

# PLIENO 45 PAVIRŠIAUS ELEKTROMECHANINIO SUKIETINIMO ĮTAKA MAŽACIKLIAM TEMPIMUI-GNIUŽDYMUI, ESANT ĮTEMPIŲ KONCENTRATORIUI

Aleksej Charčenko, Artūras Sabaliauskas, Sergėjus Rimovskis

Šiaulių universitetas, Technologijos fakultetas

## Įvadas

Racionalus medžiagų ir technologijų parinkimas siejamas su detalių ilgaamžiškumu. Detalių paviršinis sluoksnis, jo formavimas, gerinant visos detalės mechanines charakteristikas – tai viena iš perspektyvių ir sparčiai besivystančių tyrimo sričių. Pagrindinis tikslas, apdorojant detalių paviršius, yra apdorojimo technologiškumas ir eksploatacinių savybių gerinimas, todėl šiuolaikinių technologijų tyrimas bei taikymas yra svarbus ne tik mokslinė prasmė, bet ir ekonomiškai pagrįstas. Dažnai detalių eksploatacinės ir stipruminės savybės priklauso nuo sąlygų, kuriomis jos eksploatuojamos, t. y. statinės ar ciklinės apkrovos, jos nevienalytiškumo, dilimo ar temperatūros gradientų ir kt.

Platus paviršinių sluoksnį stiprinančių būdų naudojimas skatina ir intensyvų 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 veikiantys 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 dėsningumus, 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.

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

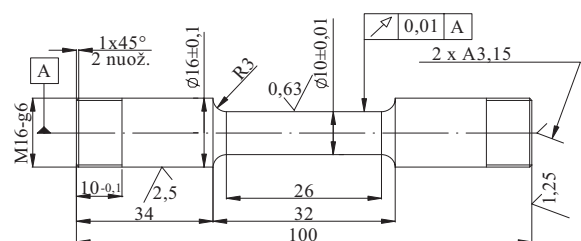
**Darbo tikslas** – nustatyti elektromechaniškai sukietinto plieno 45 apvalaus skerspjūvio bandinių mažaciklio nuovargio charakteristikas, esant tempimui-gniuždymui ir įtempimų koncentracijai.

## Tyrimo metodai ir įranga

Elektromechaninis apdirbimas (EMA) – metalinių detalių paviršiaus apdirbimo būdas, pagrįstas vietiniu jėgos bei šilumos poveikiu įrankio ir detalės kontakto zonoje. Įrankio ir detalės sandūroje teka mažos įtampos ir didelio stiprumo elektros srovė. Kontakto vietoje išsiskiria žymus šiluminės energijos kiekis, kuris greitai įkaitina detalės paviršius iki aukštos (daugiau kaip 911°C) temperatūros, užtikrinančios sąlygas austenitiniam virsmui. Detalės įkaitinto sluoksnio tūris, palyginus 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. EMA sukietinto paviršiaus atsparumas dilimui padidėja 1,6–2,6 karto [1, 2].

Detalėms apdirbti dažniausiai naudojamos tekinimo staklės (atsižvelgiant į paviršiaus formos pobūdį, gali būti naudojamos ir kito tipo staklės). Sukietintam paviršiui gauti eksperimento metu naudota KTU esanti EMA įranga, pritaikyta tekinimo staklėms. Principinė įrenginio schema ir apdirbimo metu taikyti režimai pateikti [3, 4] literatūroje. Naudojant EMA, vienu metu vyksta du procesai: paviršinio sluoksnio kietinimas ir paviršiaus nelygumų lyginimas.

**Bandiniai.** Bandymui atlikti buvo pagaminti laiptuoti bandiniai su koncentratoriumi. Atsižvelgiant į EMA technines galimybes, įtempimų koncentratoriams, buvo parinkta 3 mm spinduliu suapvalinta dalis bandinio skersmenų pasikeitimo vietoje. Teorinis koncentracijos koeficientas tempiant  $K_t = 1,46$  [5]. Sukietintų ir nesukietintų bandinių matmenys ir formos buvo identiški. Bandinio darbo brėžinys pateiktas 1 paveiksle.



1 pav. Mažaciklio tempimo-gniuždymo bandinys

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 pasirinktas anglinis konstrukcinis plienas 45. Bandinys pagamintas iš 16 mm skersmens apvalaus valcuoto strypo.

