

ДОКУМЕНТАЦИЈА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

„Софтвер за замор“

Аутори техничког решења

- *Др Мирослав Живковић, ред. проф.*
- *Др Снежана Вуловић, доцент*
- *Др Гордана Јовичић, доцент*
- *Др Никола Миливијевић, доцент*
- *Др Бобан Стојановић, доцент*

Наручилац техничког решења

- Министарство за науку Републике Србије
- ЈП Електро–Привреда Србије

Корисник техничког решења

- ЈП Електро–Привреда Србије

Година када је техничко решење урађено

- 2005-2007

Област технике на коју се техничко решење односи

- Рачунска механика

1. Опис проблема који се решава техничким решењем

Техничко решење (софтвер РАК-FAT) припада области научно-техничких услуга, пројектовање и развој компјутерског софтвера. Софтвер се односи на замор материјала, тј. садржи модул за високоциклични замор материјала, модул за анализу нискоцикличног замора материјала и модул за моделирање раста прслине и процену преосталог радног века (преостале чврстоће) у присуству оштећења. Процена преосталог радног века је заснована на постпроцесирању резултата деформација и напона, који су добијени применом методе коначних елемената (МКЕ) за конкретну конструкцију.

Већина постројења која се користе у транспортној индустрији, електропривреди, процесној индустрији су изложени цикличном оптерећењу и раду на високим температурама. Корисници ових постројења су заинтересовани за што је могуће прецизнијом дефиницијом интегритета конструкције и преосталог радног века компоненти, како би постројење експлоатисали на економски најприхватљивији начин. Врло је значајна процена преосталог радног века конструкције после редовног ремонта када се открију прслине на конструкцији.

2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења

Нагли развој нумеричких метода за прорачун компоненти и симулацију услова експлоатације је последица могућности које пружају савремени компјутери великог капацитета, али и доступних података о експлоатацији и о стању материјала компоненти које се анализирају. Данас у свету постоји велики број софтвера за оцену интегритета и преосталог века базираних на методи коначних елемената: MSC FATIGUE, NASGRO, FATKRAK.

3. Суштина техничког решења

На основу савремених научних сазнања из области прорачуна конструкција и замора материјала развијен је домаћи софтвер за одређивање напонског стања на основу којих се врши прорачун преосталог радног века конструкције. У софтвер су имплементирани модули за анализу високо цикличног, нискоцикличног замора материјала и заморног раста прслине заснованих који у пост-процесирању користе резултате добијене анализом методом коначних елемената конструкције.

Развијени софтвер је једноставан за употребу и подржан комплетном пратећом документацијом, одржавањем и обуком, са могућношћу брзе доградње модула по захтеву корисника. Посебно је значајно то што развијени софтвер у изворном коду може бити доступан заинтересованим истраживачима како у нашој земљи тако и у иностранству за потребе даљих истраживања.

4. Детаљан опис техничког решења (укључујући и пратеће илустрације и техничке цртеже)

Извршене су теоријске анализе: високоцикличног (S-N) замора материјала; начина одређивања и ограничења (S-N) криве и утицаја средњег напона; утицаја фактора који утичу на заморни живот (димензије, тип оптерећења, завршна обрада); нискоцикличног (ϵ -N) замора материјала; монотоног напонско-деформационог понашања материјала; цикличног напонско-деформационог понашања материјала; примене (ϵ -N) криве и

прелаза из нискоцикличног у високоциклични замор; корекције Morrow-а и S-W-T-а услед средњег напона; методе "Rain Flow" за бројање циклуса код стохастичких оптерећења. Потом је извршена теоријска анализа методологија за прорачун замора материјала: правило линеарне акумулације оштећења (MINER'S-ово правило); модел преостале чврстоће (Residual Strength Based Model); модел преостале крутости услед замора материјала (Residual Stiffness Based Model).

Извршена је класификација критеријума за процену заморног простирања прслина: Парис-ов закон простирања прслине; Kobayashi-јев закон простирања прслине; Tanaka-ин закон простирања прслине; Sih-Barthelem-ијев закон простирања прслине; Nisitani-Goto-ов закон простирања прслине; Klensil-Lukas-ев закон простирања прслине.

