

ELEKTROMECHANISKAI SUKIETINTO PAVIRŠIAUS ĮTAKA PLIENO 45 MAŽACIKLIAM NUOVARGIUI

Aleksej Charčenko, Artūras Sabaliauskas, Sergėjus Rimovskis

Šiaulių universitetas, Technologijos fakultetas

Įvadas

Suirimas mažaciklio apkrovimo metu įvyksta deformuojamame kūne susikaupus didelėms plastišioms deformacijoms. Suirimo charakteristikoms nustatyti, esant vienalyčiam įtempimų būviui, dažniausiai praktikuojami standus ir minkštas apkrovimo būdai su simetriniu ciklu. Esant minkštam mažacikliam apkrovimui, deformacijos nesuvaržomos. Jos vystosi laisvai, dėl to mažaciklis suirimas įvyksta nuo sukauptų nuovargio ir kvazistatinių pažeidimų. Dėl apribotų deformacijų standžiam apkrovimui būdingas tik nuovargio suirimas. Šio apkrovimo tipo eksperimentiniai tyrimai, charakterizuojami įtempimų pokyčiais, vartojami medžiagų suirimo parametrų nustatyti. Priklausomai nuo medžiagos savybių ir amplitudinių įtempimų, minkštam apkrovimui būdingas trijų tipų suirimas: nuovargio, kvazistatinis ir pereinamasis.

Mažaciklis suirimas prasideda plyšio ant bandinio darbinio paviršiaus atsiradimu ir baigiasi jo pasidalijimu į dvi dalis. Po visiško bandinio suirimo jo lūžio paviršiuje matyti dvi zonos – plyšio plitimo zona ir trapaus suirimo zona.

Darbo tikslas – sudaryti analitinį ir eksperimentinį ilgaamžiškumo įvertinimą, taikant kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų sumavimą.

Mažaciklis ilgaamžiškumas, esant standžiam apkrovimui

Medžiagos ilgaamžiškumas, esant standžiam apkrovimui, išreiškiamas plastinės deformacijos priklausomybe nuo ciklų skaičiaus iki plyšio atsiradimo arba iki suirimo. Esant standžiajam apkrovimui, nuovargio kreivė koordinatėse $\lg \bar{\delta} - \lg k_c$ (k_c – pusciklių skaičius iki plyšio susidarymo) yra tiesė. Žinant, kad kilpos plotis $\bar{\delta}_k$, esant standžiam apkrovimui, dažniausiai kinta nedaug, praktiniuose skaičiavimuose imamas vidutinį ilgaamžiškumą ($k_{vid} = k_c / 2$) atitinkančio pusciklio kilpos plotis.

Coffin'o lygtyje kintančią ciklinę plastinę deformaciją δ pakeitus pilna tampriai plastinio stacionaraus deformavimo amplitude ε , kurios reikšmė deformacijos metu išlieka pastovi, galima užrašyti

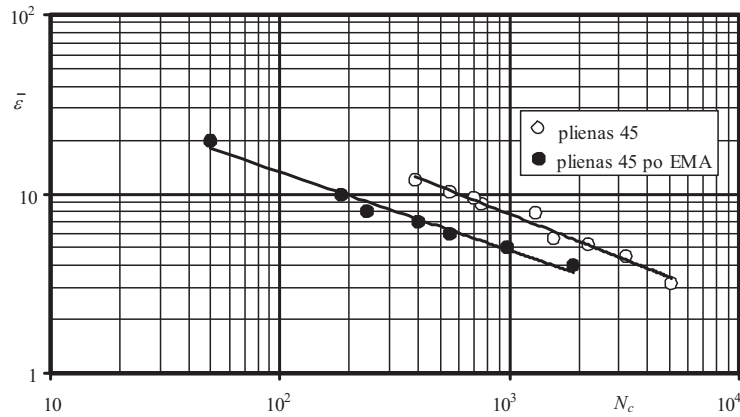
$$\varepsilon N_c^{m_1} = C_1. \quad (1)$$

Mažaciklio standaus tempimo-gniuždymo eksperimentų metu nustatytas ciklų skaičius iki plyšio atsiradimo N_c . Ši ilgaamžiškumo sritis yra svarbi tuo, kad po plyšio atsiradimo įtempimų ir deformacijų nestacionarumo skirtumai ir jų įtaka plyšio plitimui negali būti aprašomi tais pačiais dėsniais. Dėl šios priežasties plieno 45 ir plieno 45 po elektromechaninio apdirbimo (EMA) sukauptų pažeidimų, esant tempimui-gniuždymui, palyginimas ir jo įtaka suirimui atliekamas tik N_c srityje, ir tolimesniuose tyrimuose (1) lygybėje konstantos C_1 ir m_1 bus vartojamos tik nuovargio procesams iki plyšio atsiradimo aprašyti.

