	1,365	1,166	1,54	1,26	1,377
1,0		1,076	1,67	1,181	1,391	1,078	1,665	1,2	1,393
1,1		1,076	1,67	1,172	1,385	1,078	1,665	1,15	1,411
1,2		1,076	1,67	1,174	1,381	1,078	1,665	1,145	1,405
1,3		1,076	1,67	1,182	1,372	1,078	1,665	1,141	1,401
1,4		1,076	1,67	1,194	1,365	1,078	1,665	1,15	1,391
1,5		1,076	1,67	1,212	1,361	1,078	1,665	1,16	1,380
1,6		1,076	1,67	1,235	1,356	1,078	1,665	1,17	1,372
1,7		1,076	1,67	1,242	1,352	1,078	1,665	1,175	1,365
1,8		1,076	1,67	1,271	1,350	1,078	1,665	1,176	1,361

3.4 pav. Koncentracijos koeficientų priklausomybė nuo $\bar{\sigma}_{in}$, H. Neuberio ir BEM metodu

3.2 Atsparumas mažacikliam deformavimui koncentracijos zonos

Esant mažacikliam apkrovimui koncentracijos zonoje analogiškai (3.1) ir (3.2) lygybėms galima užrašyti:

$$\bar{S}_{ik} = \bar{S}_{ink} \cdot K_{Sk}; \quad (3.25)$$

$$\bar{\epsilon}_{ik} = \bar{\epsilon}_{ink} \cdot K_{\epsilon k}; \quad (3.26)$$

čia \bar{S}_{ik} ir $\bar{\epsilon}_{ik}$ – ciklinių įtempių ir deformacijų intensyvumai koncentracijos zonoje k apkrovimo pusciklyje; \bar{S}_{ink} ir $\bar{\epsilon}_{ink}$ – ciklinių nominaliųjų įtempių ir deformacijų intensyvumai k apkrovimo pusciklyje; K_{Sk} ir $K_{\epsilon k}$ – ciklinių įtempių ir deformacijų koncentracijos koeficientai k pusciklyje.

Iš čia:

$$\bar{S}_{ik} = \frac{S_{ik}}{S_T}; \quad \bar{\epsilon}_{ik} = \frac{\epsilon_{ik}}{\epsilon_T}; \quad \bar{S}_{ink} = \frac{S_{ink}}{S_T} \quad \text{ir} \quad \bar{\epsilon}_{ink} = \frac{\epsilon_{ink}}{\epsilon_T}. \quad (3.27)$$

Skaičiuojant K_{Sk} ir $K_{\epsilon k}$, lygybėse statiniai įtempiai $\bar{\sigma}$ pakeičiami į ciklinius \bar{S} , statinės deformacijos $\bar{\epsilon}$ į $\bar{\epsilon}$, sustiprėjimo koeficientai m_0 į m_k . K_{Sk} skirsis nuo $K_{\epsilon k}$, nes skirtingi bus laipsninės aproksimacijos koeficientai m_k . Šių dydžių analitiškai paskaičiuoti rezultatai pateikti 3.5-3.11 paveiksluose.

Laipsninės aproksimacijos laipsnio rodiklis nustatomas iš lygybės:

$$\bar{S}_{ik} = \bar{\epsilon}_{ik}^{m_k}; \quad (3.28)$$

$$m_k = \frac{\lg \bar{S}_{ik}}{\lg \bar{\epsilon}_{ik}}. \quad (3.29)$$

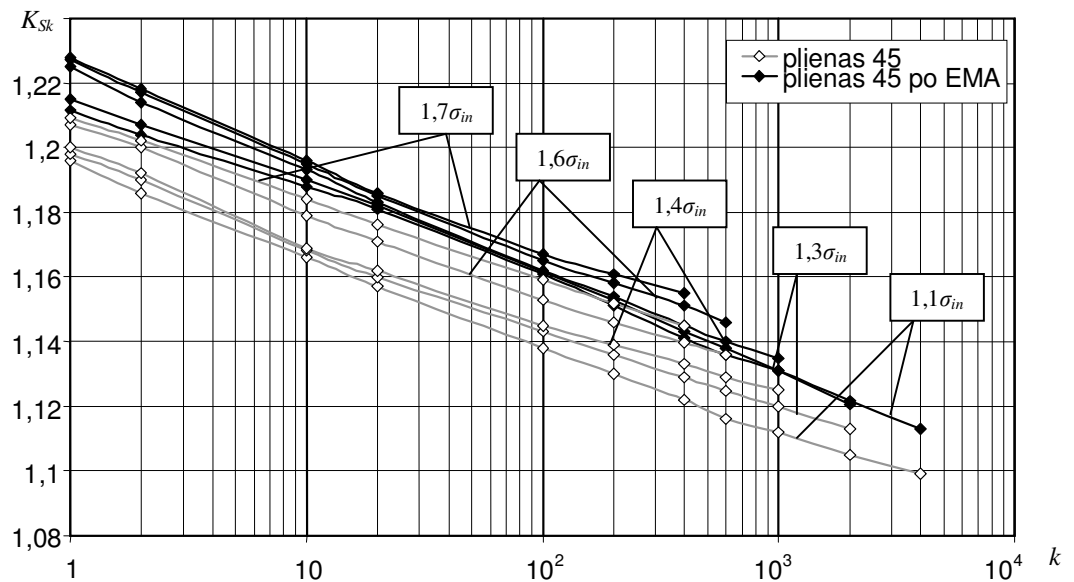
Esant minkštajam apkrovimui, $\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = \dots \bar{S}_k = const$. Šiuo atveju simetrinio ciklo diagramoms gauname:

$$m_k = \frac{\lg \bar{S}_{ik}}{\lg \left[\frac{A_{1,2}}{\bar{S}_T} \left(\bar{e}_0 - \frac{\bar{S}_T}{2} \right) F(k) + \bar{S}_{ik} \right]}; \quad (3.30)$$

čia $\bar{e}_0 = \bar{\sigma}_o^{1/m_0}$, $F(k)$ - pusciklių skaičiaus funkcija.