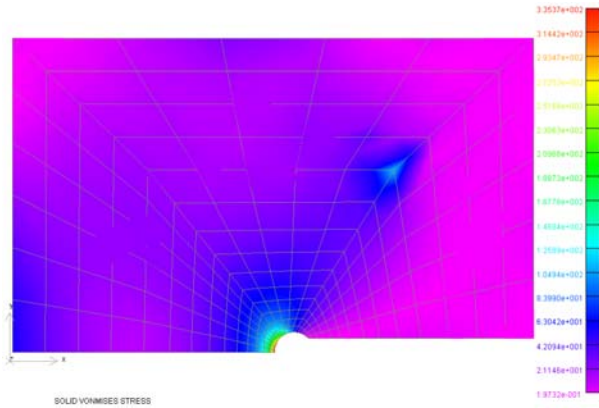
На основу теоријских разматрања развијен је софтвер за замор материјала PAK-FAT. Развијени софтвер садржи модул за високоциклични замор материјала који у пост-процесирању користи резултате добијене статичком анализом методом коначних елемената. Такође, развијен софтвер садржи модул за анализу нискоцикличног замора материјала који у пост-процесирању користи резултате добијене термо-еласто-пластичном анализом методом коначних елемената. Развијени софтвер садржи модул за моделирање раста прслине и процене преосталог радног века (преостале чврстоће) у присуству оштећења. Анализа заморног раста прслине може се спроводити за случај монотоног и комбинованог оптерећења конструкције.

У току развоја софтвера урађен је велики број теоријских примера из замора материјала, са циљем да се верификују нумерички резултати добијени софтверским пакетом PAK-FAT. Епрувета са отвором је један од примера коришћених за верификацију прорачуна радног века при високоцикличном замору (S-N анализа) при дејству монотоног цикличног оптерећења. Прво је извршена линеарна статичка анализа модела. Добијени резултати за напон линеарном статичком анализом (слика 1) користе се за S-N анализу. При нумеричком прорачуну израчунава се преостали број циклуса до отказа за сваки чвор модела према следећој формули

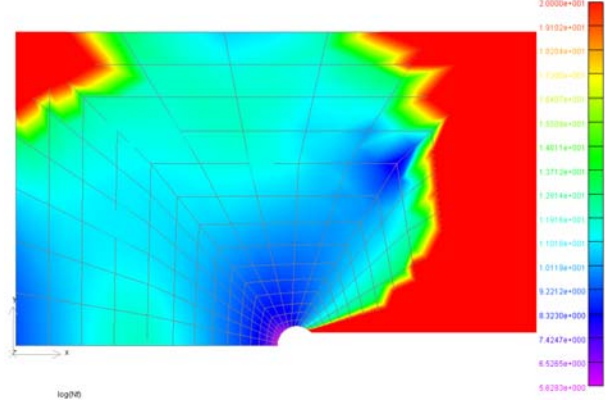
$$\log(\Delta S) = \log(SR/1) + b_1 \log(N_f)$$

где је ΔS је опсег напона. Опсег напона зависи од оптерећења. У овом примеру разматрамо пуно променљиво оптерећење (средњи напон је једнак нули). За нумеричко израчунавање $\Delta S = S_i * (Max - Min)$, где су Max и Min максимална и минимална вредност напона, а S_i добијена вредност напона у чвору. Аналитичко решавање се користи у циљу брзог добијања века конструкције на основу максимално израчунатог напона конструкције.

Добијене вредности за $\log(N_f)$ могуће је графички представити (слика 2). У табели 2 приказано је поређење решења добијених програмским пакетима MSC Fatigue и PAK-FAT.



