

PLIENO CIKLINIO NESTABILUMO ĮVERTINIMAS ESANT MAŽACIKLIAM DEFORMAVIMUI

Gražvydas Lukša, Mantas Stonkus, Raimondas Šniuolis

Šiaulių universitetas, Technologijos ir gamtos mokslų fakultetas

Įvadas

Parentant medžiagą konstrukcijoms, dirbančioms mažaciklio apkrovimo sąlygomis, būtina žinoti jos ciklines savybes (stiprėjanti, silpnėjanti ar cikliškai stabili), kadangi nuo jų priklauso deformacijų ir įtempių kitimas eksploatacijos metu. Ir tik žinant medžiagos ciklines savybes galima pasakyti apie jos pritaikymo galimybes realiomis darbo sąlygomis.

Konstrukcijų realios darbo sąlygos artimos apkrovimui su apribotomis deformacijomis, t. y. dažniausiai mašinų detalėse aptinkamas standusis apkrovimas, nes ciklinis tamptis plastinis deformavimas labiausiai pastebimas įtempių santalkos ir įtrūkių zonoje, kurias supa tamptis deformuojama medžiaga.

Didelę praktinę reikšmę turi medžiagų ciklinių savybių nustatymas, neatliekant mažaciklio nuovargio bandymų, pagal medžiagos kietį, jos mikro- arba makrostruktūrą arba mechanines charakteristikas. Nustatyta, kad grūdintas didelio kiekio plienas cikliškai silpnėja, o atkaitintas ir normalizuotas vidutinio kiekio plienas dažniausiai yra cikliškai stabilus arba stiprėja [1].

Šiame straipsnyje, apdorojus daugiau kaip 280 medžiagų tyrimo rezultatus, medžiagų ciklinių savybių pokytį buvo bandoma įvertinti pagal mechanines charakteristikas ir mažaciklio standaus apkrovimo pusciklių diagramas.

Tyrimo tikslas – nustatyti parametą medžiagų ciklinėms savybėms įvertinti esant mažacikliam standžiajam apkrovimui.

Tyrimo uždaviniai – patikslinti ciklinių savybių sritis cikliniam nestabilumui įvertinti pagal statines mechanines savybes kambario ir aukštesnėje (200–350 °C) temperatūroje.

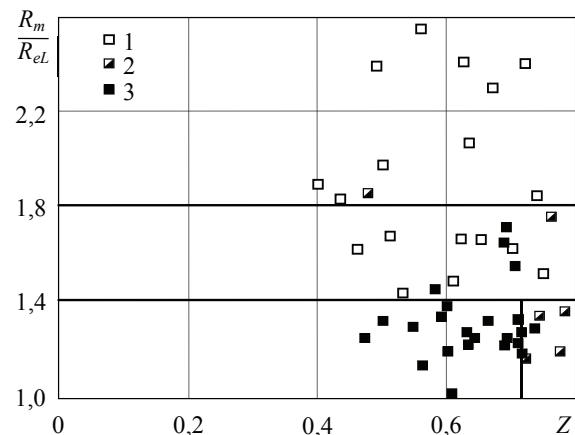
Tyrimo metodai – eksperimentų rezultatų apdorojimas, literatūros analizė, statistinė analizė.

Medžiagų ciklinio nestabilumo įvertinimas pagal mechanines charakteristikas

Medžiagų ciklinių savybių įvertinimas pagal mechanines charakteristikas buvo nagrinėjamas R. Landgrafo, A. Romanovo ir kt. mokslininkų darbuose. R. Landgrafo darbe [2] pažymima, kad medžiagos cikliškai stiprėja, kai $R_m/R_{eL} > 1,4$; cikliškai

silpnėja esant $R_m/R_{eL} < 1,2$ ir yra cikliškai stabilios, kai $1,2 < R_m/R_{eL} < 1,4$ (žr. 1 lentelę).

