

ДОКУМЕНТАЦИЈА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

„Софтвер за рачунску механику лома“

Аутори техничког решења

- *Др Мирослав Живковић, ред. проф.*
- *Др Гордана Јовичић, доцент*
- *Др Милош Којић, ред. проф. у пензији, дописни члан САНУ*
- *Др Радован Славковић, ред. проф.*
- *Др Ненад Грујовић, ред. проф.*
- *Др Снежана Вуловић, доцент*

Наручилац техничког решења

- ЈП ЕЛЕКТРО-ПРИВРЕДА СРБИЈЕ
- Министарство за науку Републике 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 ПАК-ФМ, припада области научно-техничких услуга, пројектовање и развој компјутерског софтвера. Софтвер се односи на дефинисање основних параметара механике лома попут: J-интеграла и фактора интензитета напона који се користе као основни параметри у процени интегритета конструкција у којима је уочена иницијална прслина. Одређивање основних параметара механике лома је засновано на постпроцесирању деформационог и напонског поља у околини прслине, који су добијени применом методе коначних елемената (МКЕ) за конкретну конструкцију.

Већина постројења која се користе у транспортној индустрији, електропривреди, процесној индустрији су изложени променљивом оптерећењу и раду на високим температурама. Корисници ових постројења су заинтересовани за што је могуће прецизнијом дефиницијом интегритета конструкције како би постројење експлоатисали на економски најприхватљивији начин.

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

Развијени софтвер је на нивоу познатих светских софтвера (PATRAN, NASTRAN, ANSYS). Код већине комерцијалних софтвера прорачунска механика лома се заснива на употреби контурног J-интеграла. Примена J-интеграла је опште прихваћена прорачунска методологија у процени интегритета конструкција. Међутим, при прорачуну параметара механике лома код сложених 3Д конструкција, интегралање по контури може да буде врло компликована процедура за кориснике софтвера и може довести до грешака. Стога је превођење контурног интеграла у површински за 2Д, тј., запремински интеграл за 3Д проблеме посебно битна процедура са прорачунске тачке гледишта.

При развоју софтвера ПАК-ФМ уместо контурног J-интеграла, који је имплементиран у већини комерцијалних софтвера, коришћен је J-ЕДИ интеграл, као нова теоријско-нумеричка методологија, којом се олакшава и убрзава процедура припреме модела за прорачун параметара механике лома, тј., фактора интензитета напона. Применом J-ЕДИ методе избегавају се потенцијалне грешке које корисник софтвера може да направи у припреми података за прорачун око 3Д прслине.

3. Суштина техничког решења

Фактор интензитета напона (ФИН) је неопходна физичка величина при процени интегритета конструкције, у којој је уочено постојање прслине. Фактори интензитета напона се за једноставне конфигурације прслине, као и за једноставна напонска стања могу одредити аналитичким методама механике лома. Међутим, примена аналитичких решења при сложеним геометријским конфигурацијама прслине као и при сложеним напонским стањима може довести до грешака у процени вредности фактора интензитета напона. Из тог разлога је примена методе коначних елемената (МКЕ) у механици лома неминовна.

На основу савремених научних сазнања из области прорачуна конструкција, механике лома и замора материјала развијен је домаћи софтвер за дефинисање основних параметара механике лома на основу којих се врши прорачун преосталог радног века конструкције. Под основним параметрима механике лома подразумевамо факторе интензитета напона за модове I и II у 2Д и I, II и III у 3Д проблемима. У софтвер су имплементирани најсавременије нумеричке методе (QR елементи, J-ЕДИ метода и др.) за решавање проблема механике лома реалних конструкција.

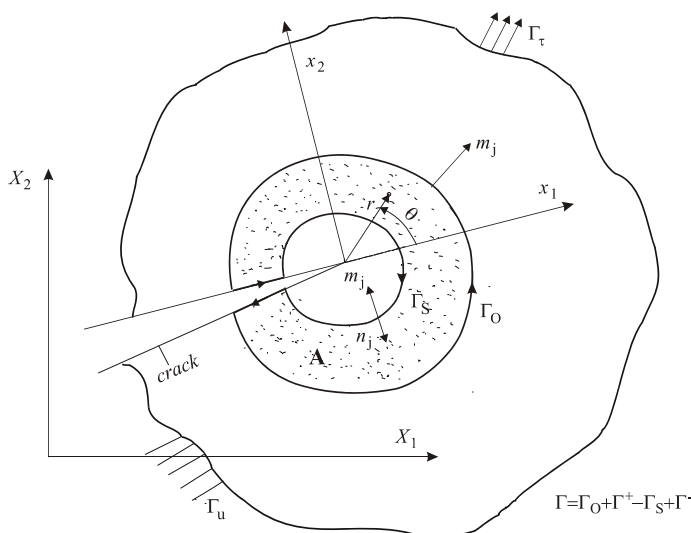
Развијени софтвер је једноставан за употребу и подржан комплетном пратећом документацијом, одржавањем и обуком, са могућношћу брзе доградње модула по захтеву корисника. Посебно је значајно то што развијени софтвер у изворном коду може бити доступан заинтересованим истраживачима како у нашој земљи тако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