Слика 1. Поље ефективног напона у епрувети



Слика 2. $\text{Log } N_f$

Табела 2. Упоредни резултати ($\text{log}N_f$)

MSC FATIGUE	5.65
PAK-G	5.63

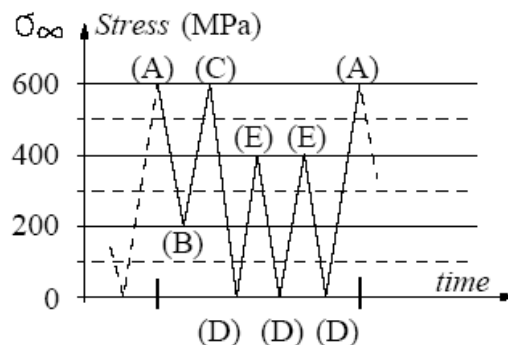
Нискоциклични замор епрувете изложене цикличном оптерећењу је примером је прорачун века при нискоцикличном замору (ϵ -N анализа). Епрувета је оптерећена поновљеним секвенцама (низом) оптерећења са номиналним напонем σ_∞ према слици 3. Епрувета има жљеб са одређеним фактором концентрације напона и фактором осетљивости на зарез (*fatigue notch factor*). Под претпоставком да за материјал важи следећа релација за циклично напонско-деформациону криву (за амплитуду и прираштај, респективно)

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (\text{или } \Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}})$$

и применом једначине Neuber-ове хиперболе

$$\sigma_a \cdot \epsilon_a = \frac{K_f^2 \cdot \sigma_\infty^2}{E} \quad (\text{или } \Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon = \frac{K_f^2 \cdot (\Delta\sigma_\infty)^2}{E})$$

може се одредити: а) напон и деформација око жљеба који су потребни за анализу замора (тј. максимална и амплитудна деформација око жљеба) и б) очекиван број циклуса до лома (очекиван број секвенци оптерећења до отказа) испитиване епрувете.



Слика 3. Номинални напон σ_∞

Карактеристике материјала при цикличном оптерећењу неопходне за прорачун су: коефицијент заморне јачине (МПа) σ_f' ; експонент заморне јачине В; коефицијент заморне истегљивости ε_f' ; експонент заморне истегљивости С; Youngov модул (МПа) Е; експонент цикличног ојачања N'; коефицијент цикличног ојачања K'.

У циљу поређења резултата добијених развијеним нумеричким поступком дато је прво аналитичко решење из литературе (Т Dahlberg and А Ekberg: Fatigue and Fracture Design – An Introduction (Chapter 6) LiTH-IKP-S-493 (Linköping University and Chalmers University)). Аналитички израчунате вредности за напоне и деформације у карактеристичним тачкама дате су у табели 3.

Табела 3.

циклус	бр. циклуса	σ_{min}	σ_{max}	σ_{mean}	σ_{ampl}	ε_{min}	ε_{max}	ε_{mean}	ε_{ampl}
A-B-C	1	1	999	500	499	0.006078	0.010943	0.008510	0.002433
C-D-A	1	-439	999	280	719	0.003347	0.010943	0.007145	0.003798
D-E-D	2	-439	559	60	499	0.003347	0.008212	0.005780	0.002433

Број циклуса до отказа N за сваки случај оптерећења добија се итеративним решавањем Morrow-е релације

$$\varepsilon_{ampl} = \frac{\sigma_f' - \sigma_{mean}}{E} (2N)^b + \varepsilon_f' (2N)^c$$

Заменом одговарајућих вредности из табеле 3., у претходни израз добијамо број циклуса до отказа за сваки од датих случајева оптерећења. За А-В-С добијамо N1=63650; за С-Д-А N2=20335 и за Д-Е-Д N3=195400. Акумулирано оштећење из једне секвенце је

$$D = \frac{1}{63650} + \frac{1}{20335} + \frac{2}{195400} = \frac{1}{13320}$$

Одавде, очекивани број секвенци до отказа је $S = 1/D = 13320$.

Применом развијеног софтвера код комбинованог оптерећења прво се одређује напон и деформација у материјалу посматране епрувете и преостали број циклуса до лома за сваки циклус у секвенци, на крају се одређује укупно оштећење и број секвенци до отказа. Прорачунато укупно оштећење је 0.000075 а очекиван број секвенци је 13333. Резултат добијен развијеним нумеричким поступком одступа 1.0% у односу на решење дато у литератури.