Plieno 45 ir plieno 45 po EMA mažaciklio ilgaamžiškumo eksperimentiniai rezultatai ir nuovargio kreivės koordinatėse $\lg \bar{\varepsilon} - \lg N_c$ (kai $\bar{\varepsilon} = 2\bar{\varepsilon}_0$) pateiktos 1 pav. Tyrimo rezultatai parodo, kad mažaciklio standaus simetrinio apkrovimo ilgaamžiškumo priklausomybė (1) koordinatėse $\lg \bar{\varepsilon} - \lg N_c$ atitinka tiesinį kitimo dėsnį. Kadangi skaičiavimuose visi dydžiai išreiškiami santykiniais vienetais ir pateiktame ilgaamžiškumo grafike naudojama ciklinė amplitudinė deformacija $\bar{\varepsilon}$, tai konstanta C_1 taip pat gaunama santykinė ir žymima – \bar{C}_1 . Todėl, mūsų atveju, iš (1) lygybės gausime:

$$\bar{\varepsilon} N_c^{m_1} = \bar{C}_1. \quad (2)$$

Plieno 45 po EMA bandiniai visuose apkrovimo lygiuose mažiau patvaresni lyginant juos su plieno 45 bandiniais, esant aukšties deformacijų lygiams. Neigiamą įtaką elektromechaniškai apdirbto plieno ilgaamžiškumui daro sukietinto trapesnio sluoksnio kaupiami nuovargio pažeidimai.



1 pav. Plieno 45 ir plieno 45 po EMA mažaciklio nuovargio kreivės $\lg \bar{\varepsilon} - \lg N_c$ koordinatėse, esant standžiam tempimui-gniuždymui

Mikroplyšiai, atsiradę sukietintame paviršiniame sluoksnyje, veikiant ciklinei apkrovai, paspartina nuovargio pažeidimų kaupimą sukietintame sluoksnyje. Tokiu būdu inicijuojamas ir pagrindinio metalo irimas. Iš 1 pav. matyti, kad, esant standžiam tempimui-gniuždymui, plieno 45 po EMA ilgaamžiškumas mažacikliam nuovargiui sumažėjo 2,0 – 2,5 karto, lyginant su nesukietintu plienu 45.

2. Sukaupėtų pažeidimų nustatymas

Eksperimentiškai nustatytą nevienodą mažaciklio minkšto tempimo-gniuždymo poveikį plieno 45 ir plieno 45 po EMA stiprumui ir ilgaamžiškumui būtina pagrįsti analitiniais tyrimais.

Įvertinant ciklinės ir vienusės plastinės deformacijų nestacionarumą, mažaciklio minkšto apkrovimo įtaką suirimui galima išreikšti lygybe [1]:

$$d = d_K^q + d_N^l. \quad (3)$$

čia: d – bendras pažeidimas, d_N ir d_K yra atitinkamai nuovargio ir kvazistatinė pažeidimo dedamosios, q ir l – medžiagos konstantos. Plyšio atsiradimo atveju $d = 1$.

Pereinamojo suirimo srityje kvazistatinę ir nuovargio pažeidimus įvertinant lygybe (3), gauname [1]:

$$\left(\frac{\sum_1^{k_c} \bar{\delta}_k}{\sum_1^{k_N} \bar{\delta}_k} \right)^q + \left(\frac{\sum_1^{k_c} \bar{e}_{pk}}{\bar{e}_u} \right)^l = 1. \quad (4)$$

čia: $\sum_1^{k_c} \bar{\delta}_k$ – sukaupta apskaičiuota ciklinė plastinė deformacija per k_c pusciklių; o $\sum_1^{k_N} \bar{\delta}_k$ – nuovargio pažeidimas, sukauptas iki suirimo, kai kvazistatinis pažeidimas $d_K = 0$. \bar{e}_{pk} – per k pusciklių sukaupta vienusė plastinė deformacija, \bar{e}_u – tolydinė deformacija statinio tempimo metu.