*Baigtinių elementų metodas (BEM).* Įtempių ir deformacijos dėsningumams nustatyti taikyta matematinio modeliavimo baigtinių elementų programa ANSYS. Buvo sukurti erdviniai BE moduliai, kurie savo matmenimis atitiktų 1 paveiksle pavaizduotus eksperimentinius bandinius. Taikant 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 [3, 6] literatūroje pateiktus analitinio skaičiavimo duomenis. Pagal tuos pačius skaičiavimus buvo parinktas ir sukietinto „baltojo“ sluoksnio storis, lygus  $50 \mu\text{m}$ . Modeliuojamų sluoksnių mechaninės charakteristikos pateiktos 1 lentelėje.

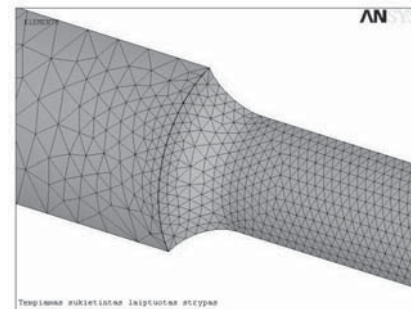
1 lentelė. *Skaitinio modelio medžiagų mechaninės charakteristikos*

$\sigma_p$ , MPa	$R_m$ , MPa	$\sigma_f$ , MPa	$e_p$ , %	$e_u$ , %	Z, %
<b>Plienas 45 (šerdis)</b>					
375	786	882,5	0,22	29	30
<b>Išorinis „baltasis“ sluoksnis</b>					
709	2033	2033	0,355	4,4	4

Tempimo atvejui 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 tinklelis sutankintas numatomose įtempių koncentracijos zonose. Šių modelių suskaidymas baigtiniais elementais parodytas 2 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  $\bar{\sigma}_m$  neto

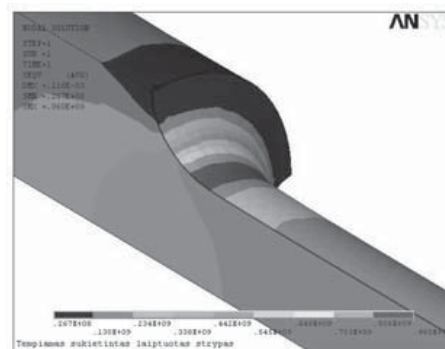
skerspjūvyje būtų 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8 plieno 45 proporcingumo ribos. Skaičiavimas buvo atliekamas modeliui su sukietintu sluoksniu ir be jo.



2 pav. Tempimo strypo su koncentratoriumi BE modelio tinklelis

Skaičiuojant modelius, buvo varijuojama elementų skaičiumi ir dydžiu ties koncentratoriumi, analizuojami skaičiavimų rezultatai. Nustačius nežymius rezultatų pokyčius, teigta, 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 nesukietintose vietose –  $50h$ .

Kaip pasiskirsto įtempiai koncentracijos zonoje, parodyta 3 pav.



3 pav. Įtempių pasiskirstymas koncentracijos zonoje

### Tempimo-gniuždymo eksperimentų ir analitinių skaičiavimų rezultatai

Mašinų detalėse ir konstrukciniuose elementuose, veikiant apkrovai, įtempių ir deformacijų laukai dažnai pasiskirsto netolygiai – susidaro įtempių koncentracijos zonos. Įtempių koncentraciją sukelia konstrukciniai faktoriai (staigus geometrinės formos pasikeitimas – kiaurymės, įpjovos, grioveliai ir pan.); išoriniai poveikiai (kontakcinės jėgos, staigus temperatūros pokytis); technologiniai defektai (intarpai, tuštumos ir plyšiai, atsiradę gaminant detalę po

liejimo, suvirinimo, terminio apdirbimo ir pan.).

Įtempių 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 ją lemia funkcinė paskirtis ir gamybos technologija.

Detalių su įtempių koncentratoriais stiprumas ir ilgaamžiškumas priklauso nuo medžiagos mechaninių savybių ir eksploatacinės apkrovos pobūdžio. Kai apkrova kintanti ir koncentracijos zonose įtempiai viršija proporcingumo ribą, susidaro mažaciklio apkrovimo sąlygos. Šiuo atveju įtempių koncentracija nulemia detalės ilgaamžiškumą.

Įtempių ir deformacijų koncentracijos zonose nustatymo bei jų įtakos detalių ir konstrukcijų elementų stiprumui ir ilgaamžiškumui įvertinimo, esant mažaciklei apkrovai, problema egzistuoja nuo seno. Taupant medžiagas, mažinant konstrukcijų svorį, didinamos projektinės kintančios apkrovos ir didėja tikimybė, kad įtempių koncentracijos zonose bus viršijama medžiagos atsparumo riba, todėl įtempių ir deformacijų koncentracijos zonose nustatymo problema yra aktuali.

