

НАСТАВНО НАУЧНОМ ВЕЋУ
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА
У КРАГУЈЕВЦУ
Продекану за НИР

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
ПРИМЉЕНО: 09 JUN 2010

Орг. јед.	Број	Прилог	Вредност
	01-11/1751-1		

Предмет: Захтев за верификацију техничког решења

Молим Наставно научно веће Машинског факултета у Крагујевцу да за ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ под називом

ПРОЦЕНА ПРЕОСТАЛОГ ВЕКА КОНСТРУКЦИЈА ПРИМЕНОМ ГУСТИНЕ ЕНЕРГИЈЕ ДЕФОРМАЦИЈЕ

рађено у оквиру пројекта TR14009 „Истраживање у области замора, механике лома и поузданости рударских и енергетских конструкција“, финансираног од стране Министарства за науку и технолошки развој.

Аутори техничког решења:

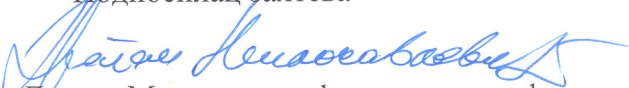
- Мр Катарина Максимовић, ВТИ, Београд
- Др Миодраг Јанковић, редовни професор, Машински факултет у Београду
- Др Стеван Максимовић, научни саветник, ВТИ, Београд,
- Др Драган Милосављевић, редовни професор, Машински факултет у Крагујевцу,
- Др Владимир Зељковић, научни саветник, Институт техничких наука Српске академије наука и уметности, Београд,
- Ивана Васовић, истраживач сарадник, Институт „ГОША“, Смедеревска паланка

Уз детаљан опис у прилогу је дато и позитивно мишљење рецензената:

1. Др Вукић Лазић, ванредни професор, Машински факултет у Крагујевцу,
2. Др Србислав Александровић, ванредни професор, Машински факултет у Крагујевцу

Са поштовањем,

Подносилац захтева


Др Драган Милосављевић, редовни професор
Машински факултет у Крагујевцу

Крагујевац,

7. јуни 2010. године



Универзитет у Крагујевцу
Машински факултет у Крагујевцу
Број : **ТР-55/2010**
10. 06. 2010. године
Крагујевац

Наставно-научно веће Машинског факултета у Крагујевцу на својој седници од 10. 06. 2010. године на основу члана 200. Статута Машинског факултета, донело је

О Д Л У К У

Усвајају се позитивне рецензије техничког решења „**Процена преосталог века конструкција применом густине енергије деформације**“, аутора **Мр Катарине Максимовић, др Миодрага Јанковића, др Стевана Максимовића, др Драгана Милосављевића, др Владимира Зељковића и Иване Васовић.**

Решење припада класи **M85**, према класификацији из Правилника о поступку и начину вредновања, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача, ("Сл. гласник РС", бр. 38/2008).

Рецензенти су:

1. **Др Вукић Лазић, ванредни професор, Машински факултет Крагујевац**
2. **Др Србислав Александровић, ванредни професор, Машински факултет Крагујевац**

Достављено:
Ауторима
Архиви



ДЕКАН МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Др Мирослав Бабић, ред. проф.

М И Ш Љ Е Њ Е о техничком решењу

**ПРОЦЕНА ПРЕОСТАЛОГ ВЕКА КОНСТРУКЦИЈА ПРИМЕНОМ ГУСТИНЕ
ЕНЕРГИЈЕ ДЕФОРМАЦИЈЕ**

На основу текста техничког решења под горњим називом чији су аутори: мр Катарина Максимовић, др Миодраг Јанковић, др Стеван Максимовић, др Владимир Зељковић, др Драган Милосављевић и Ивана Васовић, дипл. инж., може се констатовати следеће.


Методологијом базираној на примени густине енергије деформације решава се проблем процене преосталог века конструкција са напрслинама.

Ово је другачији приступ у односу на раније коришћени приступ који је базирао, у основи, на Парисовом закону ширења прскотине. Презентована истраживања базирају на сасвим другом приступу користећи цикличне карактеристике материјала какве се користе за анализу понашања структуралних елемената до појаве иницијалних оштећења под дејством променљивих оптерећења.