Nuovargio pažeidimui d_N apskaičiuoti, esant minkštam apkrovimui, reikalingos teorinės mažaciklio nuovargio kreivės, atitinkančios tikrai nuovarginius pažeidimus. Nustatant šias kreives, minkštą apkrovimą galima laikyti kaip nestacionarinę standų apkrovimą, kurio k pusciklio sukauptas pažeidimas išreiškiamas tokia formule [1]:

$$d_N = \frac{\bar{\delta}_k}{\sum_1^{k_c} \bar{\delta}_k}. \quad (5)$$

Tokiu atveju visa iki pažeidimo sukaupta deformacija skaičiuojama pagal formulę:

$$\frac{\bar{\delta}_1}{\sum_1^{k_{c1}} \bar{\delta}_k} + \frac{\bar{\delta}_2}{\sum_1^{k_{c2}} \bar{\delta}_k} + \frac{\bar{\delta}_3}{\sum_1^{k_{c3}} \bar{\delta}_k} + \dots + \frac{\bar{\delta}_c}{\sum_1^{k_{cc}} \bar{\delta}_k} = 1, \quad (6)$$

čia: $\sum_1^{k_{c1}} \bar{\delta}_k$ – sukauptas nuovargio pažeidimas iki plyšio atsiradimo, esant apkrovimo lygiui atitinkančiam kilpos plotį $\bar{\delta}_1$; $\sum_1^{k_{c2}} \bar{\delta}_k$ – sukauptas nuovargio pažeidimas iki plyšio atsiradimo, esant apkrovimo lygiui, atitinkančiam kilpos plotį $\bar{\delta}_2$ ir t. t.

$$\sum_1^{k_c} \bar{\delta}_k = C_2 k_c^{1-m_2}. \quad (7)$$

Literatūroje [2] parodyta, kad iš (7) galime gauti:

$$\sum_1^{k_c} \bar{\delta}_k = C_2 \frac{C_3^{m_3}}{\bar{\epsilon}^{m_3}}, \quad (8)$$

čia C_2 , C_3 ir m_3 yra medžiagos konstantos:

$$C_2 = \frac{\bar{\delta}_{vid}}{k_c^{-m_2}}, \quad (9)$$

$$C_3 = 2^{m_1} \bar{C}_1, \quad (10)$$

$$m_3 = \frac{(1 - m_2)}{m_1}. \quad (11)$$

Konstanta C_2 ir laipsnio rodiklis m_2 įvertina mažaciklio standaus apkrovimo nuovargio kreivę koordinatėse $\lg \bar{\delta}_{vid} - \lg k_c$ ($\bar{\delta}_{vid} = C_2 k_c^{m_2}$), o C_3 – nuovargio kreivę koordinatėse $\lg \bar{\epsilon} - \lg k_c$ ($\bar{\epsilon} k_c^{m_1} = C_3$).

Įstatę (2. 8) į (2. 3), gauname

$$\frac{\bar{\delta}_1 \bar{\epsilon}_1^{m_3}}{C_2 C_3^{m_3}} + \frac{\bar{\delta}_2 \bar{\epsilon}_2^{m_3}}{C_2 C_3^{m_3}} + \frac{\bar{\delta}_3 \bar{\epsilon}_3^{m_3}}{C_2 C_3^{m_3}} + \dots + \frac{\bar{\delta}_{k_c} \bar{\epsilon}_{k_c}^{m_3}}{C_2 C_3^{m_3}} = 1, \quad (12)$$

arba

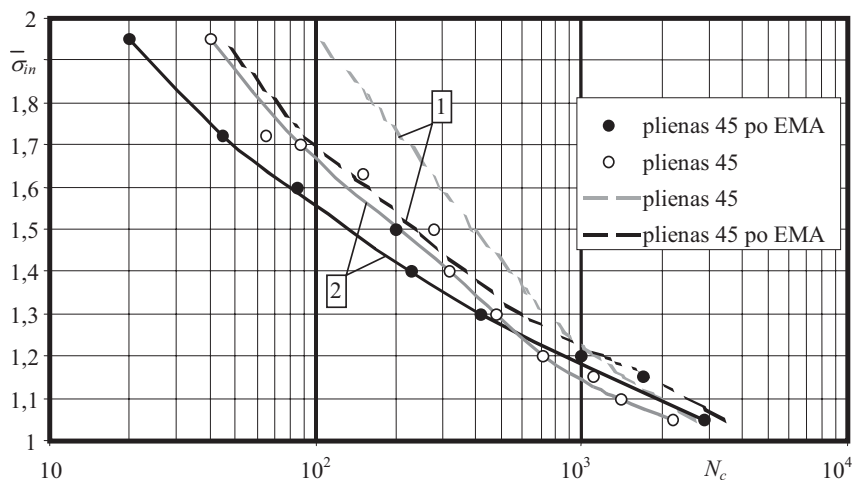
$$\sum_1^{k_c} \bar{\delta}_k \bar{\epsilon}_k^{m_3} = C_2 C_3^{m_3}. \quad (13)$$