### Atsparumas mažacikliam deformavimui koncentracijos zonose

Esant mažaciklei apkrovai koncentracijos zonoje galima užrašyti:

$$\bar{S}_{ik} = \bar{S}_{ink} \cdot K_{Sk}, \quad (1)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ik} = \bar{\varepsilon}_{ink} \cdot K_{ek}, \quad (2)$$

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  $K_{ek}$  – 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  $K_{ek}$  vartojamos anksčiau minėtos lygybės, jos statinius įtempimus  $\sigma$  pakeičiant į ciklinius  $\bar{S}_k$ , statines deformacijas  $\bar{\varepsilon}$  – į ciklines  $\bar{\varepsilon}_k$ , stiprėjimo koeficientą  $m_0$  – į ciklinį  $m_k$  [7]. Cikliškai nestabilių medžiagų kiekvieno deformavimo pusciklio diagramos skirsis, todėl ir  $K_{Sk}$  bei  $K_{ek}$  bus nevienodi, nes skirtingi bus laipsninės aproksimacijos koeficientai  $m_k$ . Šių dydžių analitiškai paskaičiuoti

rezultatai pateikti 4–8 paveiksluose.

Laipsninės aproksimacijos laipsnio rodiklis nustatomas taikant lygybę:

$$\bar{S}_{ik} = \bar{\varepsilon}_{ik}^{m_k}, \quad (3)$$

$$\text{tada } m_k = \frac{\lg \bar{S}_{ik}}{\lg \bar{\varepsilon}_{ik}}. \quad (4)$$

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

$$m_k = \frac{\lg \bar{S}_{ik}}{\lg \left[ \frac{A_{1,2}}{S_T} \left( \bar{\varepsilon}_0 - \frac{\bar{S}_T}{2} \right) F(k) + \bar{S}_{ik} \right]}, \quad (5)$$

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

Atliekant  $K_{Sk}$  ir  $K_{ek}$  skaičiavimus, vartoti BEM nustatyti teoriniai įtempių koncentracijos koeficientai, esant tampriam deformavimui, bei N. Machutov [8] lygybės:

$$K_{\sigma} = \frac{\alpha_{\sigma}^{\frac{2m_0}{1+m_0}} \bar{\sigma}_{in}^{\frac{m_0-1}{1+m_0}}}{\left( \alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_{in} \right)^{\frac{1-m_0}{1+m_0} [1 - (\bar{\sigma}_{in}^{-1} / \alpha_{\sigma})^{m_0}]}} , \quad (6)$$

ir

$$K_{\varepsilon} = \frac{\alpha_{\sigma}^{\frac{2}{1+m_0}} \bar{\sigma}_{in}^{\frac{1-m_0}{1+m_0}}}{\left( \alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_{in} \right)^{\frac{1-m_0}{1+m_0} [1 - (\bar{\sigma}_{in}^{-1} / \alpha_{\sigma})^{m_0}]}} , \quad (7)$$

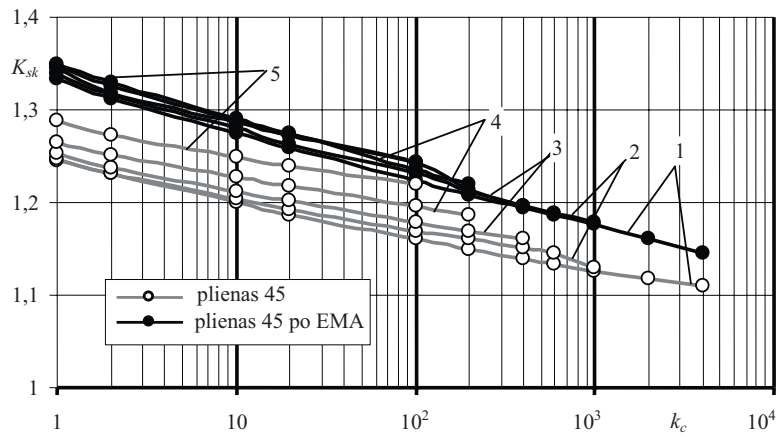
kai  $\bar{\sigma}_{in} \leq 1$ , ir

$$K_{\sigma} = \frac{\alpha_{\sigma}^{\frac{2m_0}{1+m_0}}}{\left( \alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_{in} \right)^{\frac{1-m_0}{1+m_0} [1 - (\bar{\sigma}_{in}^{-1} / \alpha_{\sigma})^{m_0}]}} , \quad (8)$$

$$K_{\varepsilon} = \frac{\alpha_{\sigma}^{\frac{2}{1+m_0}}}{\left( \alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_{in} \right)^{\frac{1-m_0}{1+m_0} [1 - (\bar{\sigma}_{in}^{-1} / \alpha_{\sigma})^{m_0}]}} , \quad (9)$$