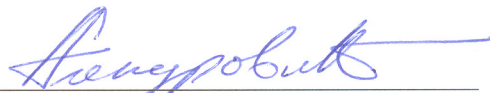
На основу изложене методологије реализован је софтверски пакет за прорачун преосталог века конструкција са напрслинама. За примену методологије неопходно је имати експерименталне податке карактеристика материјала.

Техничко решење спада у категорију М85 "нова метода", према ПРАВИЛНИКУ о поступку и начину вредновања, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача, 2008. година.

Крагујевац, 7. јуни 2010. Године



Др Вукић Лазић, ванр. професор
Машински факултет у Крагујевцу



Др Србислав Александровић, ванр. професор
Машински факултет у Крагујевцу

ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ:

ПРОЦЕНА ПРЕОСТАЛОГ ВЕКА КОНСТРУКЦИЈА ПРИМЕНОМ ГУСТИНЕ ЕНЕРГИЈЕ ДЕФОРМАЦИЈЕ

I) ИДЕНТИФИКАЦИОНИ ПОДАЦИ

Аутори решења	Катарина Максимовић Миодраг Јанковић Стеван Максимовић Драган Милосављевић Владимир Зељковић Ивана Васовић
Назив техничког решења	ПРОЦЕНА ПРЕОСТАЛОГ ВЕКА КОНСТРУКЦИЈА ПРИМЕНОМ ГУСТИНЕ ЕНЕРГИЈЕ ДЕФОРМАЦИЈЕ
Врста техничког решења:	Нова метода (M85)
Наручилац решења:	<ul style="list-style-type: none">➤ Машински факултет Београд➤ Машински факултет Крагујевац➤ Техничко решење је реализовано у оквиру пројекта ТП 14009 „Истраживање у области замора, механике лома и поузданости рударских и енергетских конструкција” финансираног од стране Министарства за науку и технолошки развој
Корисник решења:	<ul style="list-style-type: none">• Војнотехнички институт Београд• Машински факултет Београд• Машински факултет Крагујевац
Годна израде решења:	2009. година
Решење прихваћено од:	Машински факултет Београд, Катедра за машинске елементе Машински факултет Крагујевац, Центар за композитне и нове материјале
Решење примењује:	<ul style="list-style-type: none">• Војнотехнички институт Београд• Машински факултет Београд• Машински факултет Крагујевац
Начин верификације решења:	Примери прорачуна епрувета и конструкција
Начин коришћења резултата	Развијена методологија се примењује коришћењем софтвера који је урађен за анализу и прорачун преосталог века конструкције

II) ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

1. ОБЛАСТ НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

Техничко решење се односи на област механике лома, односно прорачун века конструкције.

2. ПРОБЛЕМ КОЈИ СЕ РЕШАВА

Предложеном методологијом решава се проблем за процену преосталог века конструкција са прскотинама.

3. СТАЊЕ РЕШЕНОСТИ ПРОБЛЕМА У СВЕТУ И СРБИЈИ

Последњих десетак година био је предложен извешан број физичких модела којима се омогућава како процена века елемената структура у фази ширења прскотине, тако и описивање механизма ширења. Будући да се истраживање [1, 5] које је везано за понашање ширења прскотине при замору односи на процес локалног оштећења на врху прскотине, већу пажњу изазивају модели базирани на акумулисаном оштећењу [1 - 15], јер они доводе до повезивања микроскопског оштећења при замору са неким фундаменталним својствима деформисања при цикличном оптерећењу, на пример, оних који су добијени при малоциклусном замору (LCF) и/или параметара који су везани за микроструктуру. Претходно речено наводи на закључак да погодност коју би требало користити приликом предвиђања века при ширењу прскотине у условима замора буде везана са коришћењем својстава при малоциклусном замору. Овакав закључак следи из чињенице да су тестови при малоциклусном замору једноставнији за изводјење и да својства при малоциклусном замору могу такође бити процењена из података везаних за истезање при монотонном цикличном оптерећењу [2, 3, 4, 5]. Неки модели [10,14] су већ разматрали могућност предвидјања века код фазе ширења прскотине у условима замора и за ниво II, на прави, адекватан начин, употребом доминантних својстава при малоциклусном замору, али без обзира на то потребно је извршити додатна побољшања да би се савладали неки недостаци. Код модела предложеног од стране Kaisand-а и Mowbray-а [14] и модификацијом од стране Liu и Lin-а [10], коришћен је опсег J -интеграла ΔJ уместо опсега фактора интензитета напона ΔK , код предвидјања понашања $da/dN - \Delta J$ уз својства која су везана за малоциклусни замор. Тако добијени резултати предвидјања су веома осетљиви на дефинисање (одредјивање) иницијалне дужине прскотине, које није увек изводљиво.