Pagal mažaciklio standaus tempimo-gniuždymo eksperimentinius duomenis nustatytos plieno 45 ir plieno 45 po EMA nuovargio suirimo charakteristikos C_2 , m_2 , C_3 ir m_3 yra pateiktos 1 lentelėje.

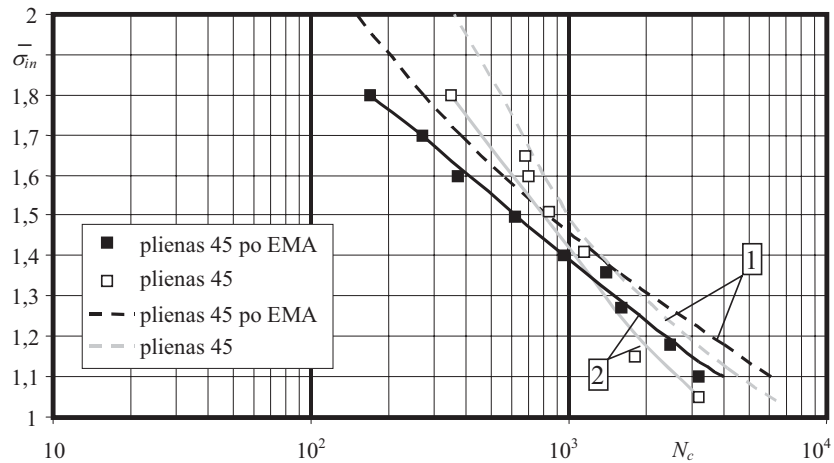
Pagal (2.10) formulę paskaičiuotos plieno 45 ir plieno 45 po EMA mažaciklio simetrinio apkrovimo nuovargio analitinės kreivės, esant minkštam apkrovimui, įvertinančios tik nuovargio pažeidimus d_N , parodytos 2 ir 3 paveiksluose.

1 lentelė. *Plieno 45 ir plieno 45 po EMA nuovargio suirimo charakteristikos*

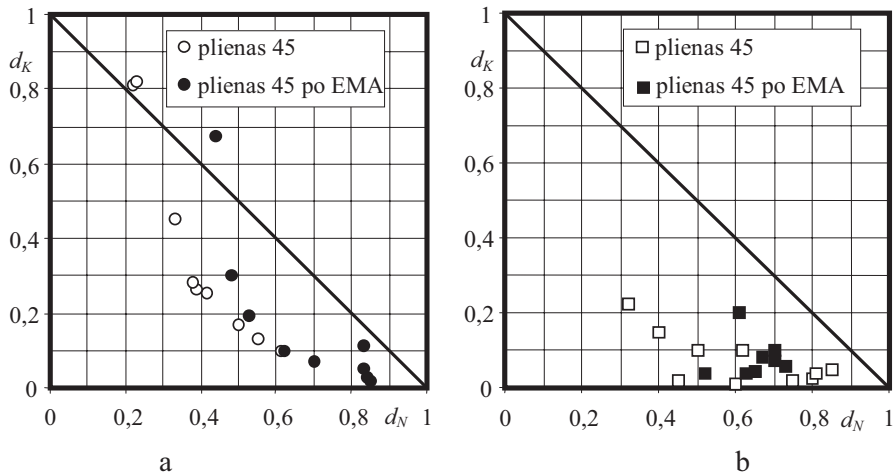
Medžiaga	C_2	m_2	C_3	m_3	$C_2 C_3^{m_3}$
Plienas 45	847	0,664	352	0,666	$4,22 \cdot 10^4$
Plienas 45 po EMA	156	0,505	135	1,13	$3,98 \cdot 10^4$



2 pav. Nesukietintų ir sukietintų tempiamų-gniuždomų bandinių analitinės (1) ir eksperimentinės (2) nuovargio kreivės



3 pav. Nesukietintų ir sukietintų grynuoju lenkimo apkrautų bandinių analitinės (1) ir eksperimentinės (2) nuovargio kreivės



4 pav. Ryšys tarp kvazistatinių ir nuovarginių pažeidimų:
 a – tempimo-gniuždymo metu, b – grynojo lenkimo metu

Iš pateiktų formulių, bei analitinių nuovargio kreivių, galima nustatyti ryšį tarp kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų. 4 a pav. atvaizduotas ryšys tempimo-gniuždymo atveju, o 4 b pav. – grynojo lenkimo atveju. Iš šių grafikų matyti, kad tiriamuoju atveju $q = l = 0,8$.