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

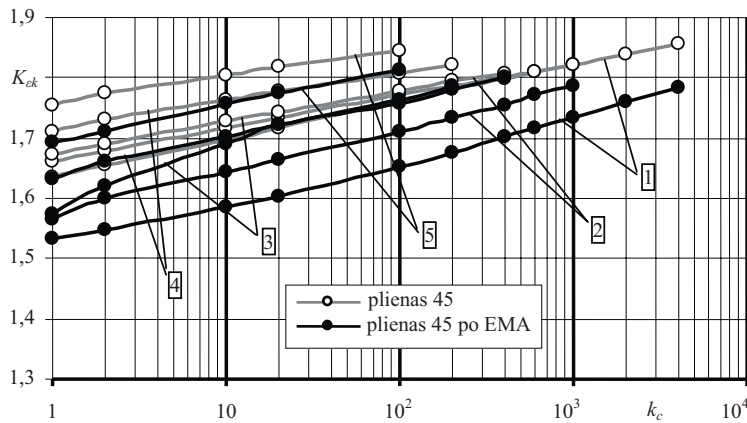
4 pav. parodyta, kaip keičiasi cikliškai silpnėjančių medžiagų – plieno 45 ir plieno 45 po EMA ciklinių įtempimų koncentracijos koeficientai  $K_{Sk}$ , esant minkštam stacionariam apkrovimui, priklausomai nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus bei koncentracijos koeficiento  $\alpha_{\sigma}$ , kai  $\bar{\sigma}_{in} = 1, 1, 1, 3; 1, 4; 1, 6; 1, 8$ . Matyti, kad, esant pastoviams  $\bar{S}_m$ , koncentracijos zonose  $K_{Sk}$  yra nestacionarūs – jie mažėja.



4 pav. Ciklinių įtempių  $K_{sk}$  koncentracijos koeficientai  $k_c$  pusciklyje:  
 1 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,1$ ; 2 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,3$ ; 3 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,4$ ; 4 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,6$ ; 5 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,8$

Kaip matyti iš 5 pav., ciklinių deformacijų koncentracijų koeficientai  $K_{sk}$ , esant minkštam stacionariam apkrovimui, cikliška silpnėjančioms medžia-

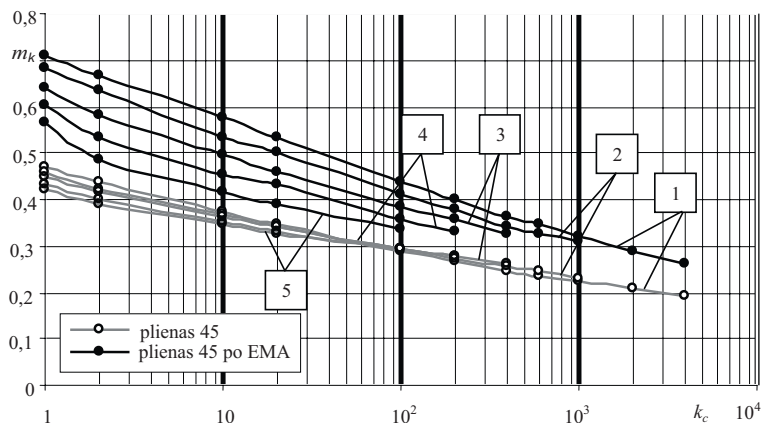
goms yra nestacionarūs ir didėja priklausomai nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus bei koncentracijos koeficiento  $\alpha_\sigma$ , kai  $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,8$ .



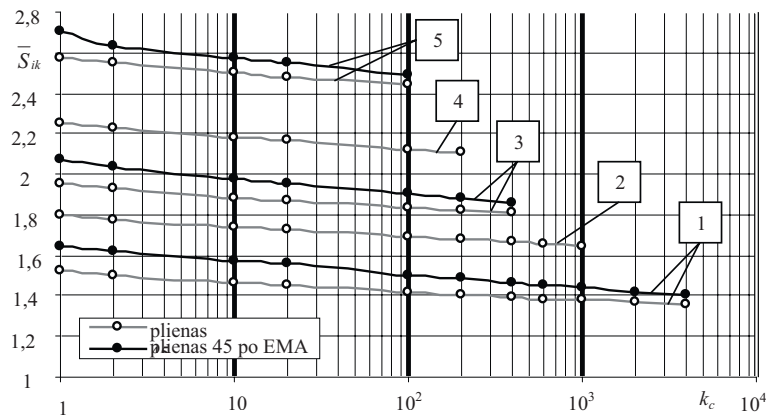
5 pav. Ciklinių deformacijų  $K_{ek}$  koncentracijos koeficientai  $k_c$  pusciklyje:  
 1 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,1$ ; 2 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,3$ ; 3 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,4$ ; 4 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,6$ ; 5 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,8$