A. Gusenkovo ir A. Romanovo darbe [3] nustatyta, kad santykis R_m/R_{eL} nėra pagrindinis faktorius, nusakantis medžiagų ciklines savybes. Autoriai parodė, kad ciklines savybes tiksliau nusako tolydinės tempimo deformacijos e_u santykis su statine deformacija trūkio metu e_f (žr. 1 lentelę). Tačiau reikia pripažinti, kad yra nustatyta tik nedaugelio medžiagų e_u , ir todėl patikimesnių apibendrinančių rezultatų nėra.



1 pav. Konstrukcinių medžiagų ciklinių ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybė kambario temperatūroje: 1 – stiprėjimas, 2 – stabilumas, 3 – silpnėjimas

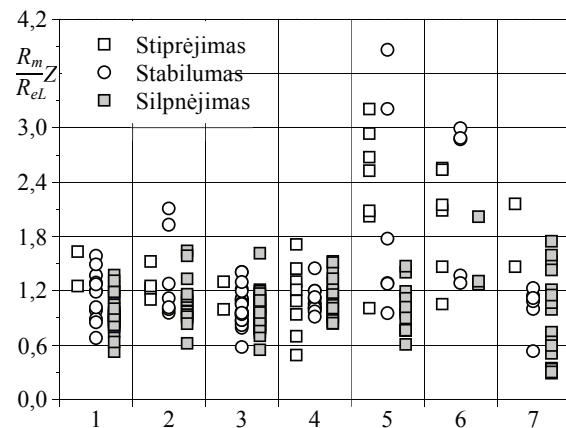
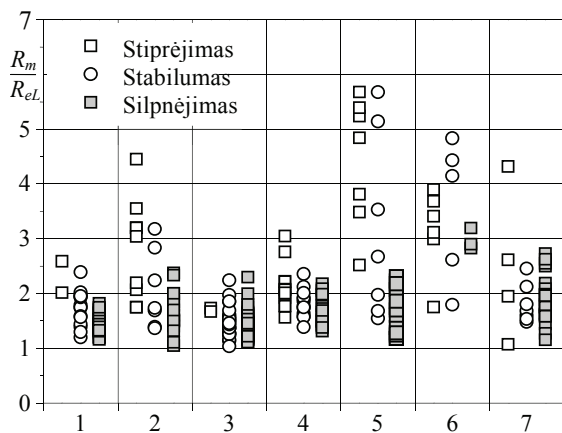
Kur kas perspektyvesnis būdas medžiagų ciklinėms savybėms nustatyti – naudoti mechanines charakteristikas R_m , R_{eL} ir Z , gautas standartiniu tempimo bandymu. Darbe [1], apdorojus plieną ir jo suvirintųjų jungčių medžiagas, buvo išskirtos keturios ciklinių savybių išsidėstymo sritys (žr. 1 pav.): 1) kai $R_m/R_{eL} > 1,8$, plienas, nepriklausomai nuo Z , stiprėja; 2) kai $R_m/R_{eL} < 1,4$ ir $Z < 0,72$, plienas silpnėja; 3) kai $R_m/R_{eL} < 1,4$ ir $Z < 0,72$, visos medžiagos yra stabilios; 4) kai $1,4 < R_m/R_{eL} < 1,8$, nepriklausomai nuo Z , turime pereinamąją sritį, kuriai būdingas nedidelis stiprėjimas, nedidelis silpnėjimas arba stabilumas. Suvirintųjų jungčių medžiagoms buvo išskirta papildoma pereinamoji sritis tarp stabilumo ir silpnėjimo, kai $R_m/R_{eL} < 1,4$ ir $0,56 < Z < 0,72$ (žr. 1 lentelę).

