

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Aleksej Charčenko

ELEKTROMECHANINIO APDIRBIMO ĮTAKA
ILGAAMŽIŠKUMUI, ESANT ĮTAMPIŲ
KONCENTRACIJAI

Magistro darbas

Vadovas

doc. dr. A. Sabaliauskas

ŠIAULIAI, 2009 m.

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Tvirtinu

Katedros vedėjas

doc. dr. A. Sabaliauskas

2009 06

ELEKTROMECHANINIO APDIRBIMO ĮTAKA
ILGAAMŽIŠKUMUI, ESANT ĮTAMPIŲ
KONCENTRACIJAI

Magistro darbas

Vadovas

doc. dr. A. Sabaliauskas

2009 06

Atliko

MM7 gr. Magistrantas

A. Charčenko

2009 06

Recenzentas

doc. dr. S. Rimovskis

2009 06

ŠIAULIAI, 2009

Charcenko A. Influence of Electromechanic Processing to the Long-Term under Conditions of Stress: Master thesis of mechanical engineer/research advisor Assoc. Prof. dr. A. Sabaliauskas; Šiauliai University, Technological Faculty, Mechanical Engineering Department. – Šiauliai, 2009. – 35 p.

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 tension-compression. For these 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 tension-compression, hardened surface the positive influence on durability starts, when stress amplitude is $\bar{\sigma}_{\max} \leq 1.3$ value. 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 tension-compression.

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	5
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	6
ĮVADAS.....	7
1. BANDYMŲ METODIKA IR PRIEMONĖS	9
1.1 ELEKTROMECHANINIS APDIRBIMAS	9
1.2 „BALTOJO“ SLUOKSNIO, GAUTO ELEKTROMECHANIŠKAI APDIRBUS PLIENĄ 45, METALOGRAFINĖ ANALIZĖ IR STRUKTŪRIŠKUMO DĖSNINGUMAI.....	10
1.3 BANDINIAI, JŲ FORMA IR MATMENYS	11
1.4 BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODAS.....	12
2. TEMPIMO-GNIUŽDYMO EKSPERIMENTŲ IR ANALITINIŲ SKAIČIAVIMŲ REZULTATAI ĮTEMPIŲ KONCENTRACIJOS ZONOSE.....	15
2.1 KONCENTRACIJOS KOEFICIENTŲ SKAIČIAVIMAS	16
2.2 ATSPARUMAS MAŽACIKLIAM DEFORMAVIMUI KONCENTRACIJOS ZONOSE	23
2.3 ATSPARUMAS SUIRIMUI KONCENTRACIJOS ZONOSE ESANT MINKŠTAJAM MAŽACIKLIAM APKROVIMUI.....	29
2.4 PAŽEIDIMŲ SKAIČIAVIMAS KONCENTRACIJOS ZONOSE.....	30
IŠVADOS	33
LITERATŪRA	34

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 Skaitinio modelio medžiagų mechaninės charakteristikos.....	13
2.1 Koncentracijos koeficientas tempimo metu pagal N. Machutovą.....	21
2.2 Koncentracijos koeficientas tempimo metu pagal H. Neuberį.....	21
2.3 Koncentracijos koeficientas tempimo metu pagal G. Glinką.....	22

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. EMA tekimo staklėse elektromechaninė schema.....	9
1.2 pav. Elektromechaniškai sukietinto plieno 45 „baltojo“ sluoksnio ir šerdies struktūra.....	11
1.3 pav. Statinio ir mažaciklio apkrovimo bandinys su koncentratoriumi tempimo-gniuždymo atveju.....	11
1.4 pav. <i>Solid95</i> tipo BE.....	12
1.5 pav. Tempiamo strypo su koncentratoriumi BE modelio tinklelis.....	14
1.6 pav. Įtempių pasiskirstymas koncentracijos zonose tempiant.....	14
2.1 pav. Įtempių ir deformacijų koncentracijos koeficientų nustatymo schema esant tampriai plastiniam deformavimui.....	16
2.2 pav. Koncentracijos koeficientų priklausomybė nuo $\bar{\sigma}_{in}$, kai $\alpha_{\sigma}^{BEM}=1,48$ esant plienui 45	22
2.3 pav. Koncentracijos koeficientų priklausomybė nuo $\bar{\sigma}_{in}$, kai $\alpha_{\sigma}^{BEM}=1,48$ esant plienui 45 po EMA.....	23
2.4 pav. Ciklinių įtempių K_{sk} koncentracijos koeficientai k pusciklyje tempimo atveju.....	25
2.5 pav. Ciklinių deformacijų $K_{\epsilon k}$ koncentracijos koeficientai k pusciklyje tempimo atveju.....	25
2.6 pav. Cikliniai stiprėjimo koeficientai m_k k pusciklyje tempimo atveju.....	26
2.7 pav. Ciklinių įtempių intensyvumo \bar{S}_{ik} priklausomybė nuo k esant minkštam nominaliajam apkrovimui tempiant.....	26
2.8 pav. Ciklinių deformacijų intensyvumai $\bar{\epsilon}_{ik}$ koncentracijos zonoje k apkrovimo pusciklyje tempimo atveju.....	27
2.9 pav. Ciklinis plastinių deformacijų $\bar{\delta}_{ik}$ intensyvumas koncentracijos zonose k apkrovimo pusciklyje tempiant.....	28
2.10 pav. Vienpusės plastinės deformacijos \bar{e}_{ipk} intensyvumo kaupimas koncentracijos zonoje esant tempimui.....	28
2.11 pav. Nesukietintų (1,3 kreivės) ir sukietintų (2,4 kreivės) bandinių su koncentratoriumi mažaciklio nuovargio eksperimentinės kreivės.....	29
2.12 pav. Ryšys tarp kvazistatinių ir nuovarginių pažeidimų tempimo-gniuždymo metu.....	31
2.13 pav. Nesukietintų ir sukietintų tempiamų – gniuždomų bandinių su koncentratoriumi eksperimento rezultatai (1) ir analitinės (2) nuovargio kreivės.....	32

IVADAS

Racionalus medžiagų, o taip pat technologinių procesų pasirinkimas siejamas su detalių, naudojamų optimaliomis eksploatacinių sąlygomis, ilgaamžiškumu. Detalių paviršinis sluoksnis, taip pat jo formavimas, pagerinant visos detalės mechanines charakteristikas - tai viena iš perspektyvių ir sparčiai besivystančių tyrimo sričių. Kadangi pagrindinis tikslas, apdirbant detalių paviršius, yra apdirbimo technologiškumas ir eksploatacinių savybių gerinimas, todėl ir šiuolaikiškų technologijų tyrimas bei taikymas yra svarbus ne tik mokslinė prasme, bet ir ekonomiškai pagrįstas. Dažnai detalių eksploatacinės ir stipruminės savybės priklauso nuo sąlygų, kuriomis jos eksploatuojamos, t.y. statinio ar ciklinio apkrovimo, apkrovimo nevienalytiškumo, dilimo ar temperatūros gradientų ir kt.

Platus paviršinių sluoksnių stiprinančių būdų naudojimas skatina ir intensyvių fizikinių ir cheminių procesų tyrinėjimą, kai medžiagą paveikus koncentruotu šiluminiu šaltiniu, gaunamos kokybiškai pakitusio paviršinio sluoksnio mechaninės savybės. Ekstremalus šiluminis poveikis būdingas elektromechaninio apdirbimo būdai, kurio metu vyksta struktūriniai, fizikiniai ir mechaniniai pokyčiai, darantys įtaką tokių detalių įtempimų būviui. Šių procesų, vykstančių elektromechaninio apdirbimo metu, visuma, taip pat veikiančios temperatūriniai gradientai suformuoja vadinamąjį „baltąjį sluoksnį“. Elektromechaninis bandinių apdirbimas, eksperimentinis ir teorinis jų tyrimas mažaciklio apkrovimo sąlygomis – tai bandymas praplėsti taip apdirbamų detalių eksploatacines savybes bei jų rinką. Tokių detalių ilgaamžiškumas ir patikimumas svarbus labiausiai apkraunamose vietose, t.y. paviršiuose, įvertinant plastinių deformacijų kaupimą, mikroįtrūkimų atsiradimo ir plitimo dėsninumus, struktūrinių darinių pokyčius medžiagoje, įtempimų (liekamųjų įtempimų ir įtempimų dėl išorinių apkrovų) pasiskirstymą, paviršiaus kokybę ir t.t. todėl labai dažnai detalių eksploatacinį ilgaamžiškumą lemia ne visos detalės, o jos paviršiaus savybės.

Paminėti fizikiniai reiškiniai, priklausantys nuo elektromechaninio apdirbimo režimų, formuoja detalės paviršiuje medžiagos įtempimų ir deformacijų, o taip pat liekamųjų įtempimų ypatumus, kas leidžia tokio tipo detales tirti kaip du kompozicinius dėmenis tiek statinio, tiek daugkartinio apkrovimo metu [1].

Darbo tikslas – nustatyti elektromechaniškai sukietinto plieno 45 apvalaus skerspjuvio bandinių mažaciklio nuovargio charakteristikas, esant tempimui-gniuždymui ir esant įtempimų koncentracijai.

Darbo uždaviniai:

1. Apskaičiuoti koncentracijos koeficientus pagal N. Machutovą, H. Neuberį ir G. Glinką ir sulygininti 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 tempimui;
4. Atlikti analitinį – eksperimentinį sukietintų detalių su įtempiu koncentratoriais stiprumo ir ilgaamžiškumo įvertinimą.

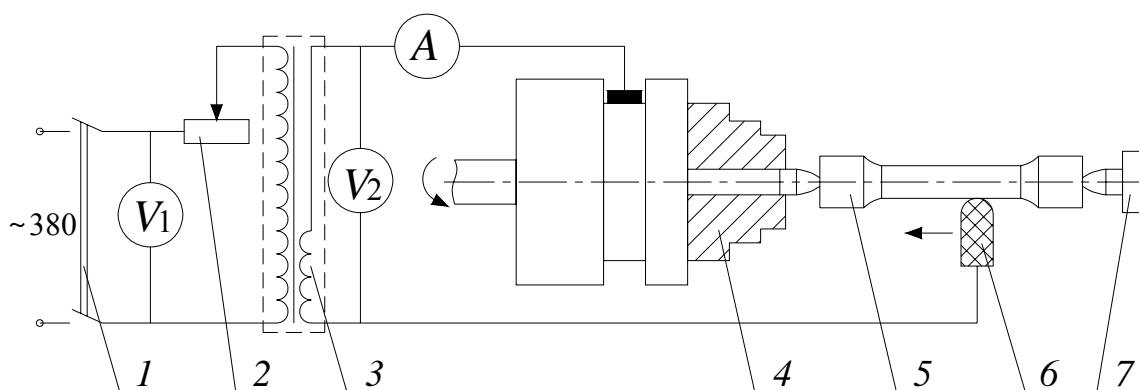
Tyrimo metodai – įtempių ir deformacijų būvio tyrimai atlikti baigtinių elementų metodu, naudojant baigtinių elementų metodo programą ANSYS. Atsparumas mažacikliam deformavimui koncentracijos zonose ir pažeidimų skaičiavimas buvo atliktas naudojant analitinius tyrimo metodus.