4. ПОСТАВКА ПРОБЛЕМА –

Предмет истраживања био је усмерен на увођење густине енергије деформације у анализу ширења прскотине. Ово је у основи другачији приступ у односу на раније коришћени приступ који је базирао, у основи, на Парисовом закону ширења прскотине. Презентована истраживања базирају на сасвим другом приступу користећи цикличне карактеристике материјала какве се користе за анализу понашања структуралних елемената до појаве иницијалних оштећења под дејством променљивих оптерећења.

5. ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Формулисање модела за прорачун века елемената структуре у присуству прскотине

5.1 Дефинисање апсорбоване енергије до појаве лома

За успостављање потребне функционалне зависности неопходно је поћи од чињенице да се укупна деформација при дејству цикличног оптерећења састоји од еластичне и пластичне компоненте, односно:

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}. \quad (1)$$

Укупна деформација, еластична односно, пластична деформација могу бити дефинисани као функције броја циклуса односно полуциклуса ($2N_f$), као резултат великог броја експеримената, у облику [2, 3, 4]:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c, \quad (2)$$

где су: $\sigma_f'^c$ - коефицијент чврстоће при замору,
 ε_f' - коефицијент дуктилности при замору,
 b – Basquin-ov експонент,
 c – експонент дуктилности при замору,
 E – модул еластичности.

Поред функционалне зависности од броја циклуса, укупна деформација, пластична деформација и еластична деформација, на основу експерименталних истраживања, могу бити формулисани и као функције напона [2, 3]:

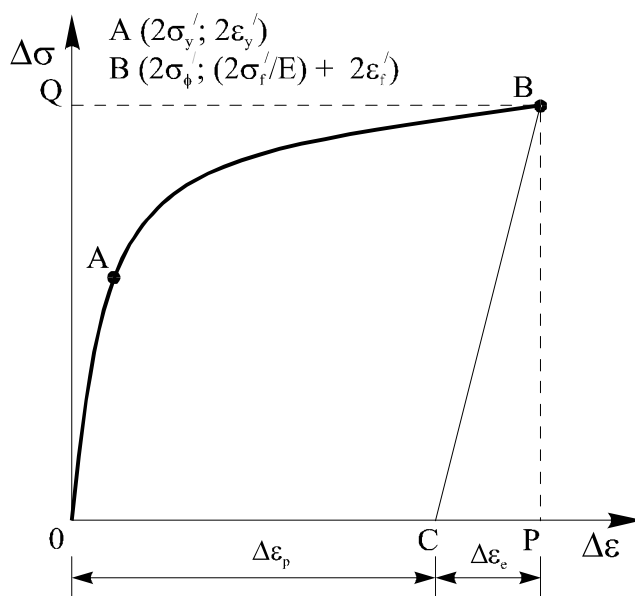
$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{k} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (3)$$

односно,

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{k} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (4)$$

где су: ε_a - амплитуда деформације,
 $\Delta\varepsilon$ - опсег деформације,
 σ_a – амплитуда напона,
 $\Delta\sigma$ - опсег напона,
 E – Young-ov модуо еластичности,
 k' - коефицијент чврстоће при цикличном оптерећењу,
 n' - експонент ојачања.