6 pav. parodytas ciklinis stiprėjimo koeficientų  $m_k$  kitimas, esant minkštam stacionariam apkrovimui priklausomai nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus bei koncentracijos koeficiento  $\alpha_\sigma$ , kai  $\bar{\sigma}_{in} =$

1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,8. Iš šių paveikslų matyti, kad, esant pastoviams  $\bar{\sigma}_{in}$ , koncentracijos zonose  $m_k$  yra nestacionarūs – mažėja, nes tirama medžiaga silpnėja.



6 pav. Cikliniai stiprėjimo koeficientai  $m_k$   $k_c$  pusciklyje:  
 1 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,1$ ; 2 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,3$ ; 3 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,4$ ; 4 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,6$ ; 5 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,8$



**7 pav.** Ciklinių įtempių intensyvumo  $\bar{S}_{ik}$  priklausomybė nuo  $k_c$ :  
 1 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,1$ ; 2 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,3$ ; 3 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,4$ ; 4 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,6$ ; 5 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,8$

7 pav. parodyta, kaip keičiasi cikliškai nestabilių medžiagų – plieno 45 ir plieno 45 po EMA ciklinių įtempių intensyvumas  $\bar{S}_{ik}$ , esant minkštam stacionariam apkrovimui priklausomai nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus bei koncentracijos koeficiento  $\alpha_\sigma$ , kai  $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,8$ . Matyti, kad, esant pastoviems  $\bar{S}_{in}$  koncentracijos zonoje,  $\bar{S}_{ik}$  yra nestacionarūs. Cikliškai silpnėjančioms medžiagoms  $\bar{S}_{ik}$  mažėja.

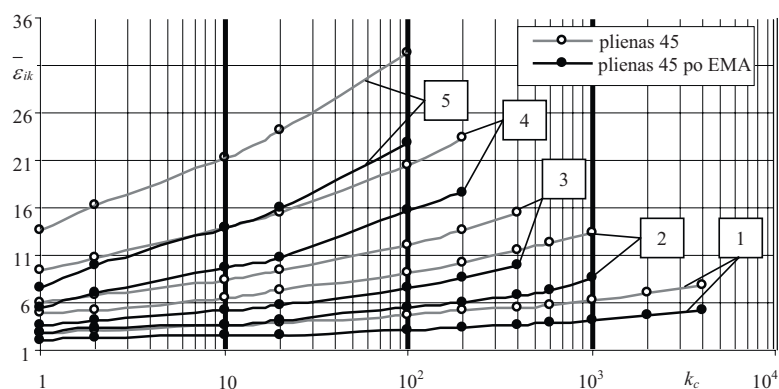
8 paveiksle matyti, kaip kinta ciklinių deformacijų intensyvumas  $\bar{\epsilon}_{ik}$ , esant minkštai stacionariai apkrovai priklausomai nuo apkrovos pusciklių skaičiaus  $k_c$  bei koncentracijos koeficiento  $\alpha_\sigma$ , kai  $\bar{\sigma}_{in} = 1,1; 1,3; 1,4; 1,6; 1,8$ .

Ciklinis plastinių deformacijų intensyvumas koncentracijos zonoje buvo nustatomas iš lygties:

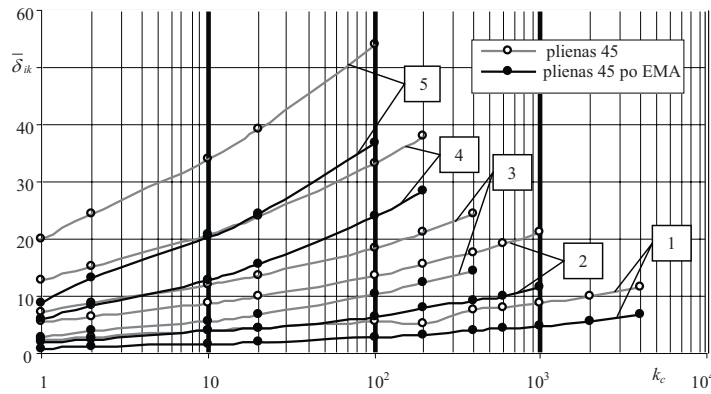
$$\bar{\delta}_{ik} = (\bar{\epsilon}_{ik} - \bar{S}_{ik}) \bar{S}_T. \quad (10)$$

Plastinių deformacijų skaičiavimo rezultatai koncentracijos zonoje minkšto apkrovimo atveju pateikti 9 paveiksle.