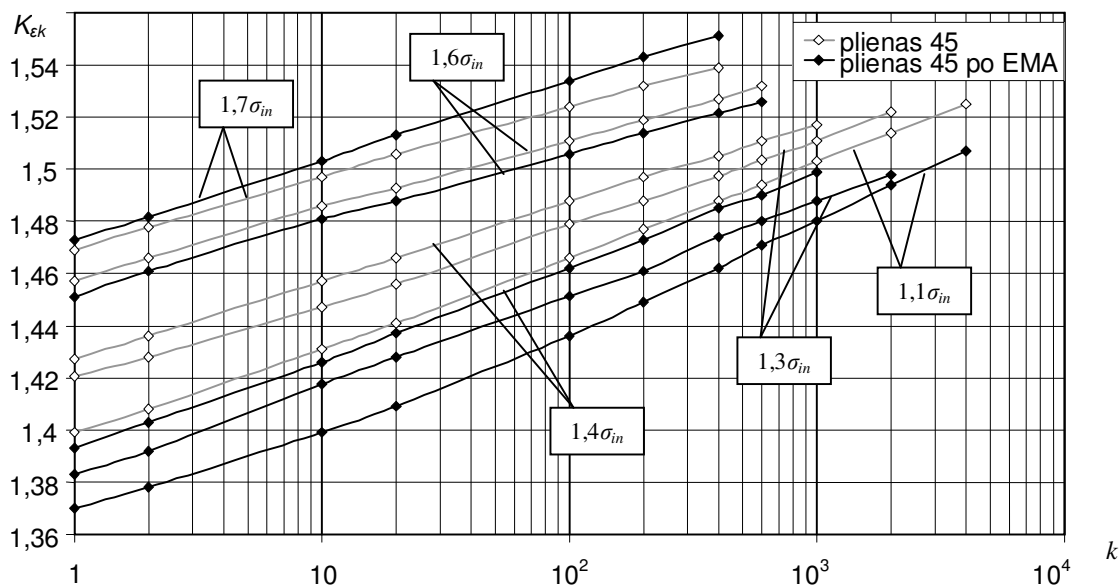
Naudojantis (3.18-3.24) lygybėmis apskaičiuojame K_{sk} ir K_{ek} , taip pat nustatome BEM teorinių įtempimų koeficientus esant tampriai deformacijai.

Nubraižytame 3.5 pav. parodyta kaip kinta ciklinių koncentracijos koeficiento K_{sk} reikšmė esant minkštam stacionariam apkrovimui, plieno 45 ir plieno 45 po EMA, kintant apkrovimų pusciklių skaičiui k , kai koncentracijos koeficientas $\alpha_\sigma = 1,34$, o apkrovos $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,7$ grynajam lenkimui. Iš grafiko galima matyti kad, K_{sk} didėjant pusciklių skaičiui yra tolygiai mažėjanti funkcija.



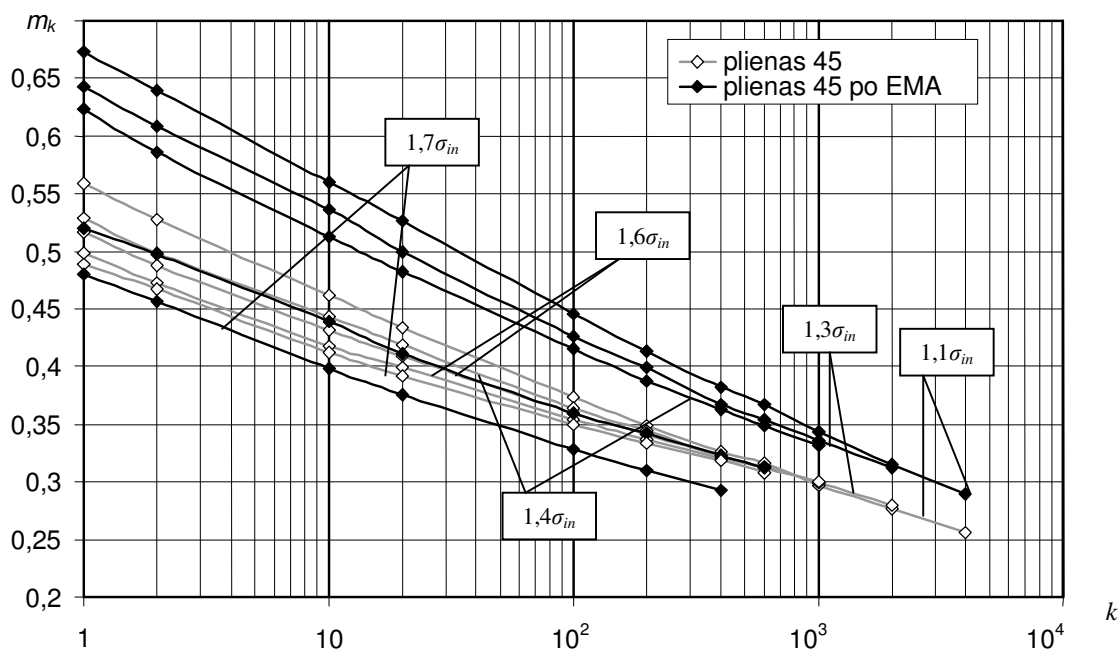
3.5 pav. Ciklinių įtempimų K_{sk} koncentracijos koeficientai

Ciklinių deformacijų koncentracijų koeficientui K_{ek} esant minkštam stacionariam apkrovimui, plienui 45 ir plienui 45 po EMA, atvirkščiai negu K_{sk} didėjant pusciklių skaičiui yra tolygiai didėjanti funkcija 3.6 pav. Koncentracijos koeficientas $\alpha_\sigma = 1,34$, o apkrovos $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,7$ grynajam lenkimui, kintant apkrovimų pusciklių skaičiui k .



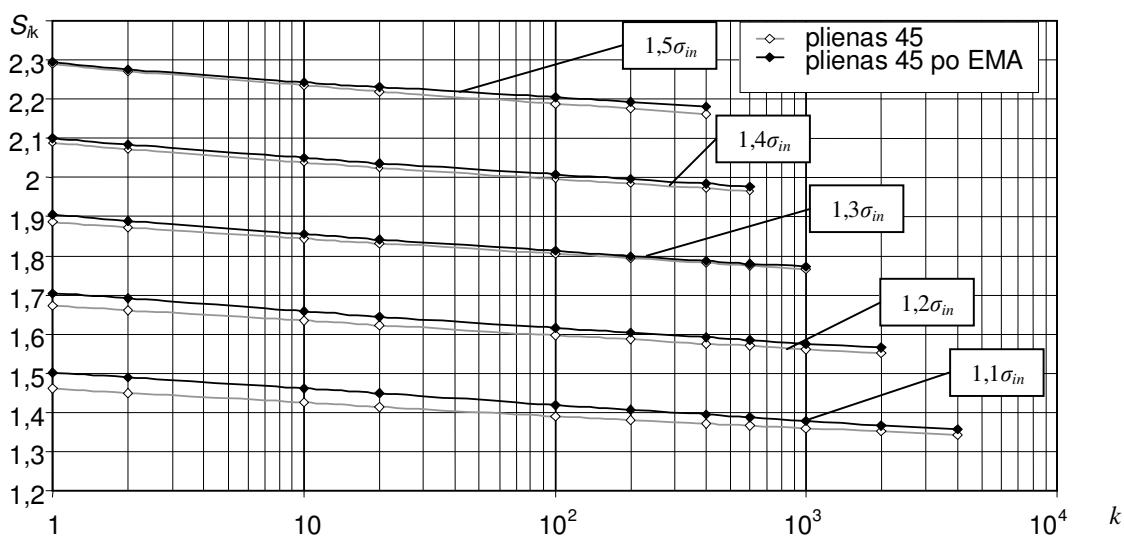
3.6 pav. Ciklinių deformacijų K_{ek} koncentracijos koeficientai