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

Развоју софтвера претходила је детаљна теоријска анализа заснована на примени J-ЕДИ методе. Као што је предходно наглашено контурни J-интеграл:

$$J_k = \lim_{\Gamma_S \rightarrow 0} \int_{\Gamma_S} (W \delta_{kj} - \sigma_{ij} u_{i,k}) n_j d\Gamma, \quad i, j, k = 1, 2, \quad (1)$$

није најбоља форма за нумеричке прорачуне методом коначних елемената. Из тог разлога се контурни интеграл (1) преводи у интеграл са еквивалентним доменом интеграције. Метод еквивалентног домена интеграљења (Equivalent Domain Integral method EDI) је алтернативни начин за нумерички развој J-интеграла и као такав нашао је широку примену што сведочи читав низ различитих истраживача који су развијали J интеграл ЕДИ методом: Gosz [1], Lin [2], Dolbow [3], Enderlein [4]. Контурни интеграл се замењује интегралом са коначним димензијама интеграљења. Једна од предности у ЕДИ приступу у односу на контурну интеграцију је могућност лаког укључивања запреминских сила у J-интеграл.



Слика 1. Превођење контурног у интеграл еквивалентног домена интеграције

Стандардни контурни интеграл дат релациом (1) увођењем тежинске функције $q(\mathbf{x}) = q(x_1, x_2)$ и применом дивергентне теореме може бити преформулисан у следећи израз:

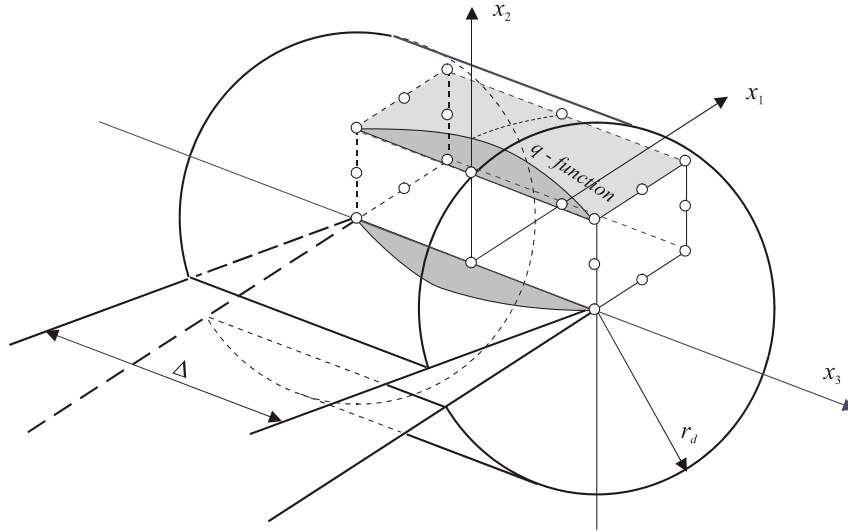
$$J_k = \int_A (\sigma_{ij} u_{i,k} - W \delta_{kj}) q_{,j} dA + \int_A (\sigma_{ij} u_{i,k} - W \delta_{kj})_{,j} q dA \quad (2)$$

где је са A означена површ ограничена контуром Γ_0 (слика 1).

У 3Д случају J-ЕДИ се конвертује у запремински интеграл:

$$J_k = -\frac{1}{f} \int_V (W \delta_{kj} - \sigma_{ij} u_{i,k}) q_{,j} dV \quad (3)$$

где је $f = (2/3)\Delta$, са Δ је означена дебљина 3Д елемента у правцу фронта прслине (видети слику 2).



Слика 2. Еквивалентни домен интеграције у 3Д случају и расподела тежинске функције q по 3Д елементу

У 3Д проблемима контурни интеграл постао би површински при чему површина окружује неки део фронта прслине (нпр., површина цилиндра на слици 2), у том случају селекција површина би била много тежа него селекција контура у 2Д простору. Из тог разлога конверзија површинског у запремински интеграл, релација (3), је од посебног значаја за решавање 3Д-проблема. Конвертовани интеграл тј., запремински интеграл (3) се развија преко скупа елемената, док крути регион (запремина цилиндра на слици 2) обавезно мора да садржи део фронта прслине.