1 lentelė. **Konstruktinių medžiagų ciklinio nestabilumo įvertinimas pagal mechanines savybes**

R. W. Landgrafas	$R_m / R_{el} < 1,4$	medžiagos cikliškai stiprėja
	$R_m / R_{el} < 1,2$	medžiagos cikliškai silpnėja
	$1,2 < R_m / R_{el} < 1,4$	medžiagos cikliškai stabilios
Tirtos 35 medžiagos (plienas, aliuminio ir titano lydiniai). Gautos išvados pasitvirtino su 26 medžiagomis		
A. Gusenkovas, A. Romanovas	R_m / R_{el}	nėra pagrindinis faktorius medžiagų ciklinėms savybėms nusakyti
	$e_u / e_v > 0,6$	medžiagos cikliškai stiprėja
	$e_u / e_v < 0,45$	medžiagos cikliškai silpnėja
	$0,45 < e_u / e_v < 0,6$	medžiagos cikliškai stabilios
	čia e_u – tolydinė tempimo deformacija; e_v – deformacija trūkio metu	
Tirtos 48 medžiagos (44 plieno markės ir 4 aliuminio lydiniai). Gautos išvados pasitvirtino su 25 plieno markėmis		
M. Daunys, A. Bražėnas, kiti	$R_m / R_{el} > 1,8$, nepriklausomai nuo Z	medžiagos cikliškai stiprėja
	$R_m / R_{el} < 1,4$, $Z < 0,72$	medžiagos cikliškai silpnėja
	$R_m / R_{el} < 1,4$, $Z < 0,72$	medžiagos cikliškai stabilios
	$1,4 < R_m / R_{el} < 1,8$, nepriklausomai nuo Z	pereinamoji sritis
	$R_m / R_{el} < 1,4$, $0,56 < Z < 0,72$	suvirintosios jungtys
Tirtos 47 medžiagos (plienas, jo suvirintosios jungtys ir 4 aliuminio lydiniai), čia R_m – tempimo stipris; R_{el} – apatinis takumo stipris; Z – santykinis skerspjūvio sumažėjimas po trūkio		

Šiame darbe, apdorojus daugiau kaip 280 medžiagų tyrimo rezultatus, buvo tikslinamos ciklinio nestabilumo sritys septynių tiriamų medžiagų grupių

pagal santykį R_m / R_{el} ir $(R_m / R_{el})Z$ (žr. 2 pav.), bet medžiagų ciklinių savybių įvertinti nepavyko.



2 pav. Ciklinių savybių įvertinimas kambario ir aukštesnėje temperatūroje: 1 stulpelis – legiruotasis plienas; 2 – legiruotasis plienas 275–350 °C temperatūroje; 3 – legiruotojo plieno suvirintosios jungtys; 4 – legiruotojo plieno suvirintosios jungtys 200–350 °C temperatūroje; 5 – nerūdijantysis plienas; 6 – nerūdijantysis plienas 350 °C temperatūroje; 7 – nerūdijančiojo plieno suvirintosios jungtys

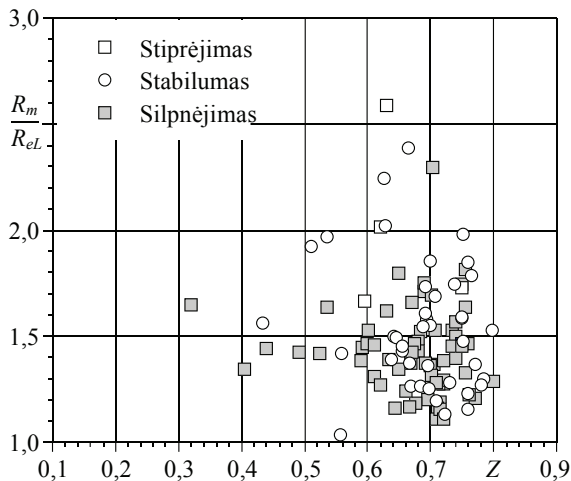
Koordinatėse $R_m / R_{el} - Z$ plienas ir jo suvirintųjų jungčių medžiagos buvo suskirstytos į tris grupes:

1. Legiruotasis plienas ir jo suvirintųjų jungčių medžiagos kambario temperatūroje. Čia buvo išskirtos trys ciklinių savybių sritys (žr. 3 pav.): 1) kai $R_m / R_{el} < 1,8$, plienas ir jo suvirintųjų jungčių medžiagos, nepriklausomai nuo Z , silpnėja; 2) kai $1,6 < R_m / R_{el} < 2,6$ ir $0,58 < Z < 0,76$, plienas ir jo suvirintosios jungtys stiprėja; 3) kai $R_m / R_{el} < 2,4$ ir