Ciklinio stiprėjimo koeficiento m_k kreivės parodytos 3.7 pav. Esant plienui plienui 45 ir plienui 45 po EMA, kintant apkrovimų pusciklių skaičiui k , kai koncentracijos koeficientas $\alpha_\sigma = 1,34$, o apkrovos $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,7$ grynajam lenkimui. m_k yra tolygiai mažėjanti funkcija, nes plienas silpnėja. Plienas 45 po EMA apkrovose 1,1; 1,3; 1,4; 1,6 yra tvirtesnis už pliną prieš EMA, bet 1,7 apkrovroje jau atvirkščiai, plienas po EMA tampa silpnesnis už pliną prieš EMA



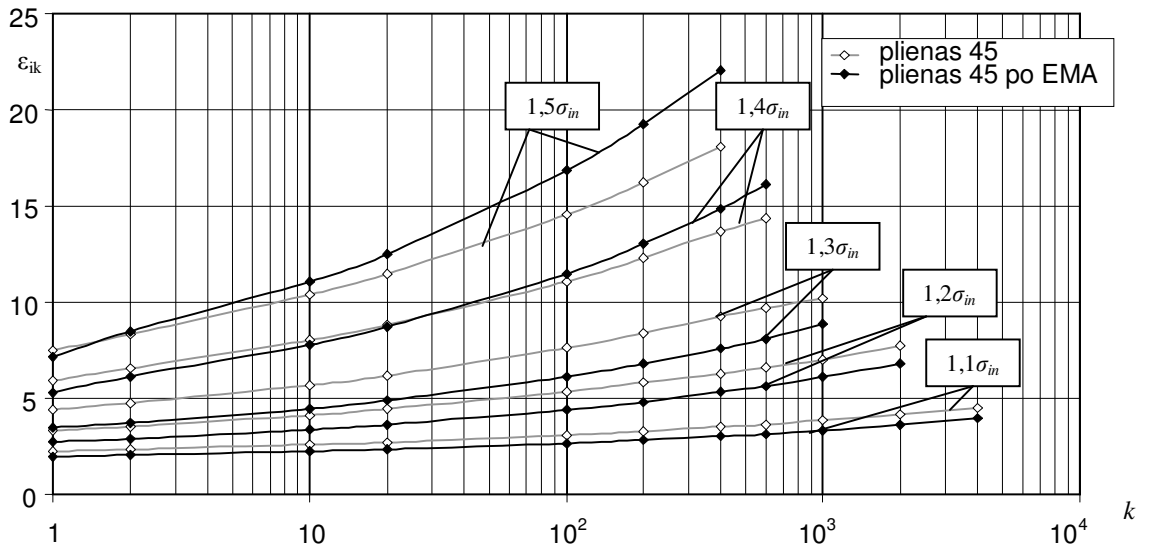
3.7 pav. Cikliniai stiprėjimo koeficientai m_k

Ciklinių koncentracijos koeficiento S_{ik} kreivės 3.8 pav. esant minkštam stacionariam apkrovimui, plieno 45 ir plieno 45 po EMA, kintant apkrovimų pusciklių skaičiui k , kai koncentracijos koeficientas $\alpha_\sigma = 1,34$, o apkrovos $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,7$ grynajam lenkimui. Iš grafiko galima matyti kad, K_{sk} didėjant pusciklių skaičiui yra tolygiai mažėjanti funkcija.



3.8 pav. Ciklinių įtempių intensyvumo S_{ik} priklausomybė nuo k

Ciklinių deformacijų ε_{ik} intensyvumo kreivės 3.9 pav. esant minkštam stacionariam apkrovimui, plieno 45 ir plieno 45 po EMA, kintant apkrovimų pusciklių skaičiui k , kai koncentracijos koeficientas $\alpha_\sigma = 1,34$, o apkrovos $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,7$ grynajam lenkimui. Iš grafiko galima matyti kad, ε_{ik} didėjant pusciklių skaičiui yra tolygiai didėjanti funkcija.

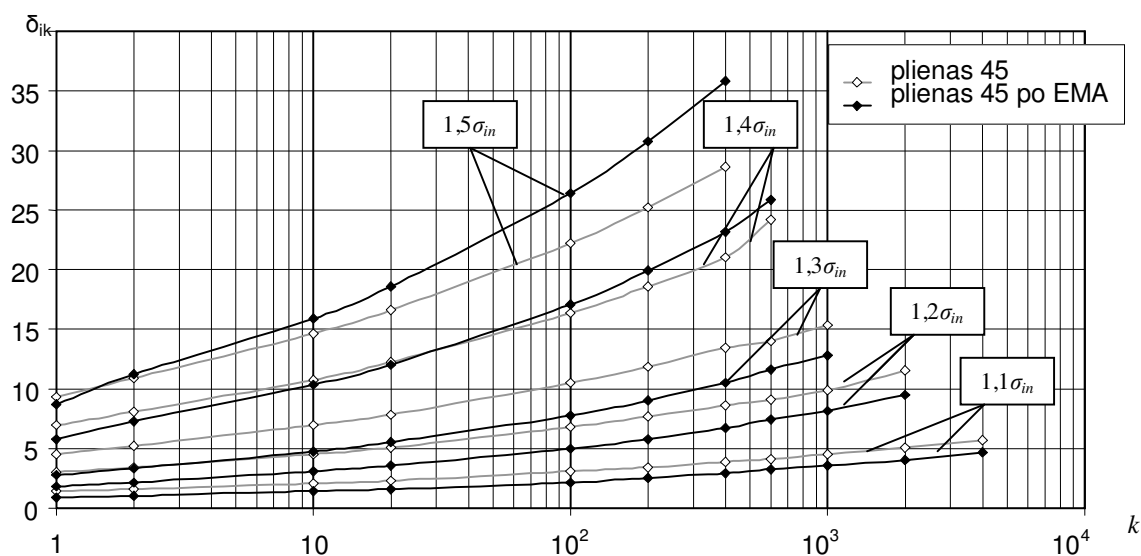


3.9 pav. Ciklinių deformacijų intensyvumai ε_{ik} koncentracijos zonoje

Ciklinį plastinių deformacijų intensyvumą (histerezės kilpos plotį) koncentracijos zonose nustatome iš lygybės:

$$\bar{\delta}_{ik} = (\bar{\varepsilon}_{ik} - \bar{S}_{ik}) \bar{S}_t; \quad (3.31)$$

Ciklinio plastinių deformacijų δ_{ik} intensyvumo kreivės 3.10 pav. esant minkštam stacionariam apkrovimui, plieno 45 ir plieno 45 po EMA, kintant apkrovimų pusciklių skaičiui k , kai koncentracijos koeficientas $\alpha_\sigma = 1,34$, o apkrovos $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,7$ grynajam lenkimui. Iš grafiko galima matyti kad, ε_{ik} didėjant pusciklių skaičiui yra tolygiai didėjanti funkcija.