Једна таква циклична крива напон – деформација је приказана на сл. 1.



Сл. 1 Циклична крива напон – деформација.

Потребни параметри који се у овој анализи користе су: σ_f' , ε_f' , c , b , n' и E , а критеријум је апсорбована енергија до лома. Ова енергија се за случај замора као и за ширење заморне прскотине одређује на основу меродавне цикличне криве напон деформација. На цикличној кривој напон – деформација (сл. 1) су назначене карактеристичне тачке – границом течења, тачка А односно чврстоћом разарања као границом кидања, тачка В, са одговарајућим координатама и то: тачка А ($2\sigma_y$, $2\varepsilon_y = 2\sigma_y/E$) и В ($2\sigma_f'$; $(2\sigma_f'/E)+2\varepsilon_f'$), [2, 3, 4]. При овоме се процес замарања као општији проширује и на област малих бројева циклуса, тј малоциклусни замор, код кога се број циклуса протеже и на тако мали број од само неколико циклуса. Као крајност се може и статички процес разарања при једнократном повећању оптерећења посматрати као специјалан случај замора са једним циклусом односно два полуциклуса до лома. Тада је, дакле, број полуциклуса до лома $2N_f = 1$ а распон напона $\Delta\sigma = 2\sigma_f'$ и распон укупне деформације $\Delta\varepsilon = (2\sigma_f'/E) + 2\varepsilon_f'$. При томе су одговарајуће величине представљене правим вредностима напона и деформације, што је означено едекватним ознакама као и у класичном статичком случају додавањем само у горњем индексу знака ' (прим). Тако се циклична крива меродавна за процесе замарања и ширења заморне прскотине при смањивању броја циклуса у случају малоциклусног замора практично поклапа са одговарајућим величинама из статичке криве затезања приказане преко правих вредности напона и деформације. Из овог услова енергија која се апсорбује до лома при статичком лому једнократним оптерећивањем W_c је дефинисана као површина P_{OABCO} , односно:

$$W_c = P_{OABCO}$$

$$W_c = 2\sigma_f' \left(\frac{2\sigma_f'}{E} + 2\varepsilon_f' \right) - \int_0^{2\sigma_f'} \Delta\varepsilon d(\Delta\sigma) - \frac{1}{2} \left(2\sigma_f' \frac{2\sigma_f'}{E} \right) \quad (5)$$

$$W_c = 4\sigma_f' \varepsilon_f' - \frac{4n'}{1+n'} \left(\frac{1}{k'} \right)^{1/n'} (\sigma_f')^{\frac{1+n'}{n'}} - \frac{2\sigma_f'}{E} \quad (6)$$

Последњи члан $2\sigma_f'/E$ може бити занемарен јер је много мањи од првог члана $4\sigma_f' \varepsilon_f'$, тако да је:

$$W_c = 4\sigma_f' \varepsilon_f' - \frac{4n'}{1+n'} \left(\frac{1}{k'} \right)^{1/n'} (\sigma_f')^{\frac{1+n'}{n'}} \quad (7)$$

и уколико се $(\sigma_f'/k')^{1/n'}$ замени са ε_f' , потребна релација за апсорбовану енергију до лома постаје:

$$W_c = \frac{4}{1+n'} \sigma_f' \varepsilon_f'. \quad (8)$$

5.2 Дефинисање релације за енергију густине деформације

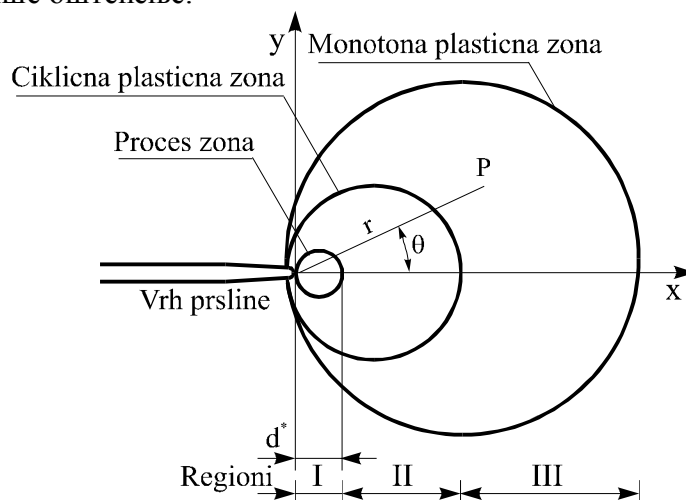
Анализа оштећења при замору базирана на расипању енергије при пластичној деформацији показала се да је да се може искористити за процене века при малоциклусном замору. Пошто је пластична зона око врха прскотине деформисана до вредности као при статичком прекиду, онда се може увести претпоставка, да се та зона понаша као мали мерни узорак у условима малоциклусног замора. Још једна битна чињеница да описивање понашања при ширењу прскотине у условима замора је могуће формулисати као функцију енергије при пластичном деформисању.

Приликом решавања било каквог проблема код ширења прскотине неопходно је познавати геометријске карактеристике елемента структуре. Геометријске карактеристике су дефинисане фактором интензитета напона, који може бити приказан релацијом:

$$K_I = \beta \sigma \sqrt{\pi \cdot a}, \quad (9)$$

где су: σ - номинални напон, β - параметар који може бити представљен функционалном зависношћу

$\beta = \beta (a/w, a/D, a/S, \dots)$, где су w , D и S релевантне димензије посматраног елемента структуре. Одредјивање геометријских карактеристика тј. фактора интензитета напона значи дефинисање функције β за потребно оптерећење и изабрану геометрију елемента структуре са прслином. Област око врха прскотине је подељена у три области. Прва област, одмах око врха прскотине је названа процес зоном. Друга област представља цикличну пластичну зону, а трећа је монотонно пластична зона. У оквиру ове три области око врха прскотине, процес зона је област где се углавном акумулише оштећење.



Сл. 2 Зоне око врха прскотине.

За област око врха прскотине, релације између напона, односно пластичне деформације као функције фактора интензитета напона при цикличном оптерећењу, могу бити приказане као:

$$\Delta\sigma_{ij} = \Delta\sigma'_y \left(\frac{\Delta K_I^2}{\alpha' \Delta\sigma_y'^2 I_{n'} r} \right)^{\frac{n'}{1+n'}} \bar{\sigma}_{ij}(\theta; n') \quad (10)$$

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \frac{\alpha' \Delta\sigma'_y}{E} \left(\frac{\Delta K_I^2}{\alpha' \Delta\sigma_y'^2 I_{n'} r} \right)^{\frac{1}{1+n'}} \bar{\varepsilon}_{ij}(\theta; n') \quad (11)$$

где су: ΔK_I – опсег фактора интензитета напона,
 $I_{n'}$ – бездимензиони параметар који зависи од експонента n' ,
 α' - параметар за који важи релација:

$$\alpha' = \frac{2E}{(2k')^{1/n'} \Delta\sigma_y'^{(n'-1)/n'}} \quad (12)$$

$\bar{\sigma}_{ij}(\theta, n')$ - бездимензиона функција сингуларне расподеле напона,

$\bar{\varepsilon}_{ij}(\theta, n')$ - бездимензиона функција сингуларне расподеле деформације.

У случају када је $\theta = 0$ и множењем левих односно десних страна једначина (10) и (11) могуће је добити за производ еквивалентних напона и одговарајућих еквивалентних деформација у облику

$$\Delta\sigma_{eq} \Delta\varepsilon_{eq} = \frac{\Delta K_I^2 \bar{\sigma}_{eq}(0; n') \bar{\varepsilon}_{eq}(0; n')}{E I_{n'} r} \quad (13)$$

Потребна релација за густину енергије при цикличној пластичној деформацији у J/m^3 у случају да је дефинисан производ еквивалентних напона и деформација $\Delta\sigma_{eq} \Delta\varepsilon_{eq}$ према [2,3,4] има облик :

$$\Delta W_p = \left(\frac{1 - n'}{1 + n'} \right) \Delta\sigma_{eq} \Delta\varepsilon_{eq} \quad (14)$$

односно,

$$\Delta W_p = \left(\frac{1 - n'}{1 + n'} \right) \frac{\Delta K_I^2 \psi}{E I_{n'} r} \quad (15)$$

где је $\psi = \left(\overline{\sigma}_{ij}(0; n') \overline{\varepsilon}_{ij}(0; n') \right)$.