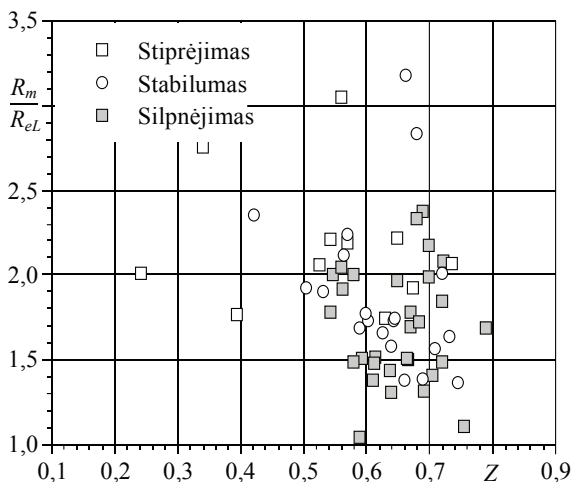
$0,5 < Z < 0,8$, plienas ir jo suvirintųjų jungčių medžiagos yra cikliškai stabilios.

2. Legiruotasis plienas ir jo suvirintųjų jungčių medžiagos aukštesnėje (200–350 °C) temperatūroje. Čia taip pat buvo išskirtos trys ciklinių savybių pasiskirstymo sritys (žr. 4 pav.): 1) kai $R_m / R_{el} < 2,4$ ir $0,54 < Z < 0,8$, plienas ir jo suvirintųjų jungčių medžiagos silpnėja; 2) kai $1,7 < R_m / R_{el} < 3,1$, plienas ir jo suvirintųjų jungčių medžiagos, nepriklausomai nuo

Z , stiprėja; 3) kai $R_m/R_{eL} < 2,3$ ir $0,5 < Z < 0,76$, plienas ir jo suvirintosios jungtys yra cikliškai stabilios.

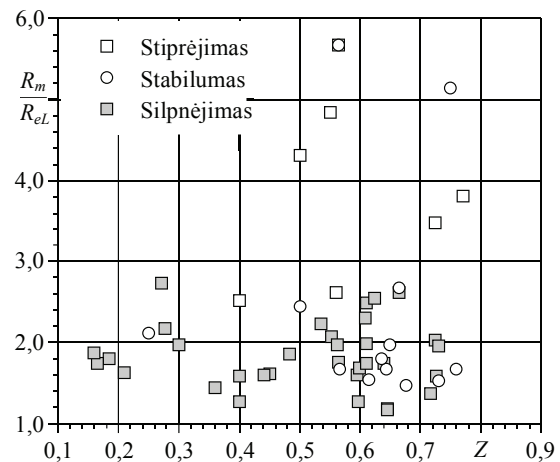


3 pav. Legiruotojo plieno ir jo suvirintųjų jungčių medžiagų ciklinių ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybė kambario temperatūroje



4 pav. Legiruotojo plieno ir jo suvirintųjų jungčių medžiagų ciklinių ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybė 200–350 °C temperatūroje

3. Nerūdijantysis plienas ir jo suvirintųjų jungčių medžiagos kambario temperatūroje. Galimos trys ciklinių savybių pasiskirstymo sritys (žr. 5 pav.): 1) kai $R_m/R_{eL} < 2,8$, plienas ir jo suvirintųjų jungčių medžiagos, nepriklausomai nuo Z , silpnėja; 2) kai $2,5 < R_m/R_{eL} < 5,5$ ir $Z > 0,38$, plienas ir jo suvirintosios jungtys stiprėja; 3) kai $R_m/R_{eL} < 2,7$ ir $0,5 < Z < 0,76$, plienas ir jo suvirintosios jungtys yra cikliškai stabilios.