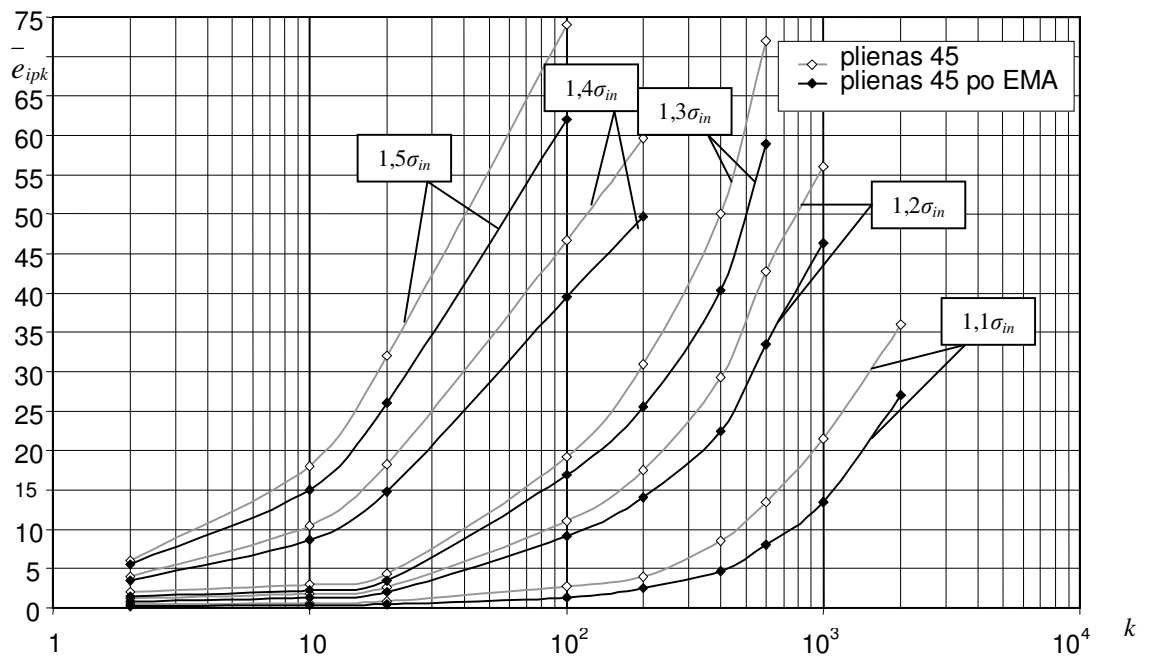


3.10 pav. Ciklinis plastinių deformacijų δ_{ik} intensyvumas koncentracijos zonose

Apskaičiavus δ_{ik} ir žinant K_{ck} ir K_{sk} pradiniam apkrovimo pusciklyje $\bar{\sigma}_i$ ir \bar{e}^i , galime nustatyti vienpusį sukauptos deformacijos intensyvumą \bar{e}_{ipk} koncentracijos zonoje priklausomai nuo $\bar{\sigma}_{in}$, α_σ ir k esant minkštam stacionariam nominaliajam apkrovimui. Cikliškai anizotropiniai plienai 45 ir plienas 45 po EMA, kaupiantys \bar{e}_{ipk} , esant tiesiam įtempių būviui, kaupia šią deformaciją ir koncentracijos zonose

$$\bar{e}_{ipk} = \bar{e}_0 - \bar{\sigma}_0 + \sum_1^k (-1)^k \bar{\delta}_{ik}; \quad (3.32)$$

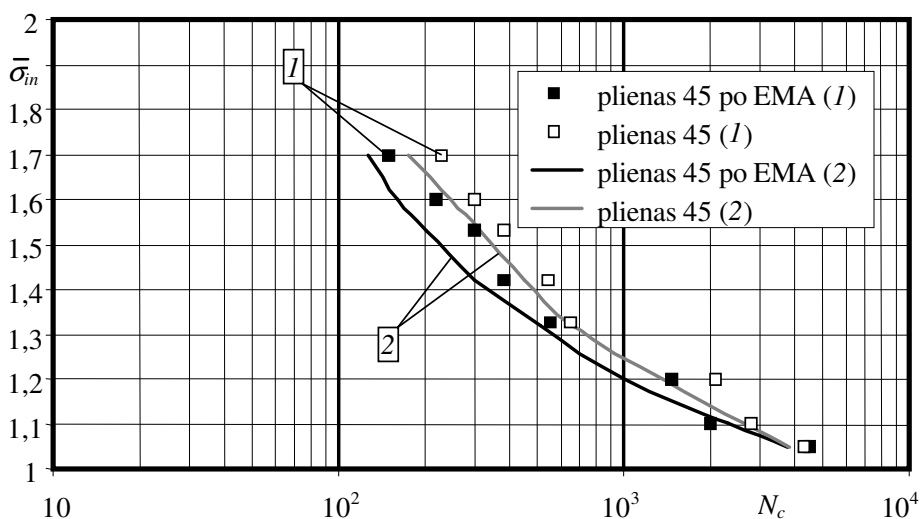
Vienpusės plastinės deformacijos \bar{e}_{ipk} intensyvumo kreivės 3.11 pav. esant minkštam stacionariam apkrovimui, plieno 45 ir plieno 45 po EMA, kintant apkrovimų pusciklių skaičiui k , kai koncentracijos koeficientas $\alpha_\sigma = 1,34$, o apkrovos $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,7$ grynajam lenkimui. Iš grafiko galima matyti kad, \bar{e}_{ipk} didėjant pusciklių skaičiui yra tolygiai didėjanti funkcija.



3.11 pav. Vienpusės plastinės deformacijos \bar{e}_{ipk} intensyvumo kaupimas koncentracijos zonoje

3.3 Atsparumas suirimui koncentracijos zonose esant minkštajam mažacikliam apkrovimui

Eksperimentiniams tyrimams pasirinktai medžiagai plienui 45 yra būdingi trys suirimo tipai: kvazistatinis, trapus ir nuovargio. Pagal eksperimentinius rezultatus buvo sudarytos nuovargio kreivės, pavaizduotos 3.11 paveiksle. Dėl sumažėjusios sukauptos vienpusės plastinės deformacijos ir pažeidimų kaupimo sukietintame sluoksnyje žemų amplitudinių įtempių srityje sukietinto plieno pasipriešinimas suirimui yra didesnis nei nekietinto plieno. Todėl, mažėjant apkrovimo įtempiams, elektromechaniškai sukietinto plieno 45 ilgaamžiškumas didėja, lyginant su nesukietinto plieno ilgaamžiškumu. Šis nuovargio ilgaamžiškumo virsmas įvyksta esant $3,1 \max \approx \sigma$ įtempiams [21].