При прорачуну заморног раста прслине софтвер PAK-FAT пружа могућност да се користе следећи закони раста прслине: Парисов закон раста, Кориговани Парисов закон и Walker-ов закон раста. Претходно наведени закони пружају могућност процене стабилног раста прслине. За овакав облик прорачуна развијена је могућност да се фактор интензитета напона може добити на следеће начине: а) интерполациом нумеричких вредности фактора интензитета напона за задате дужине прслине и б) аналитичким путем, при чему се користи принцип 'аутономности прслине'. Као мера материјалног одговора при прорачуну заморног раста прслине, коришћењем софтвер PAK-FAT, добија се зависност а) брзине раста прслине (da/dN) у функцији фактора интензитета напона (dK) б) дужина прслине (a) у функцији броја циклуса (N) или времена (t).

У следећем примеру илустровано је нумеричко одређивање преостале чврстоће конструкције при дејству монотоног оптерећења. Поље оплате дебљине t садржи елиптичну централну прслину полуоса а и с. Оплата је изложена оптерећењу које варира у интервалу од $0.5\sigma_{\infty}$ до σ_{∞} . Извршена је процена преостале чврстоће поља оплате применом Парис-овог и Walker-овог закона за заморни раст прслине. Да би се применио неки од претходних закона, неопходна је провера величине пластичне зоне око прслине. Претпоставља се да прслина задржава свој облик при пропагацији. Подаци, неопходни за решавање проблема су: полуосе елиптичне прслине: а и с; дебљина оплате t; напон течења σ_y ; амплитуда прага жилавости (жилавост при којој долази до иницијализације

процеса раста пррлине) ΔK_{th} ; жилавост лома K_{IC} ; динамички параметри раста пррлине: m , C , γ ; примењени напон σ_∞ ; амплитуда оптерећења $\Delta\sigma_\infty$; степен сигурности s .

При нумеричком прорачуну, у овом примеру, усвојен је принцип аутономности пррлине који подразумева да, током раста, пррлина задржава свој облик и да она не зависи од облика конструкције у којој се појавила. Прво се проверава да ли долази до појаве раста пррлине. У том случају, неопходно је дефинисати амплитуду FIN-а која одговара почетној дужини пррлине:

$$\Delta K_I = 0.823 \Delta \sigma_\infty \sqrt{\pi a_0} .$$

Проверава се да ли је $\Delta K_I > \Delta K_{th}$ ако јесте започеће раст пррлине. Након овог корака неопходна је провера важења теорије линеарно еластичне механике лома. Потребно је дефинисати критичну дужину пррлине која одговара максималној вредности жилавости лома користећи следећу релацију:

$$a_c = \left(\frac{K_{I\max}}{Y\left(\frac{a}{c}\right)\sigma_\infty} \right)^2 \frac{1}{\pi} .$$

Аналитичке вредности заморног раста пррлине се добијају интеграцијом релација у облику:

$$\int_{a_0}^{a_{cr}} \frac{1}{(\sqrt{a})^m} da = \int_0^N C \left(Y\left(\frac{a}{c}\right) \Delta \sigma \sqrt{\pi} \right) dN ,$$

за Парис-ов, односно за Walker-ов закон у облику:

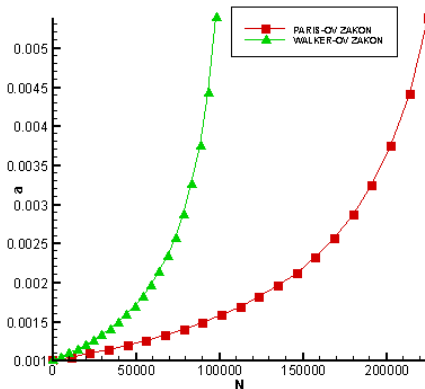
$$\int_{a_0}^{a_{cr}} \frac{1}{(\sqrt{a})^m} da = \int_0^N \frac{C_1}{(1-R)^{m(1-\gamma)}} \left(Y\left(\frac{a}{c}\right) \Delta \sigma \sqrt{\pi} \right) dN .$$

Аналитичке вредности добијене претходним релацијама упоређене су са нумеричким резултатима добијеним применом имплементираног алгоритма и приказане у табели 4.