5 pav. Nerūdijančiojo plieno ir jo suvirintųjų jungčių medžiagų ciklinių ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybė kambario temperatūroje

Kaip matyti, medžiagų skirstymas pagal ciklines savybes į cikliškai silpnėjančias, stiprėjančias arba stabilias koordinatėse $R_m/R_{eL} - Z$ nepavyko, nes cikliškai stabilios medžiagos yra tuose pačiuose intervaluose kaip ir cikliškai nestabilios.

Medžiagų ciklinio nestabilumo įvertinimas pagal eksperimento rezultatus

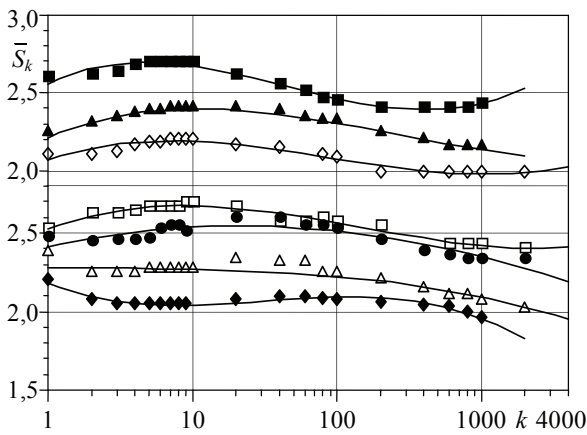
Priklausomybė tarp įtempių ir deformacijų, kalbant apibendrintai apie ciklinio deformavimo diagramą, išreiškiama lygtimi [1]

$$\bar{\varepsilon}_k = \bar{S}_k + \bar{\delta}_k \quad (1)$$

čia $\bar{\varepsilon}_k$ ir \bar{S}_k – k -ojo pusciklio ciklinė deformacija ir įtempis intervalas; $\bar{\delta}_k$ – histerezės kilpos plotis; k – pusciklio numeris.

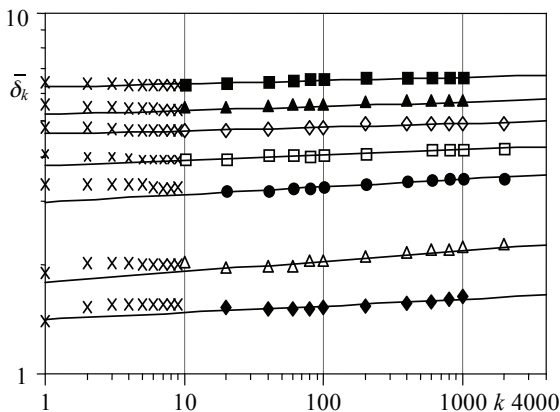
Skaičiavimuose naudojamos santykinės vertės, t. y. $\bar{S}_k = S_k / \sigma_{pr}$, $\bar{\varepsilon} = \varepsilon / e_{pr}$ ir $\bar{\delta} = \delta / e_{pr}$, nes lyginamasis įtempis arba lyginamoji deformacija rodo, kiek yra viršyta medžiagos proporcingumo riba.

Esant standžiam apkrovimui, deformacijos yra suvaržytos, todėl $\bar{\varepsilon}_k = const$. Kaip keičiasi medžiagų cikliniai įtempiai \bar{S}_k priklausomai nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus k , esant standžiam mažacikliam apkrovimui, parodyta 6 pav. koordinatėse $\bar{S}_k - lgk$ [4]. Dauguma medžiagų neišlaiko savybių pastovumo per visą deformavimo laiką iki suirimo. Ta pati medžiaga, priklausomai nuo apkrovimo ciklų skaičiaus ir apkrovimo lygio, gali stiprėti ir silpnėti arba būti stabili [5]. Dažnai, didinant pusciklių skaičių, cikliškai stiprėjanti medžiaga tampa cikliškai stabili arba silpnėjanti, arba ciklinis silpnėjimas tampa cikliniu stiprėjimu.



6 pav. Ciklinių įtempių \bar{S}_k priklausomybė nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus k (silpnėjanti medžiaga, plienas 15Ch2MFA)

Darbe [4] parodyta, kad histerezės kilpos pločio δ priklausomybė nuo pusciklių skaičiaus k sudaro tiesę koordinatėse $lg\bar{\delta}_k - lgk$ (žr. 7 pav.).