3.12 pav. Nesukietintų ir sukietintų bandinių su koncentratoriumi apkrautų grynuoju lenkimu eksperimento rezultatai (1) ir analitinės (2) nuovargio kreivės

3.4 Pažeidimų skaičiavimas koncentracijos zonose

Atlikus įtempių ir deformacijų būvio koncentracijos zonose analizę, galima padaryti išvadą, kad, esant stacionariajam nominaliajam apkrovimui, koncentracijos zonose nestacionariai keičiasi įtempių ir deformacijų bei asimetrijos koeficientai. Be to, koncentracijos zonose esant tampriai plastiniam apkrovimui susidaro didelės plastinės deformacijos.

Įtempių ir deformacijų būvio analizė parodė, kad koncentracijos zonose priklausomai nuo $\alpha_\sigma, \bar{\sigma}_{in}, \bar{e}_{in}$ bei medžiagų statinių ir ciklinių charakteristikų gali būti kaupiami ne tiktai nuovargio d_N , bet ir kvazistatiniai d_K pažeidimai. Todėl nuo ciklinių plastinių deformacijų intensyvumo $\bar{\delta}_{ik}$ sukeltus pažeidimus tiksliausiai bus galima įvertinti lygybe:

$$d_N = \sum_1^{k_c} \frac{\bar{\delta}_k \bar{e}_k^{m_3}}{C_2 C_3^{m_3}} \quad (3.33)$$

o pažeidimai sukelti vienpusės sukauptos deformacijos intensyvumo:

$$d_K = \sum_1^{k_c} \frac{\bar{e}_{ipk}}{\bar{e}_{u_2}}, \quad (3.34)$$

Taigi, pasinaudoję (3.31-3.34) lygybėmis, gausime:

$$d_N = \frac{\sum_1^{k_c} \bar{\delta}_{ik} \left(\frac{\bar{\delta}_{ik}}{D_e} + \bar{S}_{ik} s_T \right)^{m_3}}{C_2 C_3^{m_3}} \quad (3.35)$$

ir

$$d_K = \frac{\bar{e}_i - \bar{\sigma}_i + \sum_1^{k_c} (-1)^k \bar{\delta}_k}{\bar{e}_u D_e} \quad (3.36)$$

čia $\bar{e}_i, \bar{\sigma}_i, \bar{S}_{ik}, \bar{\delta}_{ik}$, - parametrai, apskaičiuojami pagal anksčiau gautas lygybes; C_2, C_3 ir m_3 - L. Kofino tipo lygybių parametrai esant tiesiniam įtempių būviui; e_u - tolydinė deformacija tempimo metu, t.y. deformacija iki bandinio kakliuko susidarymo pradžios; D_e - parametras, įvertinantis įtempių būvio įtaką ribiniam plastiškumui:

$$D_e = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)} \leq 1, \quad (3.37)$$

čia $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ svarbiausieji įtempiai.

3.17 pav. parodytas ryšys tarp kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų, iš kurio matyti, kad lygybės laipsnio rodikliai yra lygūs, t. y. $q = l$. Suirimo (nuovargio plyšio susidarymo) sąlyga, laikant, kad $q = l$ koncentracijos zonoje, galima išreikšti lygybe, gerai tenkinančia eksperimentų duomenis esant linijiniam įtempių būviui

$$d_N^q + d_K^q = 1 \quad (3.38)$$

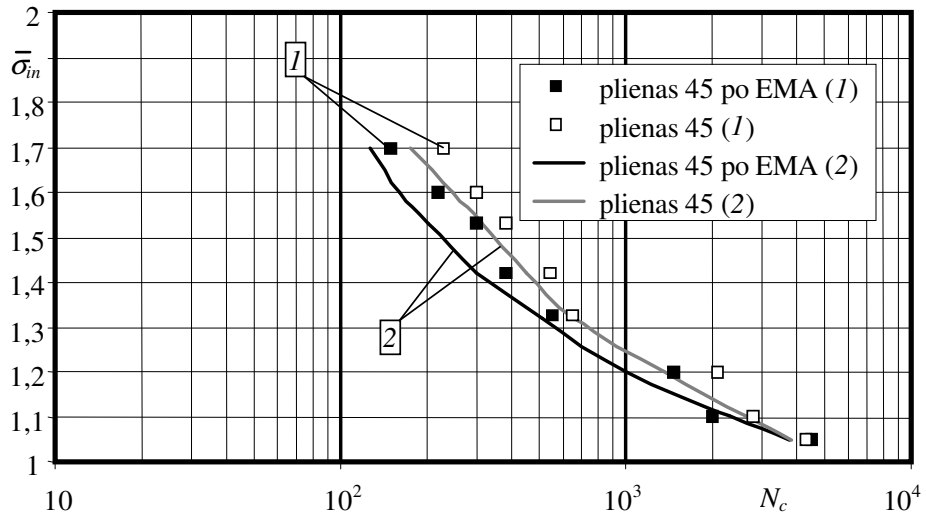
čia nuovargio d_N ir kvazistatiniai d_K pažeidimai nustatomi iš (3.35) ir (3.36) lygybių.

Dažnai skaičiavimui supaprastinti yra priimama, kad $q = l = 1$. Tačiau atlikus analitinius paskaičiavimus buvo nustatyta, kad $q = l = 0,8$. Tada ryšį tarp kvazistatinių ir nuovarginių pažeidimų galima užrašyti taip: $d_N^{0,8} + d_K^{0,8} = 1$.

Pasinaudojus tiesiniu lyginamųjų ilgaamžiškumų sumavimu koncentracijos zonoje, galima užrašyti [19]:

$$d_N = \frac{\sum_1^{k_c} \left(\frac{\bar{\delta}_{ik}}{D_e} \right)^{1/m_2}}{C_2^{1/m_2}} \quad (3.39)$$

Pagal 3.38 formulę paskaičiuotos pieno 45 ir pieno 45 po EMA mažaciklio simetrinio apkrovimo nuovargio analitinės kreivės koncentracijos zonoje, esant minkštam apkrovimui, kai $q = l = 0,8$ parodytas 3.13 paveiksliuke.



3.13 pav. Nesukietintų ir sukietintų bandinių su koncentratoriumi apkrautų grynuoju lenkimu eksperimento rezultatai (1) ir analitinės (2) nuovargio kreivės

Iš 4.19 pav. matyti, kad, pagal mūsų pasiūlytą kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų sumavimo metodą apskaičiuotas ilgaamžiškumas lenkimo atveju yra artimas eksperimentiniam.