Pagal (10) lygybę apskaičiavus  $\bar{\delta}_{ik}$  ir žinant įtempių ir deformacijų intensyvumus pradiniam apkrovimo pusciklyje  $\bar{\sigma}_i$  ir  $\bar{\epsilon}_{in}$ , galima nustatyti vienpusį sukauptos deformacijos intensyvumą  $\bar{\epsilon}_{ipk}$  koncentracijos zonoje priklausomai nuo  $\bar{\sigma}_{in}$ ,  $\alpha_\sigma$  ir  $k_c$ , esant minkštam stacionariam nominaliajam apkrovimui. Cikliškai anizotropiniai plienai 45 ir plienas 45 po EMA, kaupiantys  $\bar{\epsilon}_{ipk}$ , esant tiesiam įtempių būviui, kaupia šią deformaciją ir koncentracijos zonoje [7].



**8 pav.** Ciklinių deformacijų intensyvumai  $\bar{\epsilon}_{ik}$  koncentracijos zonoje  $k_c$  apkrovimo pusciklyje:  
 1 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,1$ ; 2 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,3$ ; 3 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,4$ ; 4 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,6$ ; 5 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,8$



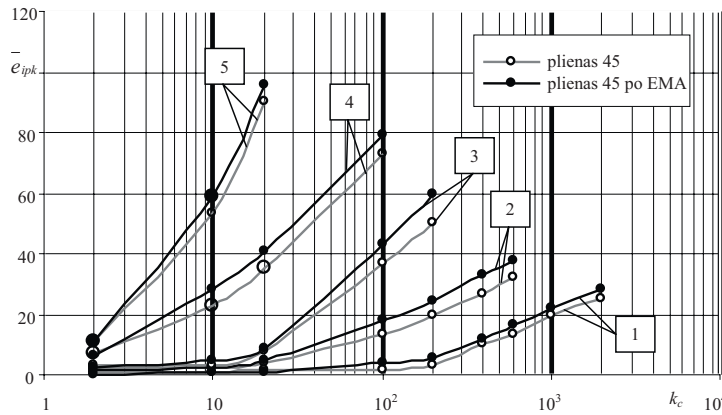
9 pav. Ciklinis plastinių deformacijų  $\bar{\delta}_{ik}$  intensyvumas koncentracijos zonosė  $k_c$  apkrovimo pusciklyje:  
 1 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,1$ ; 2 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,3$ ; 3 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,4$ ; 4 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,6$ ; 5 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,8$

$$\bar{e}_{ipk} = \bar{e}_0 - \bar{\sigma}_0 + \sum_1^k (-1)^k \bar{\delta}_{ik} \quad (11)$$

Paskaičiuotas vienpusės plastinės deformaci-

jos intensyvumas koncentracijos zonoje pateiktas 10 paveiksle.

Kaip rodo 10 pav., vienpusė plastinė deformacija yra kaupiama ir koncentracijos zonosė.



10 pav. Vienpusės plastinės deformacijos  $\bar{e}_{ipk}$  intensyvumo kaupimas koncentracijos zonoje:  
 1 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,1$ ; 2 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,3$ ; 3 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,4$ ; 4 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,6$ ; 5 –  $\bar{\sigma}_{in} = 1,8$

### Pažeidimų skaičiavimas koncentracijos zonosė

Įtempių ir deformacijų būvio analizė parodė, kad koncentracijos zonosė priklausomai nuo  $\bar{\sigma}_{in}$ ,  $\alpha_\sigma$  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:

$$d_N = \sum_1^{k_c} \frac{\bar{\delta}_k \bar{\epsilon}_k^m}{C_2 C_3^{m_3}}, \quad (12)$$

o pažeidimai, sukelti vienpusės sukauptos deformacijos intensyvumo, –

$$d_K = \sum_1^{k_c} \frac{\bar{e}_{ipk}}{\bar{e}_{u2}}. \quad (13)$$

Per  $k$  pusciklių sukauptą vienpusė plastinė deformacija simetrinio minkšto atveju užrašoma taip [7]:

$$\bar{e}_{pk} = \bar{e}_0 - \bar{\sigma}_0 + \sum_1^k (-1)^k \bar{\delta}_k. \quad (14)$$