1. BANDYMŲ METODIKA IR PRIEMONĖS

1.1 Elektromechaninis apdirbimas

Elektromechaninis apdirbimas (EMA) – metalinių detalių paviršiaus apdirbimo būdas, pagrįstas vietiniu jėgos bei šilumos poveikiu įrankio ir detalės kontakto zonoje. Įrankio ir detalės sandūroje eina mažos įtampos ir didelio stiprumo elektros srovė. Kontakto zonoje išsiskiria žymi šiluminės energijos dalis. Zona greitai įkaista iki aukštos (aukštesnės kaip 911°C) temperatūros, užtikrinančios sąlygas austenitiniam virsmui vykti. Detalės įkaitinto sluoksnio tūris, palyginti su visos detalės tūriu, yra toks mažas, kad šiluma dideliu greičiu iš paviršinio sluoksnio nueina gilyn, t.y. įkaitintas sluoksnis greitai ataušta ir dėl jame vykstančių struktūrinių pakeitimų, sukietėja ir susiformuoja vadinamasis „baltasis“ sluoksnis [1,2]. EMA sukietinto paviršiaus atsparumas dylimui padidėja 1,6-2,6 karto [4].

Detalių EMA dažniausiai naudojamos tekinimo staklės. Principinė įrenginio schema pavaizduota 1.1 pav.



1.1 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 apdirbamą 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 tekinimo staklių suporte. Nuo staklių jis izoliuojamas tekstolitinėmis plokštelėmis. Apdirbama detalė tvirtinama tekinimo 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 [5]. Naudojant EMA, vienu metu vyksta du procesai:

- paviršiaus nelygumų sulyginimas;
- paviršinio sluoksniu sukietinimas.

EMA bandymai buvo atliekami su konstrukciniu plieniu 45.

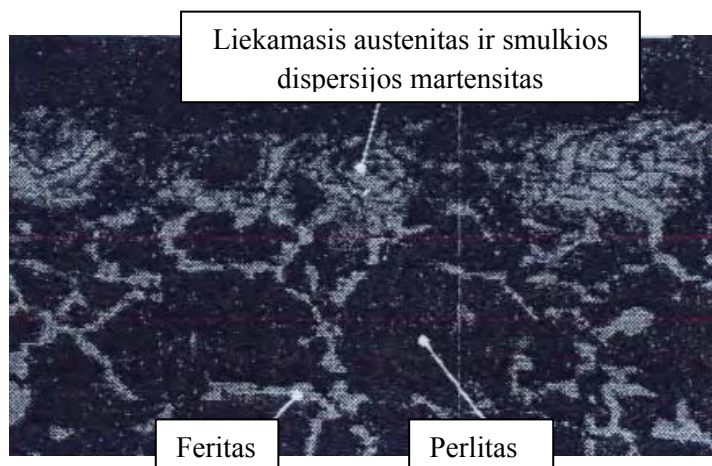
Atsižvelgiant į kitų autorių patirtį [6-9] elektromechaninio sukietėjimo metu naudotasi šiais režimais:

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

1.2 „Baltojo“ sluoksniu, gauto elektromechaniškai apdirbus plieną 45, metalografinė analizė ir struktūriškumo dėsningumai

Tekant elektros srovei I , elektronai atsitenkę į gardelės švytuojančius jonus, praranda greitį ir perduoda jiems savo kinetinę energiją; dėl kinetinės energijos perdavimo metalas įkaista (Džaulio šiluma). Įrankis, deformuodamas detalės paviršių, veikia stabilumą praradusius gardelės jonus, iškreipdamas gardelę. Gardelės iškreipimo metu suformuojamas kietas detalės viršutinis sluoksniu, vadinamas „baltuoju“. Temperatūrai pasiekus austenizacijos ribą ($\sim 911^{\circ}$ C), dislokacijos gali kauptis kristalo išoriniame paviršiuje, deformuojantis gardelei. Kristalų iškreipimo metu gardelės jonai aktyvuojasi ir, išorinių jėgų veikiami, patenka į kito kristalo gardeles, esančias ties gretimą kristalo ribą. Dėl priverstinio slėgimo (įrankio prispaudimo jėgos F) gaunamas smulkaus grūdėtumo martensito kristalas, kuris dislokacijų pavidalu yra įsiterpęs tarp austenito grūdelių, todėl, vėstant detalės paviršiui, austenito grūdelių tūrius užpildo smulkios dispersijos martensito struktūra.

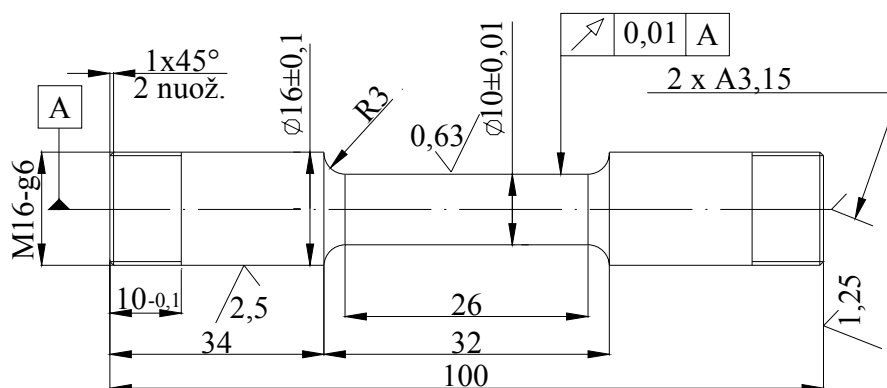
Yra žinoma, kad kristalų augimo greitis su dislokacijomis kelis kartus didesnis už kristalų augimo greitį be dislokacijų, tačiau dėl kritinių temperatūrų nepastovumo ir kritimo aušinimo greičio martensito kristalai nespėja išaugti [1].



1.2 pav. Elektromechaniškai sukietinto plieno 45 „baltojo“ sluoksnio ir šerdies struktūra

1.3 Bandiniai, jų forma ir matmenys

Bandymui atlikti buvo pagaminti laiptuoti bandiniai su koncentratoriumi. Atsižvelgiant į EMA technines galimybes, įtempių koncentratoriams, buvo parinkta 3 mm spinduliu suapvalinta dalis bandinio skersmenų pasikeitimo vietoje. Teorinis koncentracijos koeficientas tempiant $K_t = 1,46$ [10]. Sukietintų ir nesukietintų bandinių matmenys ir formos buvo identiški [11,12] Bandinio darbo brėžinys pateiktas 1.2 paveiksle.



1.3 pav. Statinio ir mažaciklio apkrovimo bandinys su koncentratoriumi tempimo-gniuždymo atveju

Naudojamas bandinys turi užtikrinti darbinės dalies įtempių būvio vienalytiškumą visose bandymo fazėse iki nuovarginio plyšio atsiradimo. Bandinio formos ir matmenų parinkimą lemia

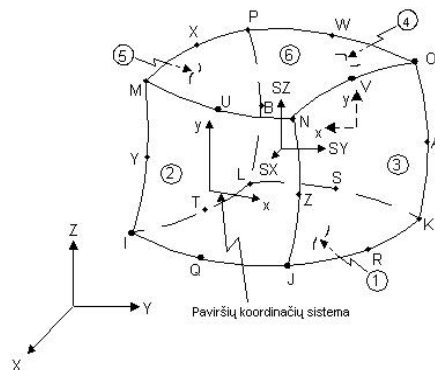
įtempių koncentracijos koeficientų mažiausios reikšmės darbinių ir atraminių paviršių perėjimo zonose, bei bandinio pastovumo užtikrinimas bandinio atraminio paviršiaus ir tvirtinimo įtaiso ritinėlių kontakto vietoje.

Deformavimo atveju bandinys turi būti gaminamas iš strypo. Tyrimams buvo pasirinkta cikliškai silpnėjanti medžiaga – kokybiškasis anglinis konstrukcinis plienas 45. Bandinys buvo pagamintas iš 16 mm skersmens apvalaus valcuoto strypo.

1.4 Baigtinių elementų metodas

Per pastaruosius 10 metų žymiai patobulėjus skaičiavimo technikai, atsirado galimybė įtempių ir deformacijų būvį koncentracijos zonose, esant mažacikliam apkrovimui, apskaičiuoti skaitiniais metodais, iš kurių žinomiausias baigtinių elementų metodas (BEM). Šio metodo privalumas tas, kad jis leidžia spręsti netiesinius uždavinius, tarp jų susijusius su įtempių bei plastinių deformacijų apskaičiavimu koncentracijos zonose [13], galima skaičiuoti sudėtingų geometrinių formų elementus [14], jiems taikant kombinuotas apkrovimo schemas [15], lengvai įdiegiamos elementų sutankinimo įtempių koncentracijos vietose galimybės [16-19]. Tačiau mažaciklio apkrovimo atveju ciklinius įtempius ir deformacijas nustatyti BEM sunkiau, nes reikia naudoti papildomas analitines išraiškas, įvertinančias vienpusės plastinės deformacijos kaupimąsi (įtempių ir deformacijų būvio istoriją) bei ciklinę medžiagos mechaninių savybių kitimą [3].

Įtempių ir deformacijos dėsningumams nustatyti buvo panaudota matematinio modeliavimo baigtinių elementų (BE) programa ANSYS. Buvo sukurti erdviniai BE moduliai, kurie savo matmenimis atitiktų 1.3 paveiksle pavaizduotus eksperimentinius bandinius. Modeliams sukurti galima pasirinkti įvairių tipų BE. BE tipo įtaka skaičiavimų tikslumui nagrinėta [20] literatūroje. Atsižvelgiant į techninių priemonių pajėgumą, modeliams sukurti buvo panaudoti *Solid95* tipo BE.



1.4 pav. *Solid95* tipo BE

Šie metodai pasižymi tuo, kad yra kubo formos sudaryti iš 20 mazgų. Tačiau jie gali turėti bet kokią erdvinę orientaciją. Kiekvienas mazgas turi 3 laisvės laipsnius X,Y ir Z ašių kryptimis. Elemento poslinkiai aprašomi linijine aproksimacija. *Solid95* elementai puikiai tinka modeliuoti kreivus paviršius. Todėl juos galima naudoti apvalaus skerspjuvio strypo modeliui kurti. Šio tipo elementais patogiu atlikti skaičiavimus esant tampriai plastiniam deformavimui, nustatyti poslinkiams, deformacijoms, įtempiams ir t.t. [21]. 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 [5,6] literatūroje pateiktus analitinio skaičiavimo duomenis. Pagal tuos pačius paskaičiavimus buvo parinktas ir sukietinto „baltojo“ sluoksnio storis lygus 50 μm . Modeliuojamų sluoksnių mechaninės charakteristikos pateiktos 1.1 lentelėje.