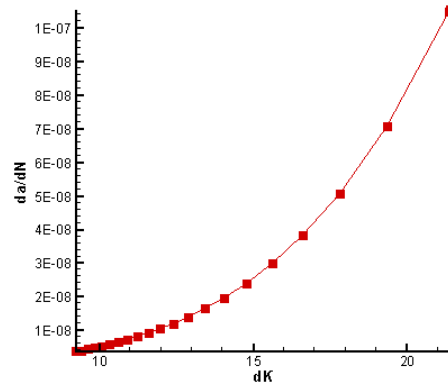
Табела 4. Број циклуса N до лома

Парис	ПАК-FAT	Walker	ПАК-FAT
224940	225170	97900	98020

На слици 4 упоредно су приказани резултати раста пррлине добијени применом Парис-овог и Walker-овог закона раста у оквиру нумеричке процедуре. Брзина раста пррлине добијена нумеричком интеграцијом приказана је на слици 5. Нумеричка интеграција је вршена са усвојеним инкрементом раста броја циклуса од $\Delta N = 100$. Одступање нумеричких од аналитичких вредности, у процени преостале чврстоће износи око 0.1%.



Слика 4. Дијаграм преостале чврстоће оплате са елиптичном пррлином



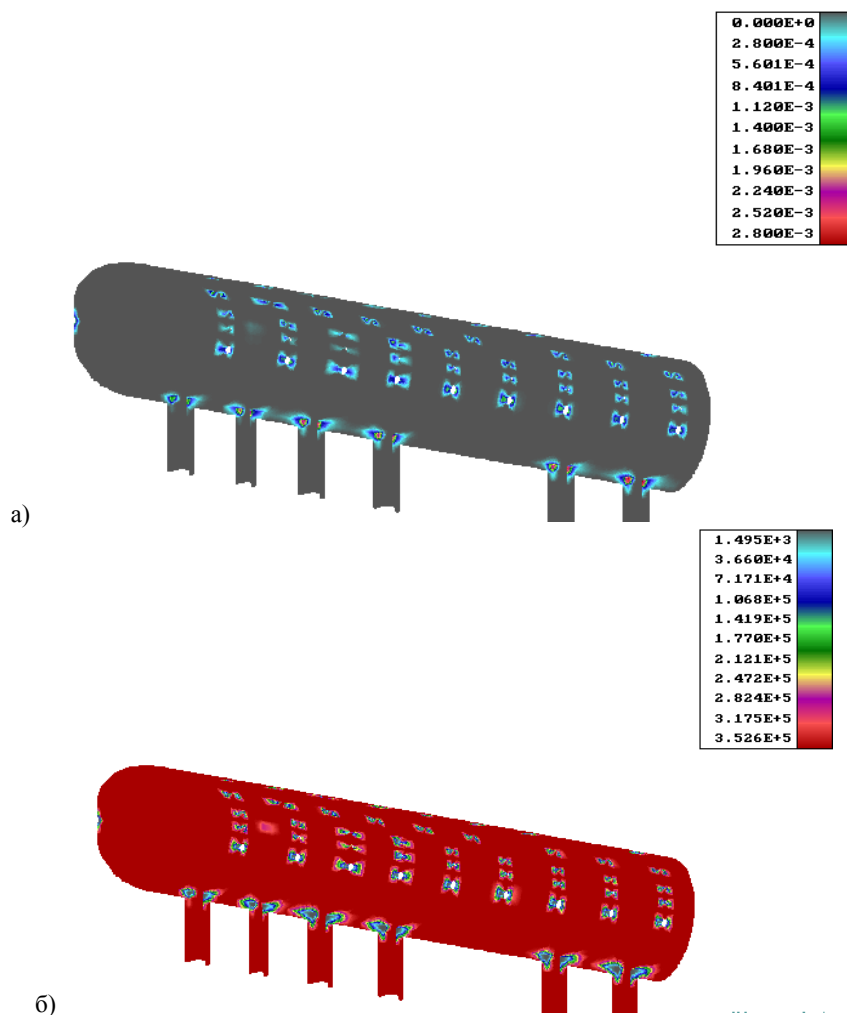
Слика 5. Брзина раста елиптичне пррлине у пољу оплате