IŠVADOS

1. Skaičiuojant įtempių ir deformacijų koncentraciją, teorinis įtempių koncentracijos koeficientas, esant tampriam deformavimui, α_σ nustatytas naudojant BEM, o įtempių ir deformacijų koncentracijos koeficientai, esant cikliniam tampriai-plastiniam deformavimui, K_{Sk} ir K_{ek} - naudojant N. Machutovo, H. Neuberio ir G. Glinkos pasiūlytas lygybes.
2. Paskaičiuoti įtempių ir deformacijos koncentracijos koeficientai pagal N. Machutovą, H. Neuberį ir G. Glinką skiriasi nuo gautų BEM: pagal N. Machutovą iki 19,5%, pagal H. Neuberį – iki 23,7% ir pagal G. Glinką – iki 2150%. Taigi N. Machutovo pasiūlytų formulių apskaičiuoti koncentracijos koeficientai labiau atitinka BEM gautas reikšmes, tačiau yra sudėtingesnis skaičiavimas palyginus su kitais būdais.
3. Atliktas analitinis ilgaamžiškumo įvertinimas įtempių koncentracijos zonose naudojant kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų sumavimą, gerai sutampa su eksperimentiniais duomenimis tiek sukietintiems, tiek nesukietintiems bandiniams esant grynajam lenkimui.
4. Esant sukietinto sluoksnio tampriai plastiniam deformavimui jame atsiranda mikroįtrūkimai, dėl jų poveikio gali sumažėti šių detalių ilgaamžiškumas, t.y. atsirasti mažaciklis nuovargis.

LITERATŪRA

1. BAGMUTOV V., ZAKHAROV I. *Electromechanical treatment as effective technology of production of materials with predesigned properties*. Tarpt. Konf. „Mechanika 2002“ pranešimų medžiaga, Kaunas: Technologija, 2002, p. 30-37
2. MARKAUSKAS S., VALECKAS E. *Mastelinio faktoriaus įtaka detlių elektromechaninio sukietinimo procese*. Tarpt. konf. „Mechanika 2000“ pranešimų medžiaga, Kaunas: Technologija, 2000, p. 430-434.
3. DAUNYS M., STAPONKUS V., MARKAUSKAS S. *Influence of electromechanical treatment regimes on strength and durability of elements*. III Sympozjum Mechaniki niszczenia Materialov I Konstrukcji, Augustov, Politechnika Bialostocka. 2005, p. 393-396.
4. JUTAS A., DAUNYS M. *Elektromechaninio paviršinio sukietinimo įtaka plieno 45 mažacikliam patvarumui*. Tarpt. Konf. „Mechanika 2000“ pranešimų medžiaga, Kaunas: Technologija, 2000, p. 438-439.
5. LANDGRAF R.W., LAPOINTE N.R. *Cyclic stress-strain concepts applied to component fatigue life prediction*. SAE paper No 740280, SAE, Automotive engineering congress. 1974.
6. COFFIN, L. F. Study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile material. *Trans. ASME*. (1953) 53 A76: 931-950
7. МАХУТОВ Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкции на прочность. – Москва: Машино-строение, 1981. – 272 с.
8. CHAKRABORTI P.C., MITRA M.K.. Room temperature low cycle fatigue behavior of two high strength lamellar duplex ferrite-martensite (DFM) steels. *International journal of fatigue*. Volume 27, 2005 pp 511-518.
9. HIGUCHI M., HAYASHI M., YAMAUCHI T., LIDA K., SATO M. Fatigue strength of socket welded pipe joint. *Pressure vessels and piping codes and standards*. Vol. 1, ASMP PVP. 1995, 313, pp. 69-76.
10. DAUNYS M., NORKUVIENĖ D. Investigation of stress and strain state in concentration zones under low cycle loading. – *Mechanika*, 2007, Nr. 1.
11. NARVYDAS E. Evaluation of plastic strains in stress concentration zones under low cycle loading conditions. – *Mechanika*, 1999, Nr. 1, 10-14 p.
12. DAUNYS M., NARVYDAS E. Įtempimų ir deformacijų koncentracijos koeficientas, esant statiniam tampriai plastiniam deformavimui. – *Mechaninė technologija*. Kaunas: Technologija, 1994, v.XXII, p. 23-38.

13. MOAVENI S. Finite element analysis: theory and application with ANSYS. – *Pearson education inc.*, New Jersey, 2003, p. 822.
14. RIMOVSKIS S., DAUNYS M. Analysis of low cycle strength and durability of steel 45 at pure bending. *Mechanika*, Kaunas, Technologija, No.1 (39), 2003, 5-10 psl.
15. CARPINTERI A., BRIGHENTI R., VANTADORI. Surface cracks in notched round bars under cyclic tension and bending. Experimental investigations on notched specimens. *International journal of fatigue*, volume 28, 2006, p. 251-260.
16. NEUBER H. Theory of Stress Concentration for Shear Strains of Prismatical Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress–Strain Law. – *Transactions of the ASME*, 1961, E, v.28, Nr4, p. 544 – 550.
17. STOWELL I.G. The Circulation of the Fatigue Life in the Presence of Stress Concentrations. – *Nuclear Engineering and Design*, 1968, Nr3, p. 313–316.
18. MOLSKY H., GLINKA G. A. Method of Stress and Strain Calculations at a Notch Root. – *Materials Science and Engineering*, 1981, Nr 50.
19. DAUNYS M. *Ciklinis konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas*, Kaunas: Technologija, 2005, p. 288.
20. ПЕТЕРСОН Р. *Коэффициенты концентрации напряжений*. Москва: Мирб 1977, p. 302
21. SABALIAUSKAS A. Paviršiaus elektromechaninio apdirbimo poveikis plieno 45 konstrukcinių elementų mažacikliam patvarumui įtempių koncentracijos zonose: daktaro disertacija. Kaunas, 2007.
22. BRAŽĖNAS A. *Mechaniškai nevienalyčių suvirintų sujungimų stiprumas ir ilgaamžiškumas: Habilitacinis darbas*. Kaunas, 1994. p. 120-134.
23. ŽILIUKA A. *Deformuojamų kūnų mechanika. Tamprumo ir plastiškumo teorija. Irimo mechanika*. Kaunas 1994. p.109-115.
24. [žiūrėta 2010 m. vasario 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.mechanikas.mf.ktu.lt/T450M926/mechanika.pdf>
25. N. G. DUDKINA, I. N. ZAKHAROV *Micrononhomogeneous strain of the “white layer” produced by electromechanical treatment of a carbon steels*. 2007. Nr.3(65) p. 17-21 [žiūrėta 2010 m. sausio 7 d.]. Prieiga per internetą: http://www.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/mechanika/mechtu_65/Dudkina365.pdf
26. JUTAS A. ŽILIUKAS A. GRIŠKEVIČIUS P. *Elektromechaniškai apdirbto plieno 45 struktūrinė ir mechaninė analizė: tamprusis ir plastinis būvis*. [žiūrėta 209 m. sausio 7 d.]