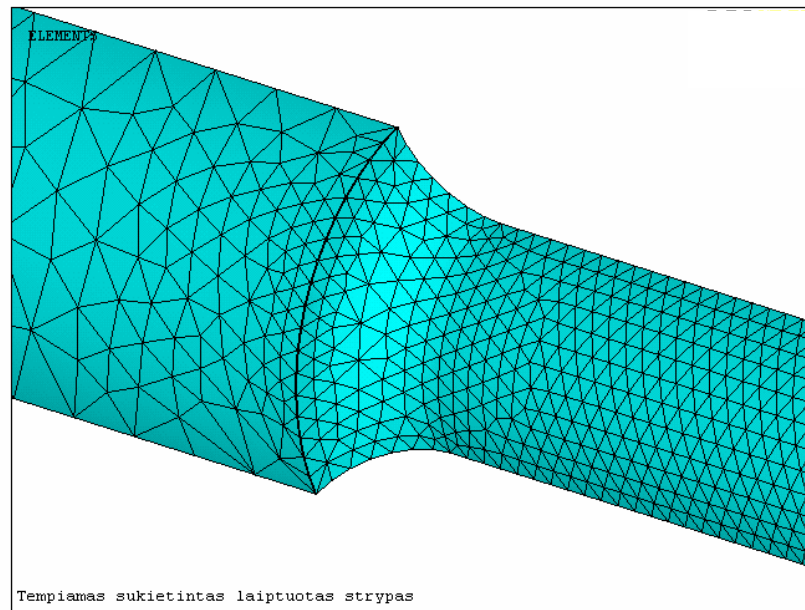
1.1 lentelė

Skaitinio modelio medžiagų mechaninės charakteristikos

σ_{pr} , MPa	R_m , MPa	σ_f , MPa	e_{pr} , %	e_u , %	Z, %
Plienas 45(šerdis)					
375	786	882,5	0,22	29	30
Išorinis „baltasis“ sluoksnis					
709	2033	2033	0,355	4,4	4

Tempimo atveju buvo sudaryti du erdviniai modeliai atitinkantys $1/8$ bandinių darbinės dalies – modelis su plieno 45 statinėmis mechaninėmis charakteristikomis ir sluoksniuotas modelis elektromechaniškai sukietintam plienui 45. Plieno 45 po EMA modelį sudaro plieno 45 šerdis ir išorinis „baltojo“ sluoksnio kevalas. BE tinklėlis sutankintas numatomose įtempių koncentracijos zonoje. Šių modelių suskaidymas baigtiniais elementais parodytas 1.5 paveiksle.

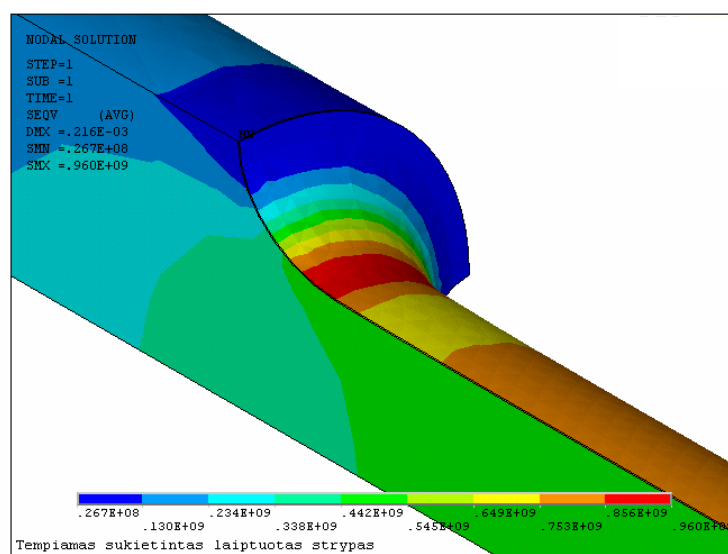
Skaičiuojant modelį, apatinis horizontalusis plotas buvo suvaržytas Y ašies kryptimi, priekinis vertikalusis – Z, o kairysis galas X ašies kryptimi. Prie dešiniojo galo paviršiaus perimetro buvo pridėta išskirstyta tempimo apkrova. Įtempių ir deformacijų koncentracijos koeficientai skaičiuoti BEM esant tokioms apkrovoms, kad nominalūs įtempiai $\bar{\sigma}_{in}$ neto skerspjuvyje būtų 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8 plieno 45 proporcingumo ribos. Skaičiavimas buvo atliekamas modeliui esant su sukietintu sluoksniu ir be jo.



1.5 pav. Tempiamo strypo su koncentratoriumi BE modelio tinklelis

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 $h = 50 \mu\text{m}$ sukietinto sluoksnio storis). Tuo tarpu per visą „darbinį bandinio“ ilgį elemento kraštinės ilgis $30h$, o nesukietintuose vietose – $50h$.

Įtempių pasiskirstymas koncentracijos zonose pavaizduotas 1.6 paveiksle.



1.6 pav. Įtempių pasiskirstymas koncentracijos zonose tempiant

2. TEMPIMO-GNIUŽDYMO EKSPERIMENTŲ IR ANALITINIŲ SKAIČIAVIMŲ REZULTATAI ĮTEMPIŲ KONCENTRACIJOS ZONOSE

Mašinų detalėse ir konstrukciniuose elementuose, veikiant apkrovai, įtempimų ir deformacijų laukai dažnai pasiskirsto netolygiai - susidaro įtempimų (deformacijų) koncentracijos zonos. Įtempimų koncentraciją sukelia:

- Konstrukciniai faktoriai (staigus geometrinės formos pasikeitimas – kiaurymės, įpjovos, grioveliai ir pan.);
- Išoriniai poveikiai (kontaktinės jėgos, staigus temperatūros pokytis);
- Technologiniai defektai (intarpai, tuštumos ir plyšiai, atsiradę gaminant detalę po liejimo, suvirinimo, terminio apdirbimo ir pan.).

Įtempimų koncentracijos stengiamasi išvengti parenkant aptakesnes detalių formas, laikantis nustatytų gamybos ir terminio apdirbimo režimų. Tačiau visiškai jos išvengti neįmanoma, ypač, kai koncentracijos zonos atsiranda dėl detalių ir konstrukcinių elementų geometrinės formos, kadangi geometrinę formą lemia funkcinė paskirtis ir gamybos technologija.

Detalių su įtempimų koncentracijomis stiprumas ir ilgaamžiškumas priklauso nuo medžiagos mechaninių savybių ir eksploatacinės apkrovos pobūdžio. Kai apkrova kintanti (ciklinė) ir koncentracijos zonos viršija proporcingumo ribą, susidaro mažaciklio apkrovimo sąlygos. Šiuo atveju įtempimų koncentracija nulemia detalės ilgaamžiškumą.

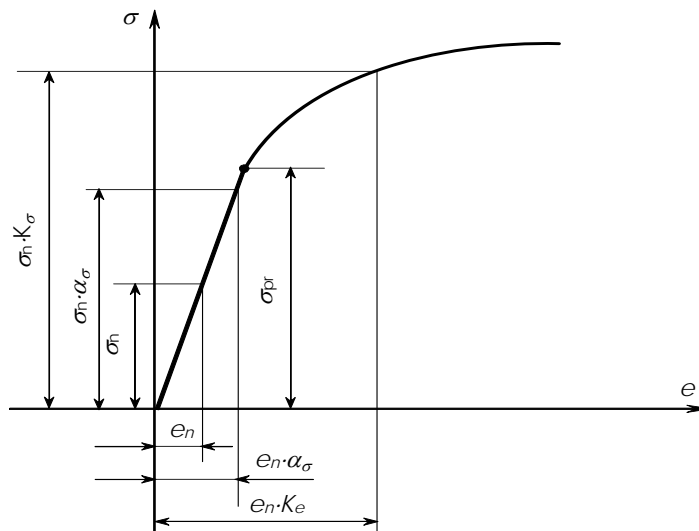
Įtempimų ir deformacijų koncentracijos zonose nustatymo bei jų įtakos mašinų detalių ir konstrukcijų elementų stiprumui ir ilgaamžiškumui įvertinimo, esant mažacikliam apkrovimui, problema egzistuoja nuo seno. Taupant medžiagas, mažinant konstrukcijų svorį, didinamos projektinės kintančios apkrovos; kartu didėja tikimybė, kad įtempimų koncentracijos zonose bus viršijama medžiagos proporcingumo riba, todėl vis aktualesnė darosi įtempimų ir deformacijų koncentracijos zonose nustatymo problema.

Ši problema iki šiol dažniausiai buvo sprendžiama eksperimentiniais arba analitiniais metodais. Analitiškai nustatant įtempimus ir deformacijas koncentracijos zonose, sprendžiami tamprumo ir plastiškumo teorijos uždaviniai. Esant tampriam deformavimui, daugumą svarbesnių įtempimų koncentracijos uždavinių pavyko išspręsti H. Neuberiui (H. Neuber), įtempimų koncentracijų formoms aprašyti panaudojus elipsines koordinates. Kai koncentracijos zonose vyksta statinis tampriai plastinis deformavimas, analitines išraiškas įtempimų ir deformacijų koncentracijos koeficientams apskaičiuoti yra pateikę H. Neuberis, E. Z. Stouelas (Stowell E. Z.), G. Glinka, N. Machutovas (N. Machutov); jos tikslinamos atsižvelgiant į naujus eksperimentinius duomenis.

N. Machutovo ir M. Daunio darbuose pateikiama metodika, kaip apskaičiuoti įtempių ir deformacijų būvį koncentracijos zonose, esant cikliniam tampriai plastiniam deformavimui, pasitelkus koncentracijos koeficientų skaičiavimo priklausomybes, analogiškas kaip ir statinės apkrovos sąlygomis [3].

2.1 Koncentracijos koeficientų skaičiavimas

Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas koncentracijos zonose, 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.