Као што се види из табеле 4 и са слике 4 евидентна је значајна разлика у процени преостале чврстоће при коришћењу Парис-овог и Walker-овог закона, и она износи 56%. Процењена вредност добијена применом Парис-овог закона је знатно већа јер ова формулација не узима у обзир утицај средњег напона на преосталу чврстоћу.

После верификације на тест примерима који су једноставни али у пракси неопходни за верификацију софтвера, софтвера је примењен за анализу реалних конструкција термо-блокова ЕПС-а. Од реалних конструкција, до сада је урађена процена века трајања више бубњева на основу прорачуна нискоцикличног замора. Урађена је термо-еласто-пластична нумеричка анализа бубња и извршена процена његовог преосталог радног века на основу максималних пластичних деформација, слика 6.

Развијени софтвер је инсталиран у термоелектранама ЕПС-а и извршена је обука инжењера којима су издати сертификати. Упутство за примену софтвера PAK-FAT урађено је по узору на упутства светски признатих софтвера као што су: MSC FATIGUE, NASGRO, ANSYS, COSMOS.

Софтвер PAK-FAT је расположив за комерцијалну употребу, на домаћем и страном тржишту, у индустрији и на техничким факултетима за потребе истраживања и едукације.



Слика 6. Процена преосталог радног века бубња: а) поље ефективне пластичне деформације на унутрашњој површини, б) број циклуса до појаве оштећења на унутрашњој површини

5. Литература

1. MSC.Fatigue, User's Manual.
2. NASGRO, User's Manual.
3. М. Живковић, Извештај пројекта TP6204 - Развој софтвера за анализу чврстоће и процену радног века конструкције за корисника – Министарство за науку Републике Србије, 2007.
4. Вехауц А. са сарадницима, Којић М. са сарадницима, Процена преосталог радног века бубња ТЕ “Никола Тесла” А-2, 210 MW, Студија, мај 2000.
5. Vehauc A., Kojić M., Živković M. and Jovanović Z., (2000), *Assessment of the Remaining Lifetime of the Drum in Thermal Power Plant*, Tehnika, 55, 81-84, Yugoslavia. (in Serbian).
6. Jovičić G., Živković M., Kojić M., Vulović S., *A Numerical Procedure for Calculation of the Stress Intensity Factors and Its Use for Life Assessment of the Steam Turbine Housing of the Thermal Power Plant*, Eight International Fracture Mechanics Summer School held in Belgrade - IFMASS 8, 23.-27. Jun 2003, monograph, 321-332.
7. Živković M., Jovičić G., Vulović S., Đorđević N., *Residual life-time estimation of thermal plant component*, 12. Simpozijum termičara, Sokobanja, 18.-21. oktobar 2005., 1-6.
8. G. Jovicic, M. Zivkovic, N. Jovicic, *Stress Intensity Factor Calculation for Steam Turbine Housing in the Thermal Power Plant*, Machine Design Monography, 2007.
9. Живковић М., Вуловић С., Којић М., Ђорђевић В., Биљановски Ђ., Јаковљевић А., Ковачевић Б., *Утицај моделирања на процену преосталог радног века бубња термоелектране*, Саветовање са међународним учешћем ИБР 2002 „Европски трендови – примена у Југославији“; Тара, 25-29. Новембар 2002, 283-290.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Крагујевцу бр 01-1/1128-14 од 22.04.2010. године именовани смо за рецензенте техничког решења:

„Софтвер за замор“-РАК-ФАТ

аутора: Мирослав Живковић, Снежана Вуловић, Гордана Јовичић, Никола Миливојевић, Бобан Стојановић. На основу предлога овог техничког решења подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