Gautos kreivės pakankamai gerai sutampa su grynojo lenkimo eksperimentiniu ilgaamžiškumu įtempimų srityje $\bar{\sigma}_{\max} = 1,0 \dots 1,8$ ir patvirtina nuovarginio pažeidimo dominavimą mažaciklio minkšto grynojo lenkimo atveju. Vadinasi, esant šiam apkrovimo tipui, nuovarginis suirimas įvyksta žymiai didesnių įtempimų srityje nei tempimo gniuždymo metu ($\bar{\sigma}_{\max} = 1,0 \dots 1,25$).

Išvados

1. Plieno 45 mažaciklio minkšto grynojo lenkimo metu dėl sumažėjusios vienpusės plastinės deformacijos kaupimo, žymiai sumažėja kvazistatinis pažeidimas. Proporcingai šio pažeidimo sumažėjimui, kaip rodo atlikti bandymai ir analitiniai skaičiavimai, nuovargio pažeidimo dedamoji išauga, kartu išplėsdama mažaciklio ilgaamžiškumo iki plyšio atsiradimo intervalą, didesnių nei tempimą gniuždymą atitinkančių įtempimų srityje.
2. Esant minkštam mažacikliam grynajam lenkimui, įtempimų srityje $\bar{\sigma}_{\max} = 1,0 \dots 1,8$ nustatytas tik nuovargio suirimas, o nuo $\bar{\sigma}_{\max} = 1,8$ – tik pereinamasis. Galima teigti, kad realiose

sąlygose cikliniu grynuoju lenkimu apkrautuose detalėse kvazistatinio pažeidimo kaupimo išvengiama, o jų mažacikliam ilgaamžiškumui apskaičiuoti pakanka įvertinti tik nuovargio pažeidimą.

3. Tyrimo rezultatams patikrinti nustatytos eksperimentinės ir analitinės nuovargio kreivės, atspindinčios tik nuovargio mažaciklio minkšto apkrovimo pažeidimą, pakankamai gerai sutapo su mažaciklio minkšto grynojo lenkimo ilga-

amžiškumo rezultatais visame šio apkrovimo būdo nuovargio suirimo intervale.

Literatūra

1. Daunys M., 2005, *Ciklinis konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas*. Kaunas: Technologija. 288 p.
2. Daunys M., Rimovskis S., 2006, Analysis of circular cross-section element, loaded by static and cyclic elastic-plastic pure bending. *International Journal of Fatigue*. Nr. 28. P. 211–222.

INFLUENCE OF ELECTROMECHANICAL SURFACE HARDENING ON LOW CYCLE FATIGUE OF GRADE 45 STEEL

Aleksej Charčenko, Artūras Sabaliauskas, Sergėjus Rimovskis

Summary

Analytical investigations of low cycle durability and damage accumulation were accomplished. Under low cycle stress limited loading, material is always accumulating quasi-static d_K and fatigue d_N damage. The sum of the mentioned damage predetermines durability of the parts. Analytical curves of a symmetric low cycle loading calculated for grade 45 steel and grade 45 steel after electromechanical treatment under stress limited loading, when only fatigue damage d_N is taken into account, are given in this paper. The relationship between quasi-static and fatigue damage under tension-compression and under pure bending is given.

Key words: low cycle fatigue, electromechanical treatment.

ELEKTROMECHANIŠKAI SUKIETINTO PAVIRŠIAUS ĮTAKA PLIENO 45 MAŽACIKLIAM NUOVARGIUI

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 analitinės kreivės, esant minkštajam apkrovimui, įvertinančios tik nuovargio pažeidimus d_N . Nustatytas ryšys tarp kvazistatinių ir nuovargio pažeidimų tempimo-gniuždymo ir grynojo lenkimo atveju.

Prasminiai žodžiai: mažaciklis nuovargis, elektromechaninis apdirbimas.

Įteikta 2008-09-15