2.1 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 įtempims ir deformacijoms koncentracijos zonose apskaičiuoti (2.1 pav.), tai yra

$$\bar{\sigma}_{max} = \bar{\sigma}_n \alpha_\sigma \quad (2.1)$$

$$\bar{e}_{max} = \bar{e}_n \alpha_\sigma \quad (2.2)$$

Perėjus į tampriai plastinį deformavimą, kaip matyti iš 2.1 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,

$$\bar{\sigma}_{max} = \bar{\sigma}_n \cdot K_\sigma \quad (2.3)$$

ir

$$e_{max} = \bar{e}_n \cdot K_e \quad (2.4)$$

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 [24]:

$$\frac{K_\sigma \cdot K_e}{\alpha_\sigma} = 1, \quad (2.5)$$

E. Stouelo [25]:

$$K_e = \frac{\alpha_\sigma - 1}{k_\sigma - 1} K_\sigma \quad (2.6)$$

Iš šių dviejų ilgai naudotų lygybių populiariesnė 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 [26] pasiūlė patobulintą H. Neuberio priklausomybę: (2.5) 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:

$$\frac{K_\sigma \cdot K_e}{\alpha_\sigma} = F[\alpha_\sigma, \bar{\sigma}_n, f(\sigma, e)], \quad (2.7)$$

$$\text{kur } F = \frac{1}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_n)^{n(1-m_0)[1-(\sigma_n-1/\alpha_\sigma)]}}, \quad (2.8)$$

esant laipsninei deformavimo diagramos aproksimacijai, ir

$$F = \frac{1}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_n)^{n(1-G_T)[1-(\sigma_n-1/\alpha_\sigma)]}} \quad (2.9)$$

esant tiesinei deformavimo diagramos aproksimacijai. (2.8) ir (2.9) lygybėse konstanta $n = 0,5$.

Vėliau G. Glinka pasiūlė priklausomybę [27]:

$$\frac{1}{2}(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_n)^2 = \int_0^{\bar{e}_{max}} \bar{\sigma}(\bar{e}) d\bar{e}. \quad (2.10)$$

Visos čia pateiktos (2.5), (2.6), (2.7) ir (2.10) lygybės yra sudarytos remiantis vienokiomis ar kitokiomis prielaidomis.

Taigi laikydami, jog

$$\bar{\sigma}_i = \bar{e}_i, \text{ kai } \bar{\sigma}_{in} \leq 1 \quad (2.11)$$

ir

$$\bar{\sigma}_i = \bar{e}_i^{m_0}, \text{ kai } \bar{\sigma}_{in} > 1 \quad (2.12)$$

iš (2.5) lygybės gauname, kad

$$K_{\sigma} = \alpha_{\sigma}^{\frac{2m_0}{1+m_0}} \cdot \bar{\sigma}_{in}^{\frac{m_0-1}{m_0+1}}, \quad (2.13)$$

$$K_e = \alpha_{\sigma}^{\frac{2}{1+m_0}} \cdot \bar{\sigma}_{in}^{\frac{1-m_0}{1+m_0}}, \quad (2.14)$$

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

$$K_{\sigma} = \alpha_{\sigma}^{\frac{2m_0}{1+m_0}}, \quad (2.15)$$

$$K_e = \alpha_{\sigma}^{\frac{2}{1+m_0}}, \quad (2.16)$$

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

Panaudojant (2.6) lygybę, gaunama:

$$K_e = \frac{\bar{\sigma}_{in}^{\frac{1-m_0}{m_0-1}}}{[K_e - (\alpha_{\sigma} - 1)]^{\frac{1}{m_0-1}}}, \text{ kai } \bar{\sigma}_{in} \leq 1 \quad (2.17)$$

$$K_e = \frac{1}{[K_e - (\alpha_{\sigma} - 1)]^{\frac{1}{m_0-1}}}, \text{ kai } \bar{\sigma}_{in} > 1 \quad (2.18)$$

Abiem atvejais

$$K_{\sigma} = \frac{K_e}{K_e - (\alpha_{\sigma} - 1)} \quad (2.19)$$

Naudojant N. Machutovo priklausomybę (2.7), gaunama

$$K_{\sigma} = \frac{\alpha_{\sigma}^{\frac{2m_0}{1+m_0}} \bar{\sigma}_{in}^{\frac{m_0-1}{m_0+1}}}{(\alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_{in})^{\frac{1-m_0}{1+m_0} [1 - (\bar{\sigma}_{in}^{-1} / \alpha_{\sigma})^{m_0}]}} \quad (2.20)$$

ir

$$K_e = \frac{\alpha_\sigma \frac{2}{1+m_0} \bar{\sigma}_{in}^{\frac{1-m_0}{1+m_0}}}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_{in})^{\frac{1-m_0}{1+m_0} [1-(\bar{\sigma}_{in}^{-1}/\alpha_\sigma)]}}, \quad (2.21)$$

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

$$K_\sigma = \frac{\alpha_\sigma \frac{2m_0}{1+m_0}}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_{in})^{\frac{1-m_0}{1+m_0} [1-(\bar{\sigma}_{in}^{-1}/\alpha_\sigma)] m_0}}, \quad (2.22)$$

$$K_e = \frac{\alpha_\sigma \frac{2}{1+m_0}}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_{in})^{\frac{1-m_0}{1+m_0} [1-(\bar{\sigma}_{in}^{-1}/\alpha_\sigma)]}}, \quad (2.23)$$

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

Pasinaudoję G. Glinkos pasiūlyta (2.10) lygybe, abiem atvejais gaunama [11]:

$$K_\sigma = \frac{\left\{ 1 + \frac{m_0 + 1}{2} [(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_{in})^2 - 1] \right\}^{\frac{m_0}{m_0 - 1}}}{\bar{\sigma}_{in}}, \quad (2.24)$$

$$K_e = \frac{\left\{ 1 + \frac{m_0 + 1}{2} [(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_{in})^2 - 1] \right\}^{\frac{1}{m_0 + 1}}}{\bar{\sigma}_{in}}, \quad \text{kai } \bar{\sigma}_{in} \leq 1 \quad (2.25)$$

ir

$$K_e = \frac{\left\{ 1 + \frac{m_0 + 1}{2} [(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_{in})^2 - 1] \right\}^{\frac{1}{m_0 + 1}}}{\bar{\sigma}_{in}^{1/m_0}}, \quad \text{kai } \bar{\sigma}_{in} > 1 \quad (2.26)$$

Buvo sudarytas BE modelis su koncentratoriumi, kurio teorinis įtempių koncentracijos koeficientas pagal [10] α_σ yra lygus 1,46. Esant tampriajam deformavimui koncentracijos zonos baigtinių elementų metodu apskaičiavus α_σ , gauta 1,48 reikšmė. Analitiškai ir BEM paskaičiuoti K_e ir K_σ pateikti 2.1-2.3 lentelėse ir 2.2 paveiksle.

Didėjant nominalios apkrovos lygiui, BEM ir priklausomybės apskaičiuotų koncentracijos koeficientų skirtumas didėja. Ypač tai pažymėtina apie deformacijų koncentracijos koeficientus.

Koncentracijos koeficientai tempimo metu pagal N. Machutovą

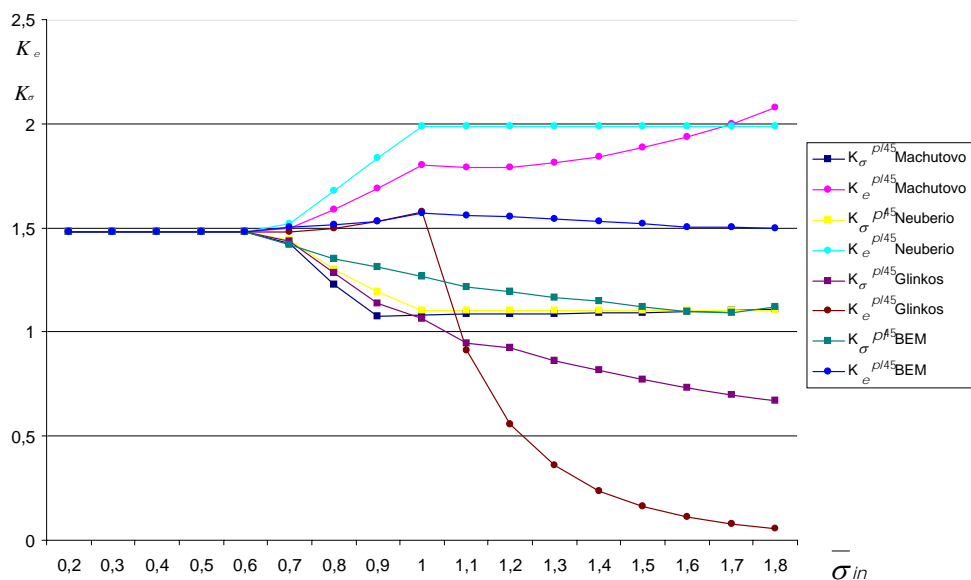
$\bar{\sigma}_{in}$	α_{σ}^{BEM}	Plienas 45		Plienas 45(BEM)		Plienas 45 po EMA		Plienas 45 po EMA(BEM)	
		K_{σ}	K_e	K_{σ}	K_e	K_{σ}	K_e	K_{σ}	K_e
		$m_0 = 0,142$				$m_0 = 0,148$			
0,7	1,48	1,423	1,500	1,421	1,501	1,423	1,500	1,480	1,480
0,8		1,225	1,589	1,350	1,515	1,223	1,589	1,423	1,501
0,9		1,075	1,689	1,311	1,533	1,079	1,686	1,355	1,570
1,0		1,081	1,799	1,266	1,572	1,083	1,794	1,289	1,637
1,1		1,086	1,788	1,215	1,558	1,089	1,745	1,240	1,615
1,2		1,087	1,793	1,191	1,552	1,090	1,748	1,216	1,595
1,3		1,088	1,812	1,168	1,541	1,091	1,764	1,189	1,581
1,4		1,091	1,843	1,149	1,530	1,094	1,793	1,171	1,568
1,5		1,095	1,885	1,122	1,521	1,097	1,832	1,143	1,552
1,6		1,098	1,939	1,099	1,505	1,102	1,882	1,121	1,531
1,7		1,103	2,00	1,093	1,501	1,104	1,943	1,102	1,520
1,8		1,109	2,08	1,120	1,497	1,115	2,015	1,201	1,511