Техничко решење „Софтвер за замор“ - РАК-ФАТ аутора: Мирослав Живковић, Снежана Вуловић, Гордана Јовичић, Никола Миливојевић, Бобан Стојановић, реализован 2005-2008 године, приказан је на 8 страница формата А4, писаних 11 фонтом, 1 проредом, садржи 6 слика. Састављено је следећих поглавља:

1. Опис проблема који се решава техничким решењем
2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења
3. Суштина техничког решења
4. Детаљан опис техничког решења теоријске основе као и верификациони пример (укључујући и пратеће илустрације)
5. Литература

Техничко решење припада области научно-технолошких услуга, пројектовање и развој компјутерског софтвера (класа 42).

Наручилац техничког решења је ЈП ЕЛЕКТРО-ПРИВРЕДА СРБИЈЕ, реализовано је у оквиру рада на пројекту: *Развој софтвера за прорачун преосталог радног века до лома основне опреме термоблокова ЕПС-а методама механике лома, 2005-2007,*

као и Министарство за науку Републике Србије, у оквиру пројекта: *Развој софтвера за анализу чврстоће и процену радног века конструкције, ТР6204, 2005-2007.*

Примена предложеног техничког решења реализована је у ЈАВНОМ ПРЕДУЗЕЋУ ЕЛЕКТРО-ПРИВРЕДА СРБИЈЕ

МИШЉЕЊЕ

Аутори техничког решења „Софтвер за замор“ - РАК-ФАТ су јасно приказали, теоријски обрадили и имплементирали комплетну структуру техничког решења. Предложени софтвер написан је на основу стандардних и новијих теоријских формулација из нискоцикличног и високоцикличног замора, као и заморног раста прслине. Развијени софтвер за замор материјала ће се примењивати у циљу:


- аутоматизације прорачуна преосталог радног века конструкције до лома
- увођења недеструктивних метода процене преосталог века посматраних конструкција до лома
- веће поузданости тражених резултата.

На основу описа техничког решења могу се донети следећи закључци:

1. Развијени софтвер РАК-ФАТ у поређењу са другим комерцијалним софтверима који су били доступни, има сличне могућности и даје поуздане резултате при нумеричким прорачунима.
2. Упутство је урађено по узору на упутства познатих произвођача комерцијалних софтвера, а која подразумевају: теоријске поставке, упутства за коришћење софтвера, као и упутства са урађеним примерима. Треба нагласити да је у оквиру теоријских основа дат шири преглед теорије, са циљем да корисник лакше савлада суштину развијеног софтвера и лакше га примењује.
3. Велики број решених примера развијеним софтверским пакетом РАК-ФАТ и упоређивање резултата са резултатима добијеним коришћењем познатих светских софтверских пакета, показују велике могућности програма РАК-ФАТ и поузданост његове примене у решавању сличних реалних проблема. Такође, развијени софтвер даје могућност нумеричког прорачуна преосталог века конкретних конструкција термо-блокова ЕПС-а.
4. Поседовање сопственог софтвера омогућава његов даљи развој и прилагођавање условима за које је развијен, па тиме и поузданије резултате у примени.

Дакле, „Софтвер за замор“ - РАК-ФАТ има значајно место као недеструктивна методологија у анализи интегритета конструкција. Са задовољством предлажемо да се „Софтвер за замор“ - РАК-ФАТ прихвати као ново техничко решење.

17.05.2010., у Крагујевцу


Др Александар Седмак, ред. проф.


Др Драгослав Шумарац, ред. проф.



Универзитет у Крагујевцу
Машински факултет у Крагујевцу
Број : **ТР-21/2010**
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 „Софтвер за замор-ПАК-ФАТ“, аутора **Др Мирослава Живковића, Др Снежане Вуловић, Др Гордане Јовичић, Др Николе Миливојевића, Др Бобана Стојановића.**

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 Александар Седмак, ред. проф., Машински факултет Београд,**
2. **Др Драгослав Шумарац, ред. проф., Грађевински факултет Београд**

Достављено:

Ауторима

Архиви

ДЕКАН МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Др Мирослав Бабић, ред. проф.