Израз за густину енергије при цикличној пластичној деформацији по јединици запремине (J/m^3) ΔW_p ће сада бити коришћен за дефинисање енергије при пластичној деформацији која је расејана по циклусу и по јединици ширења прскотине ω_p . Израз за ω_p када је позната релација за апсорбовану енергију до лома W_p може бити написан у облику:

$$\omega_p = \int_0^{d^*} \left(\frac{1 - n'}{1 + n'} \right) \frac{\Delta K_I^2 \psi(n')}{E I_{n'} d^*} dr \quad (16)$$

где d^* представља дужину процес зоне око врха прскотине и може бити формулисана као функција опсега фактора интензитета напона ΔK_I и опсега трага фактора интензитета напона ΔK_{th} , као:

$$d^* = \frac{\Delta K_I^2 - \Delta K_{th}^2}{\pi E \sigma_y'} \quad (17)$$

где је ΔK_{th} – параметар који зависи од степена асиметрије циклуса R . У литератури постоје различите релације зависности ΔK_{th} од R , а овде је коришћена:

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0} (1 - R)^\gamma, \quad (18)$$

где је: ΔK_{th0} – опсег фактора прага интензитета напона и γ - константа ($\gamma = 0.72$).

Након интеграције једначине (17), потребна релација за енергију при пластичној деформацији која је расејана постаје:

$$\omega_p = \left(\frac{1 - n'}{1 + n'} \right) \frac{\Delta K_I^2 \psi}{E I_{n'}} \quad (19)$$

Пошто је $\Delta K_I = K_{max} - K_{min}$, онда ако се $K_{max} - K_{min}$ замени са $K_{max} - K_{th}$, релација за ω_p постаје:

$$\omega_p = \left(\frac{1 - n'}{1 + n'} \right) \frac{\psi (K_{max} - K_{th})^2}{E I_{n'}} \quad (20)$$

Познато је да би прслина требало да се продужи за дужину да по циклусу уколико апсорбована енергија у датом циклусу W_c буде једнака енергији расипања при пластичној деформацији у процес зони, односно:

$$W_c \delta a = \omega_p, \quad (21)$$

одакле је:

$$\delta a = \frac{da}{dN_p} = \frac{\omega_p}{W_c}, \quad (22)$$

заменом одговарајућих релација за енергију расипања при пластичној деформацији ω_p и апсорбовану енергију по циклусу, добија се:

$$\delta a = \frac{da}{dN_p} = \frac{(1 - n')\psi}{4 E I_{n'} \sigma_f' \varepsilon_f'} (K_{\max} - K_{th})^2. \quad (23)$$

Једначина (23) представља специјалан случај када је $R = 0$ ($R = K_{\max}/K_{\min}$), а у општем случају $K_{\max} = \Delta K$ и $K_{th} = \Delta K_{th}$.

Из последње релације (23) могуће је добити потребну зависност између ширине прскотине a и броја циклуса N_p , применом интеграције, и то:

$$N_p = 4 E I_{n'} \sigma_f' \varepsilon_f' \int_{a_0}^{a_k} \frac{da}{(1 + n')\psi (\Delta K_I - \Delta K_{th})^2}, \quad (24)$$

где је a_0 – почетна дужина прскотине,

a_k – крајња дужина прскотине.

Једначина (23) ће бити коришћена да се предвиди функционална зависност између da/dN_p и ΔK , а за предвидјање века при ширењу прскотине ће се употребити релација (24).