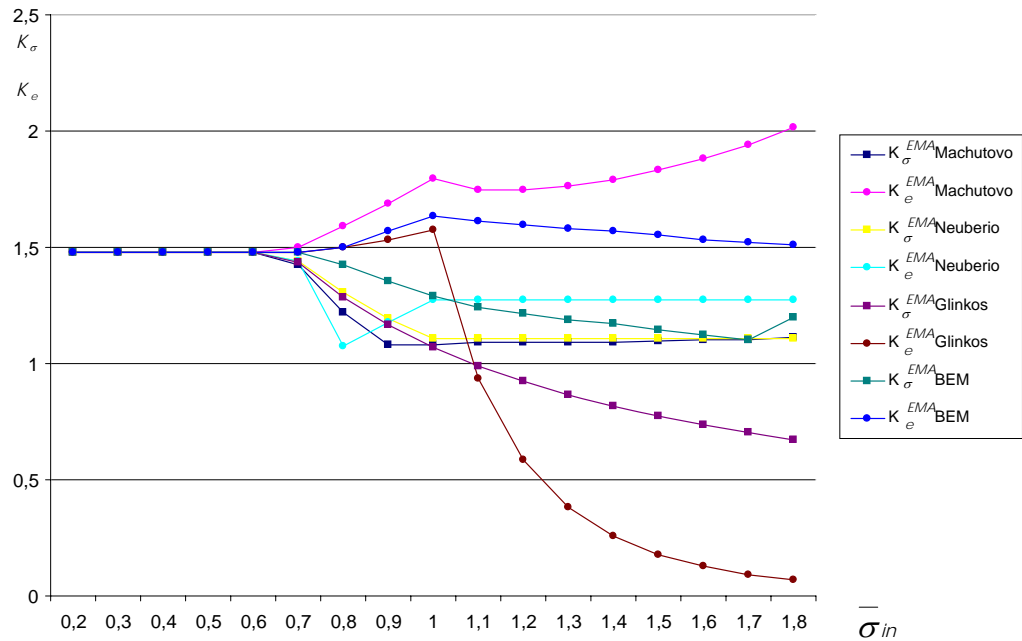
Koncentracijos koeficientai tempimo metu pagal H. Neuberį

$\bar{\sigma}_{in}$	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
		$m_0 = 0,142$				$m_0 = 0,148$			
0,7	1,48	1,440	1,519	1,421	1,501	1,441	1,442	1,480	1,480
0,8		1,303	1,679	1,350	1,515	1,305	1,077	1,423	1,501
0,9		1,192	1,834	1,311	1,533	1,196	1,176	1,355	1,570
1,0		1,102	1,986	1,266	1,572	1,106	1,272	1,289	1,637
1,1		1,102	1,986	1,215	1,558	1,106	1,272	1,240	1,615
1,2		1,102	1,986	1,191	1,552	1,106	1,272	1,216	1,595
1,3		1,102	1,986	1,168	1,541	1,106	1,272	1,189	1,581
1,4		1,102	1,986	1,149	1,530	1,106	1,272	1,171	1,568
1,5		1,102	1,986	1,122	1,521	1,106	1,272	1,143	1,552
1,6		1,102	1,986	1,099	1,505	1,106	1,272	1,121	1,531
1,7		1,102	1,986	1,093	1,501	1,106	1,272	1,102	1,520
1,8		1,102	1,986	1,120	1,497	1,106	1,272	1,201	1,511

Koncentracijos koeficientai tempimo 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
		$m_0 = 0,142$				$m_0 = 0,148$			
0,7	1,48	1,435	1,481	1,421	1,501	1,436	1,481	1,480	1,480
0,8		1,282	1,498	1,350	1,515	1,284	1,498	1,423	1,501
0,9		1,135	1,531	1,311	1,533	1,165	1,530	1,355	1,570
1,0		1,066	1,575	1,266	1,572	1,069	1,574	1,289	1,637
1,1		0,947	0,914	1,215	1,558	0,99	0,938	1,240	1,615
1,2		0,921	0,559	1,191	1,552	0,924	0,588	1,216	1,595
1,3		0,864	0,359	1,168	1,541	0,867	0,384	1,189	1,581
1,4		0,815	0,236	1,149	1,530	0,819	0,259	1,171	1,568
1,5		0,772	0,161	1,122	1,521	0,776	0,180	1,143	1,552
1,6		0,734	0,113	1,099	1,505	0,738	0,128	1,121	1,531
1,7		0,7	0,081	1,093	1,501	0,705	0,093	1,102	1,520
1,8		0,67	0,059	1,120	1,497	0,674	0,070	1,201	1,511

2.2 pav. Koncentracijos koeficientų priklausomybė nuo $\bar{\sigma}_{in}$, kai $\alpha_{\sigma}^{BEM} = 1,48$ esant plienui 45



2.3 pav. Koncentracijos koeficientų priklausomybė nuo $\bar{\sigma}_{in}$, kai $\alpha_{\sigma}^{BEM}=1,48$ esant plienui 45 po
EMA

2.2 Atsparumas mažacikliam deformavimui koncentracijos zonos

Esant mažacikliam apkrovimui analogiškai (2.3) ir (2.4) lygybėms koncentracijos zonoje galime užrašyti:

$$\bar{S}_{ik} = \bar{S}_{ink} \cdot K_{Sk} \quad (2.27)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ik} = \bar{\varepsilon}_{ink} \cdot K_{\varepsilon k}, \quad (2.28)$$

čia \bar{S}_{ik} ir $\bar{\varepsilon}_{ik}$ - ciklinių įtempimų ir deformacijų intensyvumai koncentracijos zonoje k apkrovimo pusciklyje; \bar{S}_{ink} ir $\bar{\varepsilon}_{ink}$ - ciklinių nominalių įtempimų ir deformacijų intensyvumai k apkrovimo pusciklyje; K_{Sk} ir $K_{\varepsilon k}$ - ciklinių įtempimų ir deformacijų koncentracijos koeficientai k pusciklyje,

o

$$\bar{S}_{ik} = \frac{\bar{S}_{ik}}{S_T}; \quad \bar{\varepsilon}_{ik} = \frac{\bar{\varepsilon}_{ik}}{\varepsilon_T}; \quad \bar{S}_{ink} = \frac{\bar{S}_{ink}}{S_T}; \quad \bar{\varepsilon}_{ink} = \frac{\bar{\varepsilon}_{ink}}{\varepsilon_T}.$$

Skaičiuojant K_{sk} ir K_{ek} naudojamos anksčiau minėtos lygybės jos statinius įtempius $\bar{\sigma}$ pakečiant į ciklinius \bar{S}_k , statines deformacijas \bar{e} į ciklines $\bar{\varepsilon}_k$, stiprinimo koeficientą m_0 į ciklinį m_k [11]. Cikliškai nestabilių medžiagų kiekvieno deformavimo pusciklio diagramos skirsis, todėl ir K_{sk} , bei K_{ek} bus skirtingi, nes skirtingi bus laipsninės aproksimacijos koeficientai m_k . Šių dydžių analitiškai paskaičiuoti rezultatai pateikti 2.4-2.9 paveiksluose.

Laipsninės aproksimacijos laipsnio rodiklis nustatomas naudojant lygybę:

$$\bar{S}_{ik} = \bar{\varepsilon}_{ik}^{m_k}, \quad (2.29)$$

tada
$$m_k = \frac{\lg \bar{S}_{ik}}{\lg \bar{\varepsilon}_{ik}}. \quad (2.30)$$

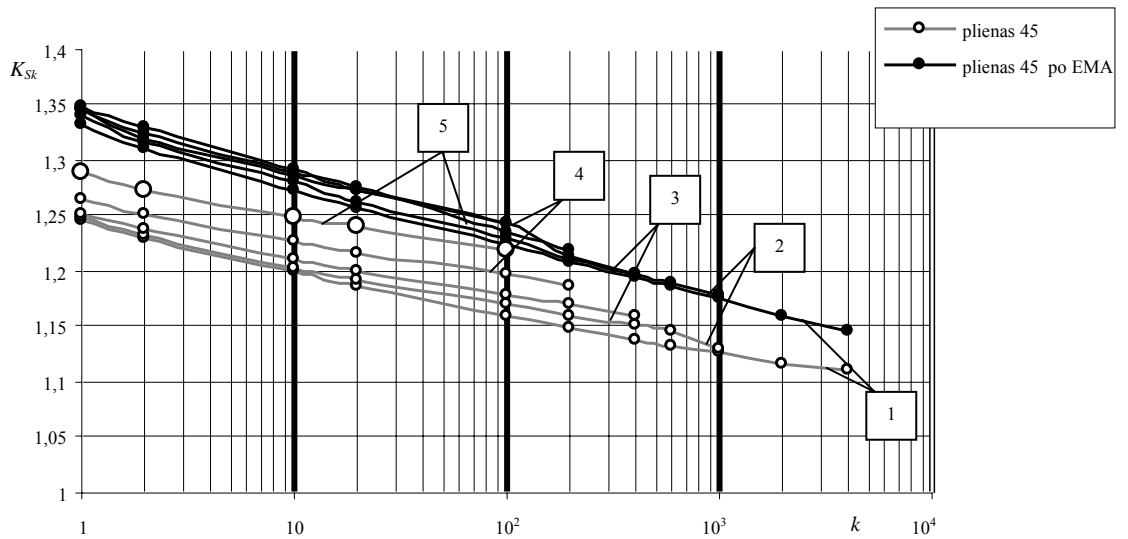
Esant minkštam apkrovimui, $\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = \dots = \bar{S}_k = const$. Šiuo atveju simetrinio ciklo diagramoms gauname:

$$m_k = \frac{\lg \bar{S}_{ik}}{\lg \left[\frac{A_{1,2}}{s_T} \left(\bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_T}{2} \right) F(k) + \bar{S}_{ik} \right]}, \quad (2.31)$$

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

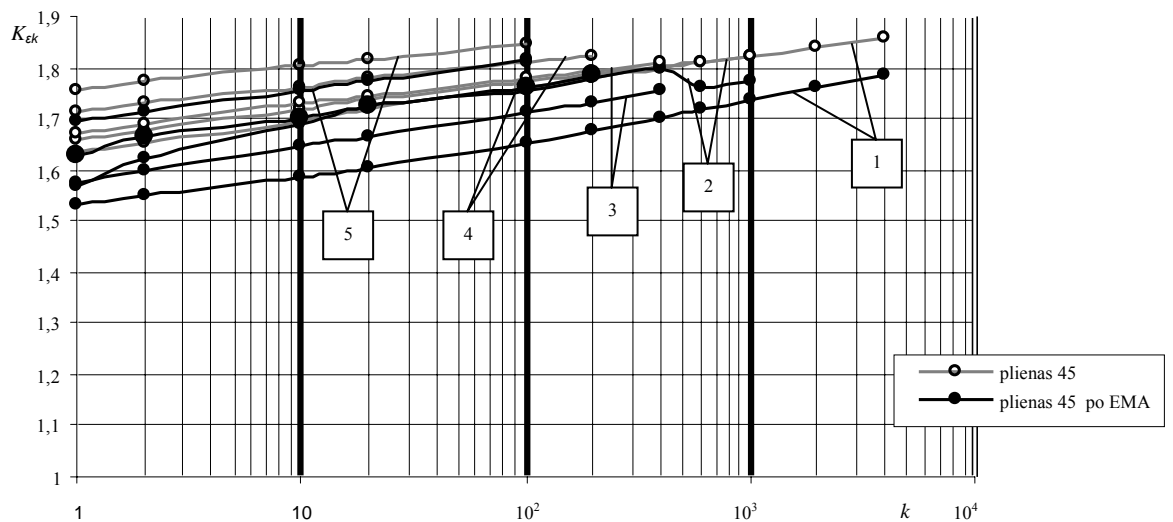
Atliekant K_{sk} ir K_{ek} skaičiavimus, naudotos (2.20)-(2.23) lygybės, bei BEM nustatyti teoriniai įtempimų koncentracijos koeficientai, esant tampriam deformavimui.