Taigi, pasinaudoję (12) – (14) lygybėmis, gausime:

$$d_N = \frac{\sum_1^{k_c} \frac{\bar{\delta}_{ik}}{D_e} \left( \frac{\bar{\delta}_{ik}}{D_e} + \bar{S}_{ik} S_T \right)^{m_3}}{C_2 C_3^{m_3}}, \quad (15)$$

$$d_K = \frac{\bar{e}_0 - \bar{\sigma}_0 + \sum_1^k (-1)^k \bar{\delta}_{ik}}{\bar{e}_u D_e}. \quad (16)$$

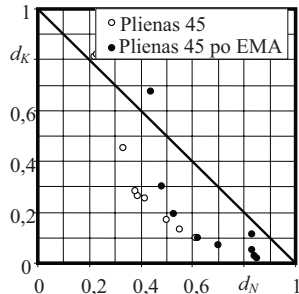
Čia:  $\bar{e}_i$ ,  $\bar{\sigma}_i$ ,  $\bar{S}_{ik}$ ,  $\bar{\delta}_{ik}$  – parametrai, apskaičiuojami pagal (1) – (3), (10) lygybes,  $C_2$ ,  $C_3$  ir  $m_3$  – L. Kofino tipo lygybių parametrai, esant tiesiniam įtempių būviui;  $\bar{e}_u$  – tolydinė deformacija tempimo metu, t. y. deformacija iki bandinio kakliuko susidarymo pradžios;  $D_e$  – parametras, įvertinantis įtempių būvio įtaką ribiniam plastiškumui:

$$D_e = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)_2}}{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)} \leq 1. \quad (17)$$

Suirimo (nuovargio plyšio susidarymo) sąlygą, laikant, kad  $q = l$  koncentracijos zonoje, galima išreikšti lygybe, gerai tenkinančia eksperimentų duomenis, esant įtempimų būviui

$$d_N^q + d_K^q = 1, \quad (18)$$

čia nuovargio  $d_N$  ir kvastatiniai  $d_K$  pažeidimai nustatomi iš (15) ir (16) lygybių.



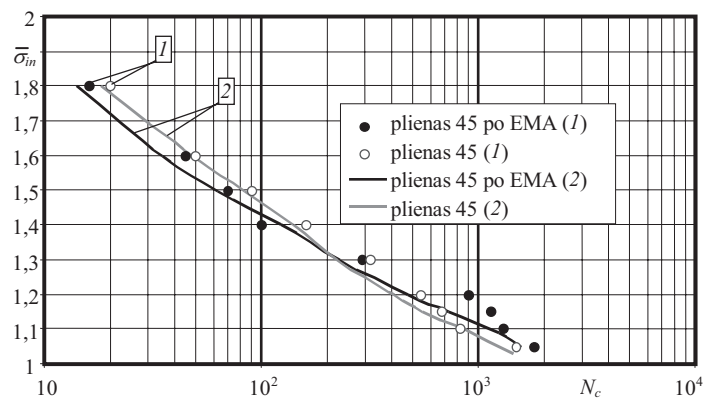
11 pav. Ryšys tarp kvazistatinių ir nuovarginių pažeidimų tempimo-gniuždymo metu

Skaičiavimui supaprastinti dažnai pasirenkama, kad  $q = l = 1$ . Tačiau, atlikus analitinius skaičiavimus, buvo nustatyta, kad  $q = l = 0,8$  [9]. Tada ryšį tarp kvazistatinių ir nuovarginių pažeidimų galima užrašyti taip:  $d_N^{0,8} + d_K^{0,8} = 1$ .

Pasinaudoję tiesiniu lyginamųjų ilgaamžiškumų sumavimu koncentracijos zonose, užrašome [7]:

$$d_N = \frac{\sum_1^{k_c} \left( \frac{\bar{\delta}_k}{D_e} \right)^{1/m_2}}{C_2^{1/m_2}}. \quad (19)$$

Pagal (19) paskaičiuotos plieno 45 ir plieno 45 po EMA mažaciklio simetrinio apkrovimo nuovargio analitinės kreivės koncentracijos zonose, esant minkštam apkrovimui, kai  $q = l = 0,8$ , parodytos 12 pav.