У функционалној зависности која је приказана релацијом (24) као константе фигуришу само оне које су потребне и код дефинисања цикличне криве напон деформација, а то су E , σ_f' , ε_f' , n' , тако да се не захтевају додатна експериментална истраживања. На основу претходно реченог за овакав приступ се може рећи да знатно скраћује време, а и материјалне трошкове приликом прорачуна, јер није потребно изводити додатне експерименте већ користити доступне параметре за цикличну криву.

6. НАЧИН РЕАЛИЗАЦИЈЕ И МЕСТО ПРИМЕНЕ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

На основу развијене методологије и приказаних релација развијен је софтверски пакет под називом “P2_GED” [16] за прорачун преосталог века конструкције.

7. МОГУЋНОСТ ПРИМЕНЕ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

За примену методологије потребно је извршити експериментална испитивања материјала да би се добили подаци који улазе у прорачун. То су уствари цикличне карактеристике материјала из домена малоциклусног замора.

ПРИЛОЗИ:

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Sehitoglu H., Gall K., Garcia A. M., Recent advances in fatigue crack growth modeling, *Int J Fract* 80 1996, pp. 165-192.
2. Janković D. M.: O hipotezama energetskog kriterijuma zamora metala, Tehnika, Mašinstvo 43, Beograd. 1994, str. M9-M14.
3. Janković D. M.: Malociklusni zamor, monografija, Mašinski fakultet, Beograd, 2001, str. 121.
4. Janković D. M.: About some various interpretation of fatigue criterion at low number of strain cycles, *Facta Universitatis, Series Mechanical engineering*, Vol. 1, 2001.
5. Komnenovic M., Maksimovic, S., Ristić, D., The Methodology for Initial Failure and Fracture Mechanics Analysis, WSEAS TRANSACTIONS on APPLIED and THEORETICAL MECHANICS, Issue 2, Volume 1, 2006, pp 133-140.
6. Ellyin F., Fatigue damage, crack growth and life prediction. *Fracture Mech.* 48 (1) 1997, pp. 9-15 Chapman & Hall.
7. Izumi Y., Fine M. E., Mura T., Energy consideration in fatigue crack propagation, *Int. J Fract.* 17 (1) 1981, pp. 15-25.
8. Ellyin F., Crack growth rate under cyclic loading and effect of different singularity fields, *Eng. Fract. Mech.* 25 (4) 1986, pp. 463-473.
9. Antolovich S. D., Saxena A., Chanani G. R., A model for fatigue crack propagation, *Eng. Fract. Mech.* 7, 1975, pp. 649-652.
10. Kujawaski D., Ellyin F. A., Fatigue crack propagation model, *Eng Fract Mech* 20 (5/6) 1984, pp. 695-704.
11. Li D. M., Nam W. J., Lee C. S., An improvement on prediction of fatigue crack growth from low cycle fatigue properties, *Eng. Fract. Mech.* 60 (4) 1998, pp. 397-406.
12. Radhakrishnan V. M. *Int J Fatigue* 12 (6) 1990, pp. 513.
13. Chand S., Gard S. B. L., Crack propagation under constant amplitude loading, *Eng Fract Mech* 21 (1) 1985, pp.1-30.
14. Stephens R. L., Chung J. H., Fatemi A., Lee H. W., Lee S. G., Vacaleas C., Wang C. M., Constants and variable amplitude fatigue behavior of five cast steel at room temperature and 45° C. *Trans ASME J Eng Mater Tech* 106; 1984, pp. 25-37.
15. Maksimović, S., Life assessment methods of initial damaged structures under general loading spectrum, IFMASS 10 „Fundamentals of fracture mechanics and structural integrity assessment methods“ 23-26 june 2008, .
16. Maksimović K., **P2_GED**: Program za procenu preostalog veka elemenata konstrukcija sa inicijalnim prskotinama na bazi gustine energije deformacije, 2008, Tehnički izveštaj.
17. Milosavljević D., Bogdanović, G., Veljović LJ., Radulović, J.: Ortotropni kompozit modeliran pomoću dve familije vlakana, Zbornik radova, TEIK 2010, ISBN 978-86-80295-86-2, knjiga 2, Niš, 2010, p.p. A-235, A-242.
18. MSC/NASTRAN Manual.