2.4 pav. parodyta, kaip keičiasi cikliškai silpnėjančių medžiagų - plieno 45 ir plieno 45 po EMA ciklinių įtempimų koncentracijos koeficientai K_{sk} esant minkštam stacionariam apkrovimui priklausomai nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus bei koncentracijos koeficiento α_σ , kai $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,8$ tempimui gniuždymui. Iš šių paveikslų matyti, kad, esant pastoviems \bar{S}_{in} , koncentracijos zonos K_{sk} yra nestacionarūs – jie mažėja.



2.4 pav. Ciklinių įtempių K_{sk} koncentracijos koeficientai k pusciklyje esant tempimui:

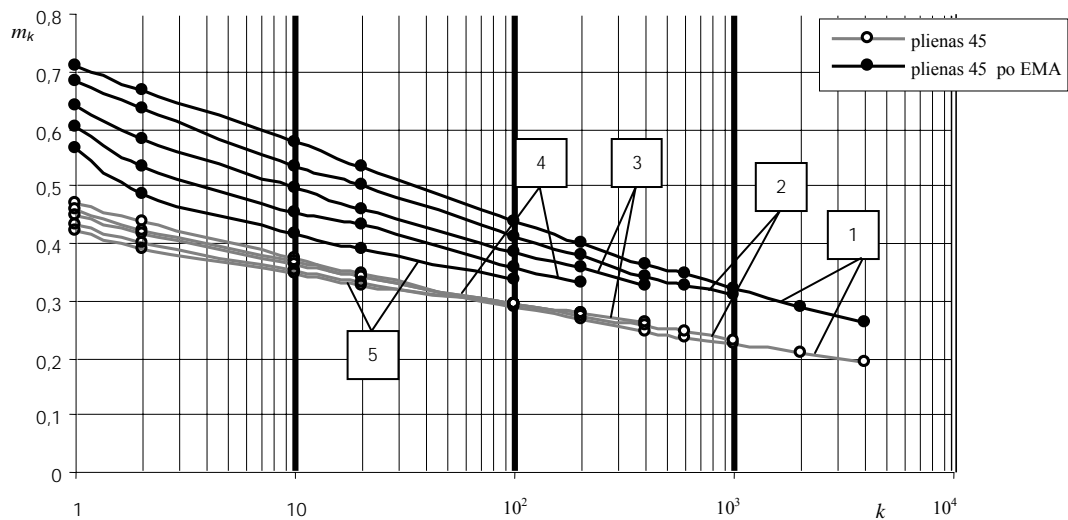
$$1-\sigma_{in} = 1,1; 2-\sigma_{in} = 1,3; 3-\sigma_{in} = 1,4; 4-\sigma_{in} = 1,6; 5-\sigma_{in} = 1,8$$



2.5 pav. Ciklinių deformacijų K_{ek} koncentracijos koeficientai k pusciklyje tempimo atveju:

$$1-\sigma_{in} = 1,1; 2-\sigma_{in} = 1,3; 3-\sigma_{in} = 1,4; 4-\sigma_{in} = 1,6; 5-\sigma_{in} = 1,8$$

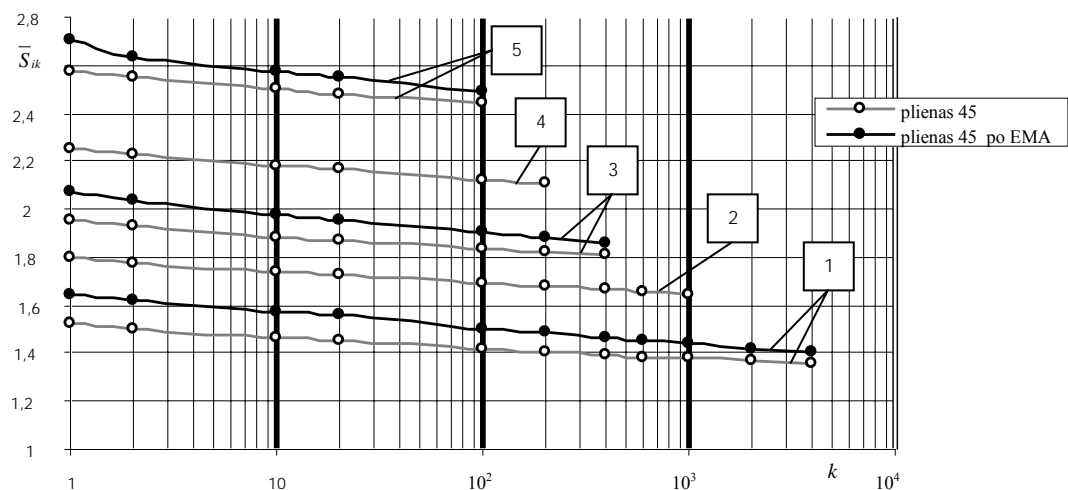
Kaip matyti iš 2.5 pav., ciklinių deformacijų koncentracijų koeficientai K_{ek} esant minkštam stacionariam apkrovimui, cikliškai silpnėjančioms medžiagoms yra nestacionarūs ir didėja priklausomai nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus bei koncentracijos koeficiento α_{σ} , kai $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,8$ tempimui.



2.6 pav. Cikliniai stiprėjimo koeficientai m_k k pusciklyje tempimo atveju:

$$1-\sigma_{in} = 1,1; 2-\sigma_{in} = 1,3; 3-\sigma_{in} = 1,4; 4-\sigma_{in} = 1,6; 5-\sigma_{in} = 1,8$$

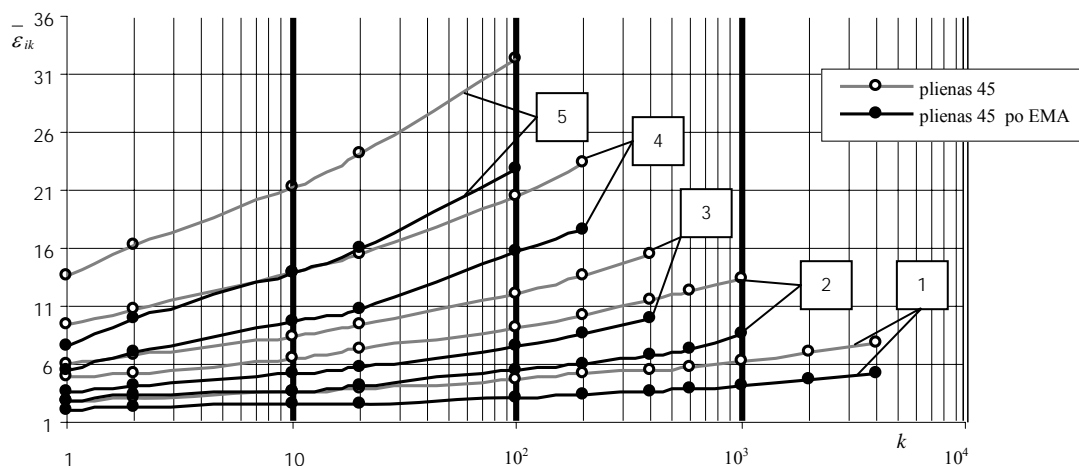
2.6 pav. parodytas, ciklinis stiprėjimo koeficientų m_k kitimas, esant minkštam stacionariam apkrovimui priklausomai nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus bei koncentracijos koeficiento α_σ , kai $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,8$ tempimui. Iš šių paveikslų matyti, kad, esant pastoviems \bar{S}_{in} , koncentracijos zonose m_k yra nestacionarūs – mažėja, nes tiriama medžiaga silpnėja.



2.7 pav. Ciklinių įtempimų intensyvumo \bar{S}_{ik} priklausomybė nuo k esant minkštam nominaliajam apkrovimui tempiant: 1- $\sigma_{in} = 1,1$; 2- $\sigma_{in} = 1,3$; 3- $\sigma_{in} = 1,4$; 4- $\sigma_{in} = 1,6$; 5- $\sigma_{in} = 1,8$

2.7 pav. parodyta, kaip keičiasi cikliškai nestabilių medžiagų – plieno 45 ir plieno 45 po EMA ciklinių įtempimų intensyvumas \bar{S}_{ik} , esant minkštam stacionariam apkrovimui priklausomai nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus bei koncentracijos koeficiento α_σ , kai 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,8 .Iš

2.7 pav. matyti, kad, esant pastoviams \bar{S}_{in} koncentracijos zonose \bar{S}_{ik} yra nestacionarūs. Cikliškai silpnėjančioms medžiagoms \bar{S}_{ik} mažėja.



2.8 pav. Ciklinių deformacijų intensyvumai $\bar{\varepsilon}_{ik}$ koncentracijos zonoje k apkrovimo pusciklyje tempimo atveju: 1- $\sigma_{in} = 1,1$; 2- $\sigma_{in} = 1,3$; 3- $\sigma_{in} = 1,4$; 4- $\sigma_{in} = 1,6$; 5- $\sigma_{in} = 1,8$.

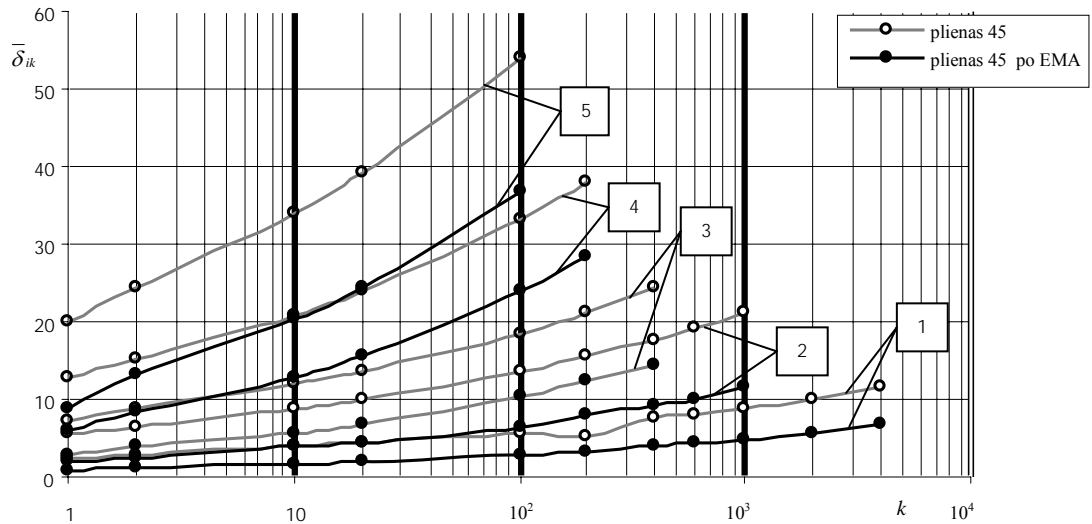
Pateiktame 2.8 paveiksle matyti, kaip kinta ciklinių deformacijų intensyvumas $\bar{\varepsilon}_{ik}$, esant minkštam stacionariam apkrovimui priklausomai nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus k bei koncentracijos koeficiento α_{σ} , kai $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,8$.