Prieiga per internetą: <http://internet.ktu.lt/lt/scriptas2.asp?pirmas=/lt/mokslas/zurnalai/medz/menu.html&antras=/lt/mokslas/zurnalai/medz/medz0-71.html>

27. STUPAK Eugenius *Dvimačių struktūrų irimo naudojant prisitaikančiuosius baigtinių elementų tinklus*. Vilnius, 2004. 14 p. [žiūrėta 209 m. sausio 10 d.] Prieiga per internetą: http://vddb.library.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2004~D_20041111_08574471834/DS.005.0.09.

ETD

28. CHARČENKO, Aleksej; SABALIAUSKAS, Artūras; RIMOVSKIS Sergėjus Plieno 45 paviršiaus elektromechaninio sukietinimo įtaka mažaciklam tempimui-gniuždymui esant įtempimų koncentratoriui

PRIEDAI

1 PRIEDAS. Lenkiamo plieninio strypo su koncentratoriumi įtempių ir deformacijų skaičiavimas.

/nopr
FINISH
/CLEAR,NOSTART
/TITLE, Lenkiamas strypas su koncentratoriumi
/PREP7

! PRADINIAI DUOMENYS

l1 = 0.055 ! storo laipto ilgis, m
lm = 0.6*l1 ! momento prideties taskas, m
l2 = 0.05 ! plono laipto ilgis, m
d2 = 0.01 ! plono laipto skersmuo, m
d1 = 0.016 ! storo laipto skersmuo, m
r = 0.003 ! koncentratoriaus spindulys, m

! Apkrova

M = 7.46 ! 0.2 plieno 45 proporcingumo ribos, Nm
!M = 11.19 ! 0.3
!M = 14.91 ! 0.4
!M = 18.64 ! 0.5
!M = 22.37 ! 0.6
!M = 26.10 ! 0.7
!M = 29.83 ! 0.8
!M = 33.56 ! 0.9
!M = 37.29 ! 1
!M = 39.15 ! 1.05
!M = 41.02 ! 1.1
!M = 44.74 ! 1.2
!M = 48.47 ! 1.3
!M = 52.20 ! 1.4
!M = 55.93 ! 1.5
!M = 59.66 ! 1.6
!M = 63.39 ! 1.7
!M = 66.37 ! 1.78
!M = 67.12 ! 1.8
h = 0.00005 ! balto sluoksnio storis, m

! Papildomi duomenys

F = M/lm ! lenkimo jega
r1 = d1/2 ! storo laipto spindulys
r2 = d2/2 ! plono laipto spindulys
l = 2*l1+l2

! Medžiagos aprasymas


```

MP,Ex,1,2.0e11
MP,Ex,1,2.0e11
MP,NUxy,1,0.25
TB,KINH,1,1,10
TBPT,,0.0019, 3.8e+08      !proporcingumo riba
TBPT,,0.00365, 5.00e+08
TBPT,,0.00407, 5.30e+08
TBPT,,0.0048, 5.70e+08
TBPT,,0.01, 6.92e+08
TBPT,,0.02, 7.6e+08
TBPT,,0.05, 7.81e+08
TBPT,,0.2, 7.83e+08
TBPT,,0.25, 7.855e+08
TBPT,,0.29, 7.865e+08     !stiprumo riba
TBPLOT,KINH,1             !braizau serdies tempimo diagrama
!/WAIT,1

```

```

! SUKURIU ELEMENTO TIPA
ET,1,SOLID95

```

```

! APRASAU TASKUS:

```

```

k, 1,0,0
k, 2,lm,0
k, 3,l-lm,0
k, 4,l,0
k, 5,l,r1
k, 6,l-lm,r1
k, 7,l1+l2,r1
k, 8,l1+l2-r,r2
k, 9,l1+l2-r,r1
k,10,l1+r,r2
k,11,l1,r1
k,12,l1+r,r1
k,13,lm,r1
k,14,0,r1

```

```

! BRAIZAU LINIJAS

```

```

l,1,2          ! 1 linija
l,2,3          ! 2
l,3,4          ! 3
l,4,5          ! 4
l,5,6          ! 5
l,6,7          ! 6
larc,7,8,9,r   ! 7
l,8,10         ! 8
larc,10,11,12,r ! 9
l,11,13        ! 10

```

1,13,14 ! 11
1,14,1 ! 12
1,2,13 ! 13
1,3,6 ! 14

! PLOTAI

al,1,11,12,13 ! 1 plotas
al,2,14,6,7,8,9,10,13 ! 2 plotas
al,3,4,5,14 ! 3 plotas
APLOT

! Sukuriu turius

VROTAT,1,2,3,,,,1,4,360

/VIEW,1,1,1,1

! PASALINU PASIKARTOJANCIUS TASKUS, LINIJAS IR PLOTUS.
! TASKUS, LINIJAS IR PLOTUS SUNUMERUOJU IS EILES

NUMMRG,ALL,1e-5,,,HIGH
NUMCMP,KP
NUMCMP,LINE
NUMCMP,AREA

! GENERUOJU TINKLELI

MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0

! TURIAMS PRISKIRIU MEDZIAGAS

MAT,1 ! serdies tinklelis
ESIZE,20*h
VSEL,S,,,2,11,3 ! isrenkami turiai nuo 2 iki 11 kas 3, t.y. 2,5,8,11
VMESH,all
ESIZE,80*h
VSEL,S,,,1,10,3 ! isrenkami turiai nuo 1 iki 10 kas 3, t.y. 1,4,7,10
VSEL,A,,,3,12,3 ! isrenkami turiai nuo 3 iki 12 kas 3, t.y. 3,6,9,12
VMESH,all

! ITVIRTINIMAI

DA,15,UX,0
DA,29,UX,0
DA,43,UX,0
DA,55,UX,0
DA,6,UX,0
DA,20,UX,0

DA,34,UX,0
DA,48,UX,0

DK,24,,,,0,UY
DK,30,,,,0,UY

! APKROVOS (lenkimo jega)
FK,6,FY,-F
FK,13,FY,-F

! UZDAVINIO SPRENDIMAS
/SOLU
NSUB,1
SOLVE

! REZULTATU ISVEDIMAS
/POST1

!PLNSOL,S,X,0,1 ! Sx itempimai
!PLNSOL,S,Y,0,1 ! Sy itempimai
!PLNSOL,S,XY,0,1 ! Sxy itempimai
PLNSOL,S,EQV,0,1 ! Si itempimai

!PLNSOL,EPTO,X,0,1 ! ex deformacijos
!PLNSOL,EPTO,Y,0,1 ! ey deformacijos
!PLNSOL,EPTO,XY,0,1 ! exy deformacijos
!PLNSOL,EPTO,EQV,0,1 ! ei deformacijos

IV. Lenkiamo plieninio sukietintu paviršiumi strypo su koncentratoriumi įtempių ir deformacijų skaičiavimas.

/nopr
FINISH
/CLEAR,NOSTART
/TITLE, Lenkiamas sukietintas laiptuotas strypas
/PREP7