7 pav. Histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus k (silpnėjanti medžiaga, plienas 15Ch2MFA), atmetus $k = 1 - 9$

Grafiškai interpretavus tiesinę regresiją $y = a + bx$, histerezės kilpos plotis cikliškai silpnėjantioms medžiagoms

$$lg\bar{\delta}_k = lg\bar{\delta}_1 + algk \tag{2}$$

arba k -ojo apkrovimo pusciklio tampriai plastinės histerezės kilpos plotis

$$\bar{\delta}_k = \bar{\delta}_1 k^\alpha \tag{3}$$

Histerezės kilpos plotis cikliškai stiprėjantioms medžiagoms

$$\bar{\delta}_k = \bar{\delta}_1 k^\alpha \tag{4}$$

Cikliškai stabilioms medžiagoms tiesės krypties parametras $\alpha = 0$ ir histerezės kilpos plotis

$$\bar{\delta}_k = \bar{\delta}_1 \tag{5}$$

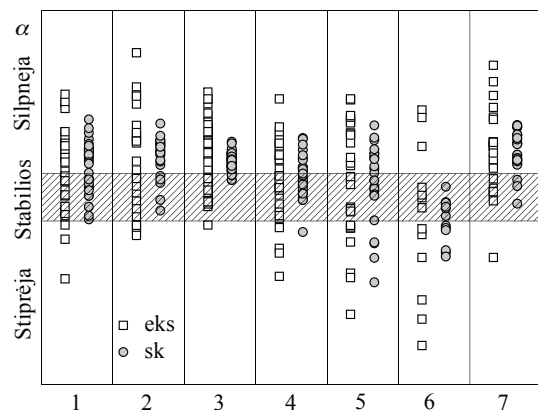
Kai 1-ąjį ir k -ąjį apkrovimo pusciklį atitinkančios vertės $\bar{\delta}_1$ ir $\bar{\delta}_k$ nustatomos koordinatėse $lg\bar{\delta}_k - lgk$, medžiagos stiprėjimo (silpnėjimo) intensyvumą įvertinantis parametras

$$\alpha = \frac{lg\bar{\delta}_k - lg\bar{\delta}_1}{lgk} \tag{6}$$

Pagal parametą α medžiagos buvo suskirstytos į tris grupes: jei $-0,01 \leq \alpha \leq 0,01$, medžiagos buvo apibūdinamos kaip cikliškai stabilios, jei $\alpha > 0,01$, medžiagos cikliškai silpnėja, jei $\alpha < -0,01$ – medžiagos cikliškai stiprėja.

Eksperimentinių rezultatų ir pagal duotas lygibes [7] apskaičiuotų medžiagos ciklinių savybių palyginimas parodytas 8 paveiksle.

Darbe [7] tirtoms medžiagų grupėms buvo duotos parametro α priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo, kadangi jos teikia mažiausią sklaidą ir geriausiai nusako tiesinio ryšio stiprį [4].



8 pav. Eksperimentinių ir apskaičiuotų ciklinių savybių palyginimas kambario ir aukštesnėje temperatūroje: 1 stulpelis – legiruotasis plienas; 2 – legiruotasis plienas 275–350 °C temperatūroje; 3 – legiruotojo plieno suvirintosios jungtys; 4 – legiruotojo plieno suvirintosios jungtys 200–350 °C temperatūroje; 5 – nerūdijantysis plienas; 6 – nerūdijantysis plienas 350 °C temperatūroje; 7 – nerūdijančiojo plieno suvirintosios jungtys

Išvados

1. Atlikti konstrukcinių medžiagų skirstymo pagal ciklines savybes į cikliškai silpnėjančias, stiprėjančias arba cikliškai stabilias pagal santykį

R_m / R_{el} , $(R_m / R_{el})Z$ ir koordinatėse $R_m / R_{el} - Z$ nepavyko, nes cikliška stabilios medžiagos yra tuose pačiuose intervaluose kaip ir cikliška nestabilios (stiprėjančios, silpnėjančios).