Ciklinis plastinių deformacijų intensyvumas (histerzės kilpos plotis) koncentracijos zonose buvo nustatomas iš lygybės:

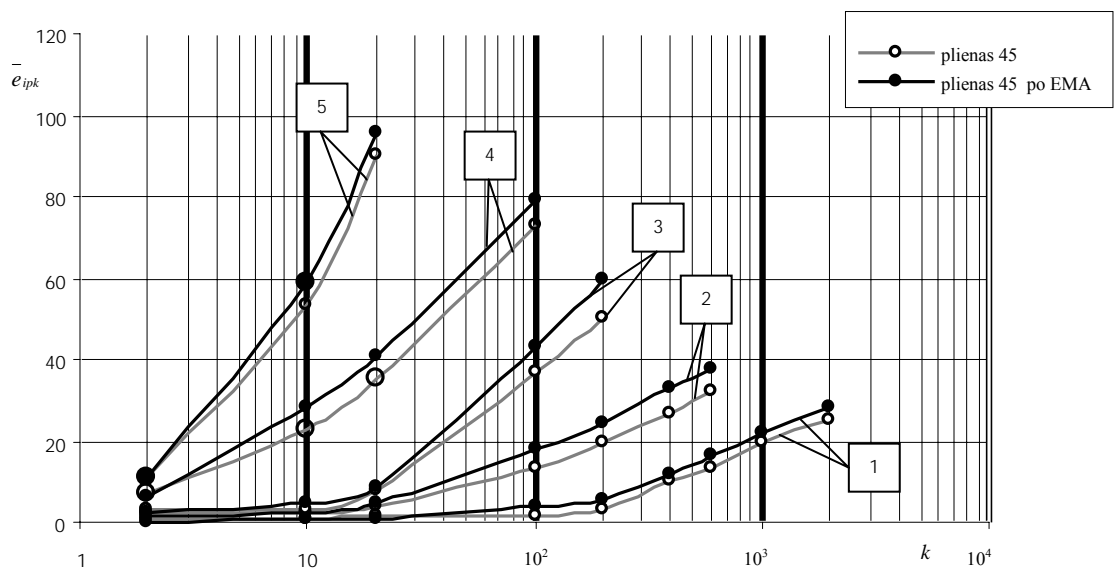
$$\bar{\delta}_{ik} = (\bar{\varepsilon}_{ik} - \bar{S}_{ik}) \bar{S}_T. \quad (2.32)$$

Gauti plastinių deformacijų intensyvumo skaičiavimo rezultatai koncentracijos zonose minkšto apkrovimo atveju pateikti 2.9 paveiksle.

Kaip matyti iš 2.4 ...2.8 paveikslų, cikliniai įtempimų koncentracijos koeficientai K_{sk} silpnėjančiai medžiagai mažėja, o deformacijų koncentracijos koeficientai K_{ek} didėja. Atitinkamai mažėja ir cikliniai sustiprėjimo koeficientai m_k . Ciklinių įtempimų intensyvumas \bar{S}_{ik} mažėja, o ciklinių deformacijų intensyvumas $\bar{\varepsilon}_{ik}$ didėja didėjant apkrovimo pusciklių skaičiui k .



2.9 pav. Ciklinis plastinių deformacijų $\bar{\delta}_{ik}$ intensyvumas koncentracijos zonose k apkrovimo pusciklyje tempiant: 1- $\sigma_{in}=1,1$; 2- $\sigma_{in}=1,3$; 3- $\sigma_{in}=1,4$; 4- $\sigma_{in}=1,6$; 5- $\sigma_{in}=1,8$



2.10 pav. Vienpusės plastinės deformacijos \bar{e}_{ipk} intensyvumo kaupimas koncentracijos zonoje esant tempimui: 1- $\sigma_{in}=1,1$; 2- $\sigma_{in}=1,3$; 3- $\sigma_{in}=1,4$; 4- $\sigma_{in}=1,6$; 5- $\sigma_{in}=1,8$

Pagal (2.32) lygybę apskaičiavus $\bar{\delta}_{ik}$ ir žinant įtempių ir deformacijų intensyvumus pradiniame apkrovimo pusciklyje $\bar{\sigma}_i$ ir \bar{e}_i , galima 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 [11].

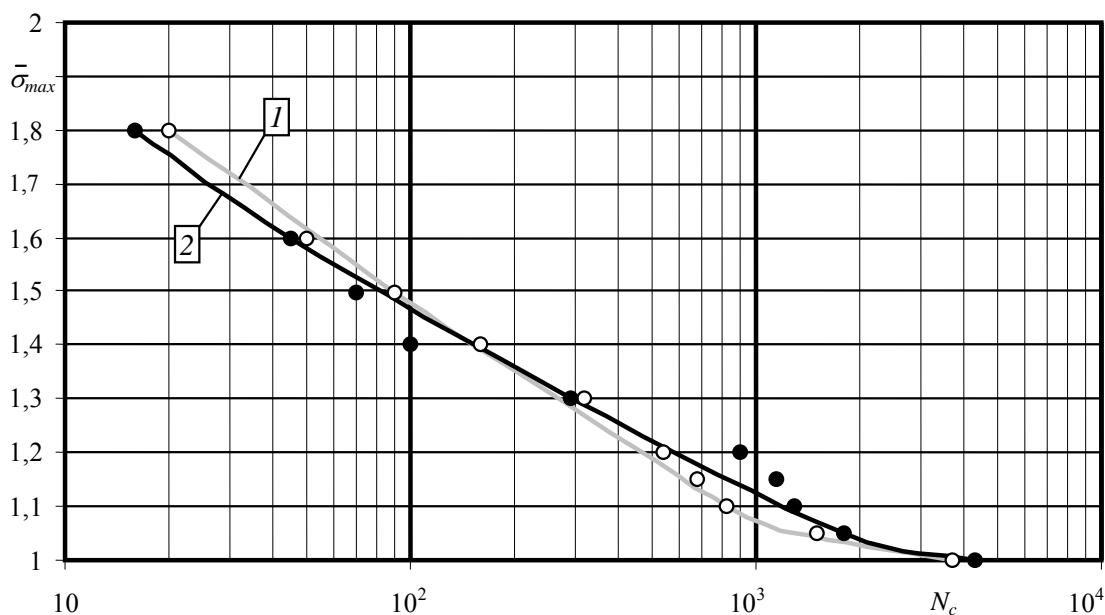
$$\bar{e}_{ipk} = \bar{e}_0 - \bar{\sigma}_0 + \sum_1^k (-1)^k \bar{\delta}_{ik} \quad (2.33)$$

Paskaičiuotas vienpusės plastinės deformacijos intensyvumas koncentracijos zonoje pateiktas 2.10 paveiksle.

Kaip rodo 2.10 pav., vienpusė plastinė deformacija yra kaupiama ir koncentracijos zonose.

2.3 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 2.11 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 įtempių lygiams, elektromechaniškai sukietinto plieno 45 ilgaamžiškumas didėja, lyginant su nesukietinto plieno ilgaamžiškumu. Šis nuovargio ilgaamžiškumo virsmas įvyksta esant $\bar{\sigma}_{\max} \approx 1,3$ įtempiams [5].



2.11 pav. Nesukietintų (1) ir sukietintų (2) bandinių su koncentratoriumi mažaciklio nuovargio eksperimentinės kreivės tempimo-gniuždymo atveju

2.4 Pažeidimų skaičiavimas koncentracijos zonos

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

Įtempių ir deformacijų būvio analizė parodė, kad koncentracijos zonos priklausomai nuo $\bar{\sigma}_{in}$, α_{σ} ir \bar{e}_{in} bei medžiagų statinių ir ciklinių charakteristikų gali būti kaupiami ne tik tai 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:

$$d_N = \sum_1^{k_c} \frac{\bar{\delta}_k \bar{\varepsilon}_k^m}{C_2 C_3^{m_3}} \quad (2.34)$$

o pažeidimai sukelti vienpusės sukaupos deformacijos intensyvumo:

$$d_K = \sum_1^{k_c} \frac{\bar{e}_{ipk}}{e_{u_2}}. \quad (2.35)$$

Per k pusciklių sukaupta vienpusė plastinė deformacija simetrinio minkšto atveju užrašoma taip [11]:

$$\bar{e}_{pk} = \bar{e}_o - \bar{\sigma}_o + \sum_1^k (-1)^k \bar{\delta}_k \quad (2.36)$$

Taigi, pasinaudoję (2.36), (2.32), (2.34), (2.35) lygybėmis, gausime:

$$d_N = \frac{\sum_1^{k_c} \frac{\bar{\delta}_{ik}}{D_e} \left(\frac{\bar{\delta}_{ik}}{D_e} + \bar{S}_{ik} S_T \right)^{m_3}}{C_2 C_3^{m_3}} \quad (2.37)$$

$$d_K = \frac{\bar{e}_o - \bar{\sigma}_o + \sum_1^k (-1)^k \bar{\delta}_{ik}}{e_u D_e} \quad (2.38)$$

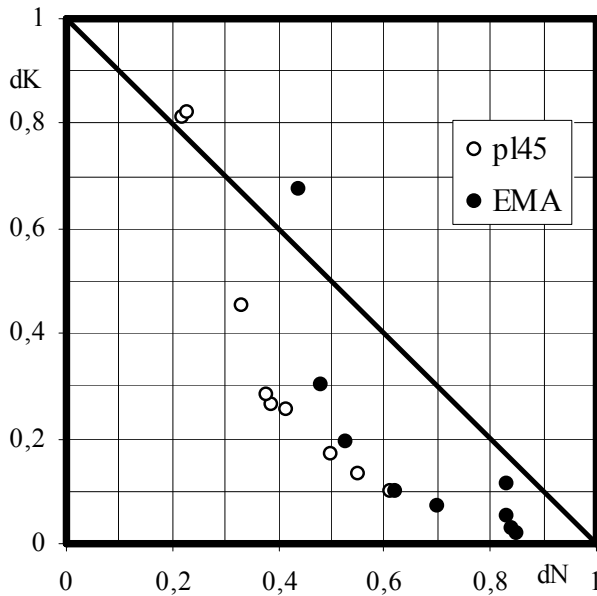
Čia $\bar{e}_i, \bar{\sigma}_i, \bar{S}_{ik}, \bar{\delta}_{ik}$, - parametrai, apskaičiuojami pagal (2.3), (2.4), (2.32) lygybes, ir m_3 - L. Kofino tipo lygčių parametrai esant tiesiniam įtempių būviui; e_u - tolydinė deformacija tempimo metu, t.y. deformacija iki bandinio kakliuko susidarymo pradžios; D_e - parametras, įvertinantis įtempių būvio įtaką ribiniam plastiškumui:

$$D_e = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)} \leq 1, \quad (2.39)$$

2.12 pav. parodytas ryšys tarp kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų, iš kurio matyti, kad lygtis $d_K^q + d_N^l = 1$ laipsnio rodikliai yra lygūs t.y. $q = l$. Suirimo (nuovargio plyšio susidarymo) sąlyga, laikant, kad $q = l$ koncentracijos zonoje, galima išsireikšti lygybe, gerai tenkinančia eksperimentų duomenis esant įtempių būviui

$$d_N^q + d_K^q = 1, \quad (2.40)$$

čia nuovargio d_N ir kvazistatiniai d_K pažeidimai nustatomi iš (2.37) ir (2.38) lygčių.