12 pav. Nesukietintų ir sukietintų tempimų-gniuždomų bandinių su koncentratoriumi eksperimento rezultatai (1) ir analitinės (2) nuovargio kreivės

Iš 12 pav. matyti, kad siūlomu kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų sumavimo metodu apskaičiuotas ilgaamžiškumas tempimo-gniuždymo atveju yra artimas eksperimentiniam.

### Išvados

1. Eksperimentinis ilgaamžiškumo įvertinimas įtempimų koncentracijos zonose esant tempimo-gniuždymui parodė, kad paviršiaus sukietinimo įtaka pasireiškia, kai  $\bar{\sigma}_{\max} \leq 1,3$ .
2. Sukietinto plieno bandiniai vidutiniškai 1,2 karto ilgaamžiškesni nei nesukietinto plieno.
3. Esant  $\bar{\sigma}_{\max} \leq 1,3$ , bandiniai iš nesukietinto plieno yra 1,2 karto ilgaamžiškesni už sukietintus bandinius.
4. Taikant kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų sumavimą, apskaičiuotas ilgaamžiškumas tempimo-gniuždymo atveju artimas eksperimentiniam.

### Literatūra

1. Jutas A., Daunys M., 2000, Elektromechaninio apdirbimo (EMA) įtaka plieno 45 mažaciklio deformavimo ciklinėms charakteristikoms ir ilgaamžiškumui. *Mechanika*. Nr. 5 (25). P. 5–10.
2. Katkevičius R., Jonušas R., 2003, Detalių eksploatacinių savybių gerinimo koncentruotos energijos metodais analizė. *Tarpt. konf. „Mechanika 2003“ pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija. P. 2002–2006.
3. Jutas A., Daunys M., 2000, Elektromechaninio paviršinio sukietinimo įtaka plieno 45 mažacikliam patvarumui. *Tarpt. konf. „Mechanika 2000“ pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija. P. 438–439.
4. Daunys M., Sabaliauskas A., 2005, Influence of surface hardening on low cycle tension compression and bending characteristics. *Mechanika*. Nr. 3 (53). P. 12–16.
5. Pilkey W. D., 1997, *Peterson's stress concentration factors. Second edition*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

6. Daunys M., Sabaliauskas A., 2007, Influence of surface hardening on low cycle tension compression and bending characteristics in stress concentration zones. *Mechanika*. Nr.1 (63). P. 11–20.
7. Daunys M., 2005, *Ciklinis konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas*. Kaunas: Technologija.
8. Махутов Н. А., 1981, *Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкции на прочность*. Москва: Машино-строение.
9. Charčenko A., Sabaliauskas A., Rimovskis S., 2008, Elektromechanikai sukietinto paviršiaus įtaka plieno 45 mažacikliam nuovargiui. *Jaunųjų mokslininkų darbai*. Nr. 5 (21). P. 11–15.

## INFLUENCE OF ELECTROMECHANICAL HARDENING OF SURFACE OF GRADE 45 STEEL ON LOW-CYCLE TENSION-COMPRESSION WITH PRESENCE OF STRESS CONCENTRATOR

*Aleksej Charčenko, Artūras Sabaliauskas, Sergėjus Rimovskis*

### Summary

This paper provides experimental and analytical evaluation of durability of non-hardened and hardened by EMT specimens of grade 45 steel with stress concentrators under low-cycle tension-compression. For these types of loading modes durability analysis was carried out taking into account fatigue and quasi-static damage depending on loading level and number of semicycles. It was determined that in specimens with the stress concentrators under low-cycle tension-compression, hardened surface the positive influence on durability starts when value of stress amplitude is  $\bar{\sigma}_{\max} \leq 1.3$ . The carried out analytical investigation showed that the 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 very good agreement with the experimental results in stress concentration zones of surface-hardened parts under tension-compression.

**Keywords:** low-cycle fatigue, electromechanical treatment, tension-compression, stress concentration.

## PLIENO 45 PAVIRŠIAUS ELEKTROMECHANINIO SUKIETINIMO ĮTAKA MAŽACIKLIAM TEMPIMUI-GNIUŽDYMIUI, ESANT ĮTEMPIŲ KONCENTRATORIUI

*Aleksej Charčenko, Artūras Sabaliauskas, Sergėjus Rimovskis*

### 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 minkštam apkrovimui, įvertinančios tik nuovargio pažeidimus  $d_N$ . Nustatytas ryšys tarp kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų tempimo-gniuždymo atveju, esant įtempių koncentracijos zonoms.

**Prasminiai žodžiai:** mažaciklis nuovargis, elektromechaninis apdirbimas, tempimas-gniuždyimas, įtempių koncentracija.

Įteikta 2009-09-02