! PRADINIAI DUOMENYS

l1 = 0.055 ! storo laipto ilgis, m
lm = 0.6*l1 ! momento prideties taskas, m
l2 = 0.05 ! plono laipto ilgis, m
d2 = 0.01 ! plono laipto skersmuo, m
d1 = 0.016 ! storo laipto skersmuo, m
r = 0.003 ! koncentratoriaus spindulys, m

! APKROVA

!M = 7.46 ! 0.2 plieno 45 proporcingumo ribos, Nm
 !M = 11.19 ! 0.3
 !M = 14.91 ! 0.4
 !M = 18.64 ! 0.5
 !M = 22.37 ! 0.6
 !M = 26.10 ! 0.7
 !M = 29.83 ! 0.8
 !M = 33.56 ! 0.9
 !M = 37.29 ! 1
 !M = 39.15 ! 1.05
 !M = 41.02 ! 1.1
 M = 44.74 ! 1.2
 !M = 48.47 ! 1.3
 !M = 52.20 ! 1.4
 !M = 55.93 ! 1.5
 !M = 59.66 ! 1.6
 !M = 63.39 ! 1.7
 !M = 66.37 ! 1.78
 !M = 67.12 ! 1.8
 h = 0.00005 ! Balto sluoksnio storis, m

! Papildomi duomenys

F = M/lm ! lenkimo jega
 r1 = d1/2
 r2 = d2/2
 l = 2*l1+l2

! Medz. aprasymas

! Pirma medziaga (plienas)

MP,Ex,1,2.0e11
 MP,NUxy,1,0.25
 TB,KINH,1,1,10
 TBPT,,0.0019, 3.8e+08 !proporcingumo riba
 TBPT,,0.00365, 5.00e+08
 TBPT,,0.00407, 5.30e+08
 TBPT,,0.0048, 5.70e+08
 TBPT,,0.01, 6.92e+08
 TBPT,,0.02, 7.6e+08
 TBPT,,0.05, 7.81e+08
 TBPT,,0.2, 7.83e+08
 TBPT,,0.25, 7.855e+08
 TBPT,,0.29, 7.865e+08 !stiprumo riba
 TBPLOT,KINH,1 !braizau serdies tempimo diagrama
 !/WAIT,1

! Antra medziaga (isorinis baltasis sluoksnis)

```

MP,Ex,2,2e11
MP,NUxy,2,0.28
TB,KINH,2,1,10
TBPT,,0.003545, 7.09e+08      !proporcingumo riba
TBPT,,0.004, 7.9e+08
TBPT,,0.005, 9.72e+08
TBPT,,0.009, 17.3e+08
TBPT,,0.01, 18.2e+08
TBPT,,0.012, 18.7e+08
TBPT,,0.02, 19.48e+08
TBPT,,0.03, 20.05e+08
TBPT,,0.04, 20.23e+08
TBPT,,0.044, 20.33e+08      !stiprumo riba
TBPLOT,KINH,2      !braizau isorinio sluoksnio tempimo diagrama
!/WAIT,1

```

```

! SUKURIU ELEMENTO TIPA
ET,1,SOLID95

```

```

! APRASAU TASKUS:

```

```

k, 1,0,0
k, 2,lm,0
k, 3,l-lm,0
k, 4,l,0
k, 5,l,r1
k, 6,l-lm,r1
k, 7,l1+l2,r1
k, 8,l1+l2-r,r2
k, 9,l1+l2-r,r1
k,10,l1+r,r2
k,11,l1,r1
k,12,l1+r,r1
k,13,lm,r1
k,14,0,r1
k,15,l1+l2+h,r1
k,16,l1+l2-r,r2-h
k,17,l1+r,r2-h
k,18,l1-h,r1

```

```

! BRAIZAU LINIJAS

```

```

1,1,2      ! 1 linija
1,2,3      ! 2
1,3,4      ! 3
1,4,5      ! 4
1,5,6      ! 5
1,6,15     ! 6
1,15,7     ! 7

```

larc,7,8,9,r	! 8
1,8,10	! 9
larc,10,11,12,r	! 10
1,11,18	! 11
1,18,13	! 12
1,13,14	! 13
1,14,1	! 14
larc,15,16,9,r+h	! 15
1,16,17	! 16
larc,17,18,12,r+h	! 17
1,2,13	! 18
1,3,6	! 19

! PLOTAI

al,1,18,13,14	! 1 plotas
al,2,19,6,15,16,17,12,18	! 2 plotas
al,3,4,5,19	
al,7,8,9,10,11,15,16,17	

APLOT

! Sukuriu turius

VROTAT,1,2,3,4,,,1,4,360
/VIEW,1,1,1,1

! PASALINU PASIKARTOJANCIUS TASKUS, LINIJAS IR PLOTUS.
! TASKUS, LINIJAS IR PLOTUS SUNUMERUOJU IS EILES

NUMMRG,ALL,1e-5,,,HIGH
NUMCMP,KP
NUMCMP,LINE
NUMCMP,AREA

! GENERUOJU TINKLELI

MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0

! TURIAMS PRISKIRIU MEDZIAGAS

MAT,2	! sluoksnio tinklelis
ESIZE,20*h	
VSEL,s,,4,16,4	! isrenkami turiai nuo 4 iki 16 kas 4, t.y. 4,8,12,16
VSWEEP,all	

MAT,1	! serdies tinklelis
ESIZE,80*h	
VSEL,S,,,2,14,4	! isrenkami turiai nuo 2 iki 14 kas 4, t.y. 2,6,10,14

```
VMESH,all
ESIZE,80*h
VSEL,S,,1,13,4      ! isrenkami turiai nuo 1 iki 13 kas 4, t.y. 1,5,9,13
VSEL,A,,3,15,4      ! isrenkami turiai nuo 3 iki 15 kas 4, t.y. 3,7,11,15
VMESH,all
```

```
! ITVIRTINIMAI
```

```
DA, 16,UX,0
DA, 36,UX,0
DA,56,UX,0
DA,74,UX,0
DA, 7,UX,0
DA, 27,UX,0
DA,47,UX,0
DA,67,UX,0
```

```
DK,32,,0,UY
DK,38,,0,UY
```

```
! APKROVOS
```

```
FK,6,FY,-F
FK,13,FY,-F
```

```
! UZDAVINIO SPRENDIMAS
```

```
/SOLU
NSUB,1
SOLVE
! REZULTATU ISVEDIMAS
/POST1
```

```
!PLNSOL,S,X,0,1      ! Sx itempimai
!PLNSOL,S,Y,0,1      ! Sy itempimai
!PLNSOL,S,XY,0,1     ! Sxy itempimai
PLNSOL,S,EQV,0,1     ! Si itempimai
```

```
!PLNSOL,EPTO,X,0,1   ! ex deformacijos
!PLNSOL,EPTO,Y,0,1   ! ey deformacijos
!PLNSOL,EPTO,XY,0,1  ! exy deformacijos
!PLNSOL,EPTO,EQV,0,1 ! ei deformacijos
```