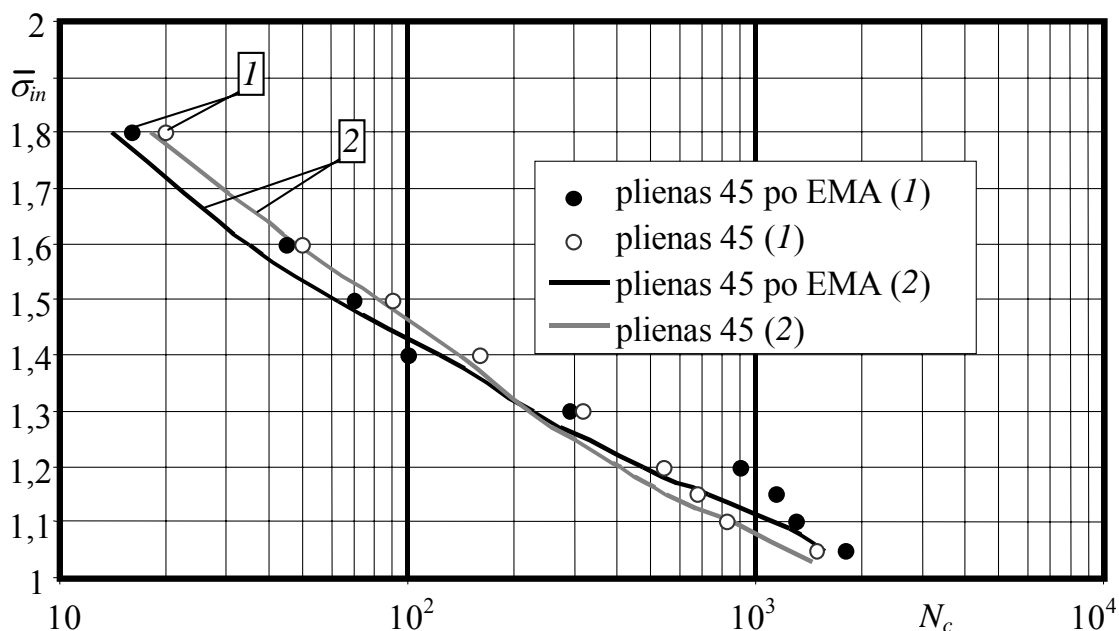
2.12 pav. Ryšys tarp kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų tempimo-gniuždymo metu.

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 nuovargio pažeidimų galima užrašyti taip: $d_N^{0,8} + d_K^{0,8} = 1$.

Pasinaudojus tiesiniu lyginamųjų ilgaamžiškumą sumavimu koncentracijos zonose, galima užrašyti [11]:

$$d_N = \frac{\sum_1^{k_c} \left(\frac{\bar{\delta}_{ik}}{D_e} \right)^{1/m_2}}{C_2^{1/m_2}} \quad (2.41)$$

Pagal 2.40 formulę pasiskaičiuotos plieno 45 ir plieno 45 po EMA mažaciklio simetrinio apkrovimo nuovargio analitinės kreivės koncentracijos zonose, esant minkštam apkrovimui, kai $q = l = 0,8$ parodytos 2.13 pav.



2.13 pav. Nesukietintų ir sukietintų tempiamų – gniuždomų bandinių su koncentratoriumi eksperimento rezultatai (1) ir analitinės (2) nuovargio kreivės

Iš 2.13 pav. matyti, kad, pagal mūsų pasiūlymą kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų sumavimo metodą apskaičiuotas ilgaamžiškumas tempimo-gniuždymo 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 nuo 0,07% iki 28,84%, pagal H. Neuberį – nuo 0,27% iki 32,67% ir pagal G. Glinką – nuo 0,14% iki 2437,29%. 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 tempimui-gniuždymui.
4. Kaip eksperimentinio, taip ir atlikto analitinio ilgaamžiškumo įvertinimas įtempių koncentracijos zonose esant tempimui-gniuždymui parodė, kad ciklinio tempimo-gniuždymo atveju paviršiaus sukietinimo įtaka pasireiškia, kai $\bar{\sigma}_{\max} \leq 1,3$. T.y. sukietinto plieno bandiniai buvo vidutiniškai 1,2 karto ilgaamžiškesni, nei nesukietinto plieno. Kai tuo tarpu esant $\bar{\sigma}_{\max} \leq 1,3$, jau bandiniai iš nesukietinto plieno yra 1,2 karto ilgaamžiškesni už sukietintus bandinius.

LITERATŪRA

1. Jutas A. Elektromechaninio apdirbimo įtaka perlitinės klasės plieno mažacikliam patvarumui: daktaro disertacijos santrauka. Kaunas: Technologija, 2000.
2. Jonušas R., Kalpokas J., Lazaravičius P., Jankauskas V. Koncentruotos energijos metodu taikymas apdirbant medžiagas. - Kaunas: Technologija, 2004. -272 p.
3. Narvydas E. Įtempimų ir deformacijų būvis bei pažeidimai koncentracijos zonose esant mažacikliam apkrovimui: daktaro disertacijos santrauka. Kaunas: Technologija, 2000.
4. Katkevičius R., Jonušas R. Detalių eksploatacinių savybių gerinimo koncentruotos energijos metodais analizė. Tarpt. Konf. „Mechanika 2003“ pranešimų medžiaga, Kaunas: Technologija, 2003, p. 2002-2006.
5. Sabaliauskas A. Paviršiaus elektromechaninio apdirbimo poveikis plieno 45 konstrukcinių elementų mažacikliam patvarumui įtempių koncentracijos zonose: daktaro disertacija. Kaunas, 2007.
6. Jutas A., Daunys M. Elektromechaninio paviršinio sukietinimo įtaka plieno 45 mažacikliam patvarumui. Tarpt. Konf. „Mechanika 2000“ pranešimų medžiaga, Kaunas: Technologija, 2000, p. 438-439.
7. Jutas A., Daunys M. Elektromechaninio apdirbimo (EMA) įtaka plieno 45 mažaciklio deformavimo ciklinėms charakteristikoms ir ilgaamžiškumui. Mechanika, Kaunas: Technologija, 2000, No. 5 (25), p. 5-9
8. Daunys M., Markauskas S., Staponkus V. Investigation of Surface Quality for Small Diameter Elements after Elektromechanical Treatment. Mechanika, Kaunas: Technologija, No. 1 (45) p. 63-68.
9. Staponkus V., Daunys M., Markauskas S. Influence of Elektromechanical Treatment Regimes in Strength and Durability of Elements .III Sympozjum Mechaniki Zniszczenia materialow i Konstrukcii, Augustow, Politechnika Bialostoka, 2005, p. 393-396/
10. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. Москва: Мирб 1977, p. 302
11. Daunys M. Ciklinis konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas, Kaunas: Technologija, 2005, p. 288.
12. Rimovskis S., Daunys M. Analysis of low cycle strength and durability of steel 45 at pure bending. Mechanika. Kaunas: Technologija, 2002, No.5(37), p. 5-9.
13. Kačianauskas R., Stupak E., Stupak S. Application of adaptive finite elements for solving elastic-plastic problem of SENB specimen. Mechanika. 2005 No. 1 (51), p.18-22/
14. Stojadinovic B. Stability and low-cycle fatigue limits of moment connection rotation capacity. Engineering Structures 25, 2003, p. 691-700.

15. Bathe K. J., Wiener P. M. On elastic-plastic analysis of I-beams in bending and torsion. *Computers and Structures*, 17, No. 5-6, 1984, p. 711-718.
16. Stupak E., Kačianauskas R. Adaptyvių baigtinių elementų tinklų taikymas įtempių būviui nustatyti ties koncentratoriais. *Mechanika*, Kaunas: Technologija, 2000, No. 4 (24), p. 31-36.
17. Tradegard A. Nilsson F. Ostlund S. FEM-remeshing technique applied to crack growth problems. *Computer methods in Applied Mechanics and Eng.*, 1998, v. 160, p. 115-131.
18. Bouchard P. O., Bay F., Chastel Y. Numerical modeling of crack propagation: automatic remeshing and comparison of different criteria. *Computer methods in Applied Mechanics and Eng.*, 2003, v. 192, p. 3887-3908
19. Lee H.-J., Song J.-H. Finite-element analysis of fatigue crack closure under plane strain conditions: stabilization behaviour and mesh size effect. *Fatigue & Fracture of Engineering materials and Structures*. Volume 28, 2005, p. 333-342.
20. Багмутов В. П., Кузнецов Н. В. Конечноэлементная модель образца с надрезом и боковыми канавками. *Инновационные технологии в обучении и производстве. Материалы III Всероссийской конференции, Камышин 2005*, p. 54-58.
21. Moaveni S. *Finite element analysis: theory and application with ANSYS*. Pearson Education Inc., New Jersey, 2003, p. 822.
22. 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
23. Carpinteri A., Brighnti R., Vantadori S. Surface cracks in notched round bars under cyclic tensio and bending. *Experimental investigations on notched specimens. International Journal of fatigue*, Volume 28, 2006, p. 251-260.
24. 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, №4, p. 544 – 550.
25. Stowell I. G. The Circulation of the Fatigue Life in the Presence of Stress Concentrations. – *Nuclear Engineering and Design*, 1968, v.8, №3, p. 313–316.
26. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкции на прочность. – Москва: Машино-строение, 1981. – 272 с.
27. Molsky H., Glinka G. A. Method of Stress and Strain Calculations at a Notch Root. – *Materials Science and Engineering*, 1981, № 50.