2. Mažaciklio deformavimo tiesės krypties parametras α pakankamai tiksliai apibūdina konstrukcinių medžiagų ciklinį nestabilumą kambario ir aukštesnėje temperatūroje.

Literatūra

1. Daunys M., 2005, *Ciklinis konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas*. Kaunas: Technologija.
2. Landgraf R. W., 1970, The Resistance of Metals to Cyclic Deformation. *Achievement of High Fatigue Resistance in Metals and Alloys*. P. 3–36. Philadelphia, Pa.
3. Гусенков А. П., Романов А. Н., 1971, Характеристики сопротивления малоциклового деформированию и разрушению в связи с выбором материалов

при конструировании. Доклад на Всесоюзном рабочем симпозиуме по вопросам малоциклового усталосту. С. 45. Каунас: КПИ.

4. Daunys M., Šniuolis R., 2006, Statistical evaluation of low cycle loading curves parameters for structural materials by mechanical characteristics. *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 236. No. 13. P. 1352–1361.
5. Mrozinski S., Szala J., 2010, Problem of cyclic hardening or softening in metals under programmed loading. *Scientific problems of machines operation and maintenance*. Vol. 45. No. 4 (164). P. 83–96.
6. Daunys M., Stulpinaitė A., Šniuolis R., 2010, Statistical evaluation of low cycle stress-strain curves parameters for alloyed structural steels weld metals at room and elevated temperature. *Mechanika*. Vol. 85. No. 5. P. 5–10.
7. Daunys M., Šniuolis R., Stulpinaitė A., 2012, Evaluation of cyclic instability by mechanical characteristics for structural materials. *Mechanika*. Vol. 18. No. 3. P. 280–284.

Summary

EVALUATION OF CYCLIC INSTABILITY FOR STEEL AT LOW CYCLE STRAINING

G. Lukša, M. Stonkus, R. Šniuolis

Having investigated 286 structural materials at low cycle straining the cycle properties of structural materials were evaluated by mechanical characteristics. The investigation showed that cyclically stable materials were in the same intervals as the cyclically unstable (hardened, softened) according to the ratio of the R_m / R_{el} , $(R_m / R_{el})Z$ and similarly in the coordinates $R_m / R_{el} - Z$, therefore the grouping of structural materials according to the cyclic properties failed. In order to carry out a thorough analysis of the results, the cyclic stress-strain curves parameter α , which characterizes the intensity of cyclic hardening or softening of structural materials at room and elevated temperatures most precisely, was chosen.

Keywords: low cycle straining, cyclic hardening, softening and stabilization.

Santrauka

PLIENO CIKLINIO NESTABILUMO ĮVERTINIMAS ESANT MAŽACIKLIAM DEFORMAVIMUI

G. Lukša, M. Stonkus, R. Šniuolis

Šiame straipsnyje, apdorojus 286 medžiagų standaus apkrovimo tyrimo rezultatus, mėginta įvertinti medžiagų ciklinių savybių sritis pagal mechanines charakteristikas. Tyrimas parodė, kad pagal santykį R_m / R_{el} ir $(R_m / R_{el})Z$, taip pat koordinatėse $R_m / R_{el} - Z$ cikliška stabilios medžiagos yra tuose pačiuose intervaluose kaip ir cikliška nestabilios (silpnėjančios, stiprėjančios) medžiagos, todėl jų skirstymas pagal ciklines savybes nepavyko. Nuodugnai rezultatų analizei atlikti buvo pasirinktas mažaciklio apkrovimo kreivių parametras α , kuris tiksliausiai apibūdina medžiagos stiprėjimo (silpnėjimo) intensyvumą.

Prasminiai žodžiai: mažaciklis deformavimas, ciklinis stiprėjimas, silpnėjimas ir stabilumas.

Įteikta 2015-09-19

Priimta 2015-10-08

FIZINIAI MOKSLAI

PHYSICAL SCIENCES