J-ЕДИ метода је заснована на теорији виртуалне екстензије прслине, а концепт виртуалног померања чворова је дефинисан преко вредности тежинске функције $q(\mathbf{x})$, која се још назива и функција премештања. Домен интеграције, домен A (слика 1) за 2Д проблеме тј., домен V (слика 2) за 3Д проблеме, претставља скуп чворова који се померају круто.

Код изопараметарске формулације коначних елемената дистрибуција тежинске функције $q(\mathbf{x})$ унутар елемента може бити одређена применом стандардне интерполационе шеме :

$$q(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^P N_i Q_i \quad (4)$$

где је: N_i интерполациона функција; Q_i вредност тежинске функције у чворовима елемента; P је број чворова по елементу.

Дискретизовани облик J-ЕДИ интеграла у 2Д простору може се написати у облику:

$$J_k = \sum_{\substack{\text{elements} \\ \text{in } A}} \sum_{p=1}^P \left[\left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial X_k} - W \delta_{kj} \right) \frac{\partial q}{\partial X_j} \det \left(\frac{\partial X_m}{\partial \eta_n} \right) \right] w_p, i, j, k, m, n = 1, 2 \quad (5)$$

док се за 3Д проблеме дискретизована форма једначине (3) може написати у облику:

$$J_k = \frac{1}{f} \sum_{\substack{\text{elements} \\ \text{in } V}} \sum_{p=1}^p \left[\left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial X_k} - W \delta_{kj} \right) \frac{\partial q}{\partial X_j} \det \left(\frac{\partial X_m}{\partial \eta_n} \right) \right] w_p \quad i, j, k, m, n = 1, 3 \quad (6)$$

Изрази унутар заграда $[\cdot]_p$ у релацијама (5) и (6) се дефинишу за Гаусове интеграционе тачке са тежинским фактором w_p . Горње формулације су дате за структуре направљење од хомогених материјала без постојања запреминских сила.

Након нумеричког одређивања Ј-интеграла (релацијама 5 или 6) у фази постпроцесарања приступа се одређивању фактора интензитета напона. Веза између J_1 и J_2 , које претстављају меру ширења прслине нормално и паралелно на лице прслине, као и фактора интензитета напона је у облику:

$$J_1 = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E^*} \quad (7)$$

$$J_2 = \frac{-2K_I K_{II}}{E^*}$$

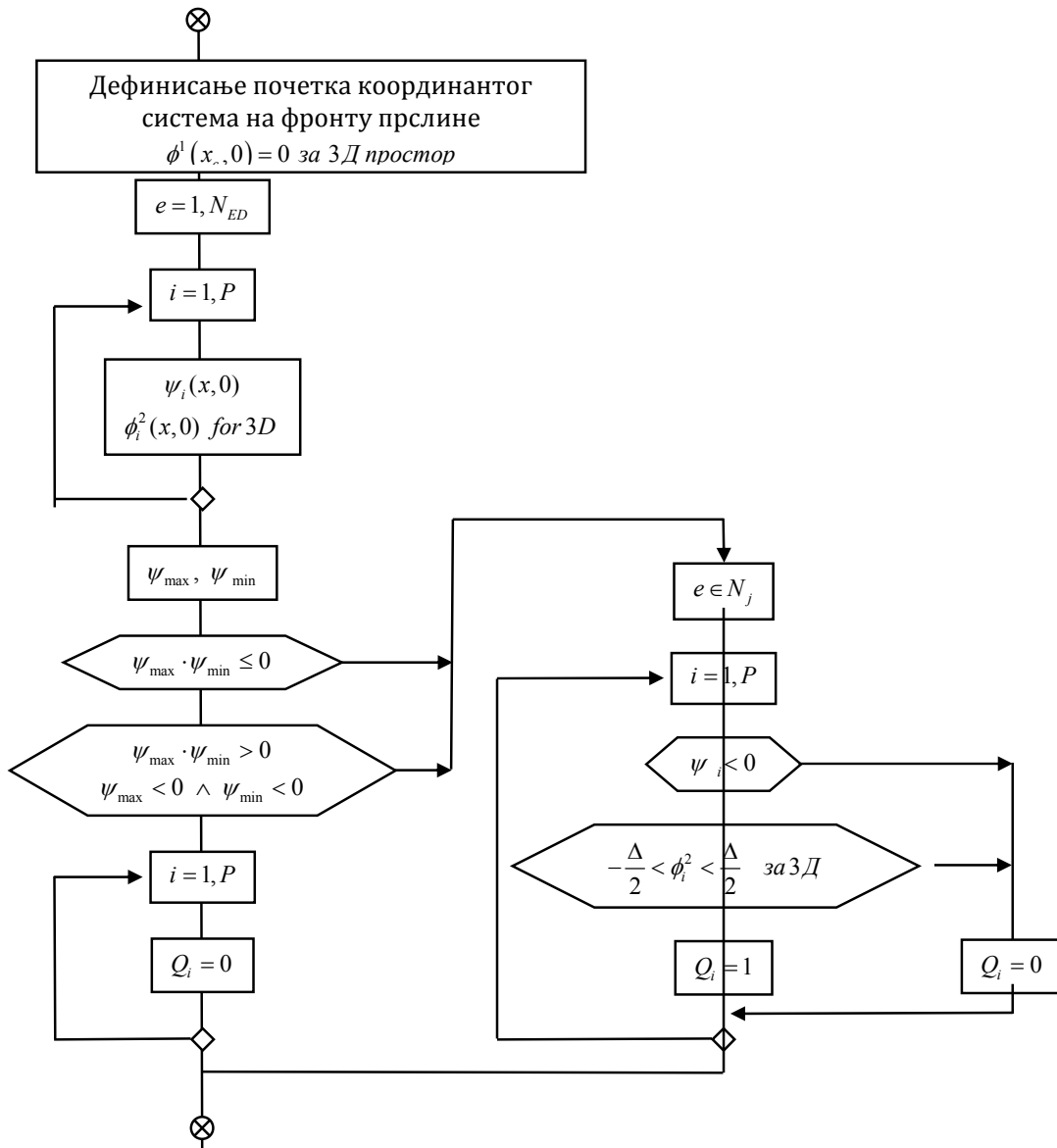
где је:

$$E^* = \begin{cases} E & \text{за равно стање напона} \\ \frac{E}{1-\nu^2} & \text{за равно стање деформације} \end{cases}$$

Из горњих релација се долази до фактора интензитета напона, као основних параметара у процени интегритета конструкције са уоченом прслином.

ЕДИ метода је врло практична за примену, јер конвертује контурни интеграл у површински, код 2Д проблема, односно у запремински интеграл код 3Д проблема. Ова метода има изузетан значај у анализи 3Д прслина, јер се њеном применом превазилазе велики проблеми постављања просторне контуре интеграције, односно избора одговарајућих интеграционих тачака у простору. Такође, ЕДИ метода у спречи са ЛС (Level Set) - методама омогућава велику аутоматизацију рачунања Ј-интеграла. Односно, за прорачун Ј-интеграла применом ЕДИ методе кориснику, који употребљава ПАК-ФМ, је довољно да унесе чвор који дефинише врх прслине и чвор који дефинише почетак прслине за 2Д проблеме, док у 3Д-случају неопходно је да унесе и чвор којим се дефинише дубина прслине. На основу наших сазнања комерцијални софтвер COSMOS користи контурни Ј-интеграл, док комерцијални софтвер MSC MARS прорачун Ј-интеграла заснива на ЕДИ методи. У оквиру софтвера ПАК-ФМ развијен је препроцесор за једноставно дефинисање 2Д и 3Д прслине у постојећој мрежи коначних елемената.

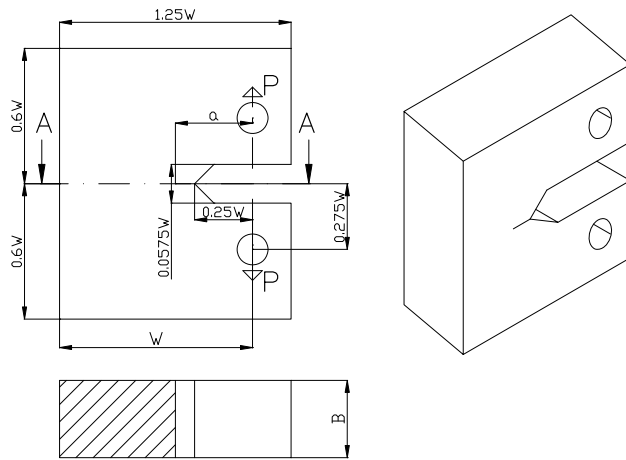
На слици 3. приказана је шема алгоритма који је развијен, применом LS (Level Set) функција, у оквиру софтвера ПАК-ФМ за аутоматизацију селекције региона интеграњеља у оквиру Ј-ЕДИ методе.



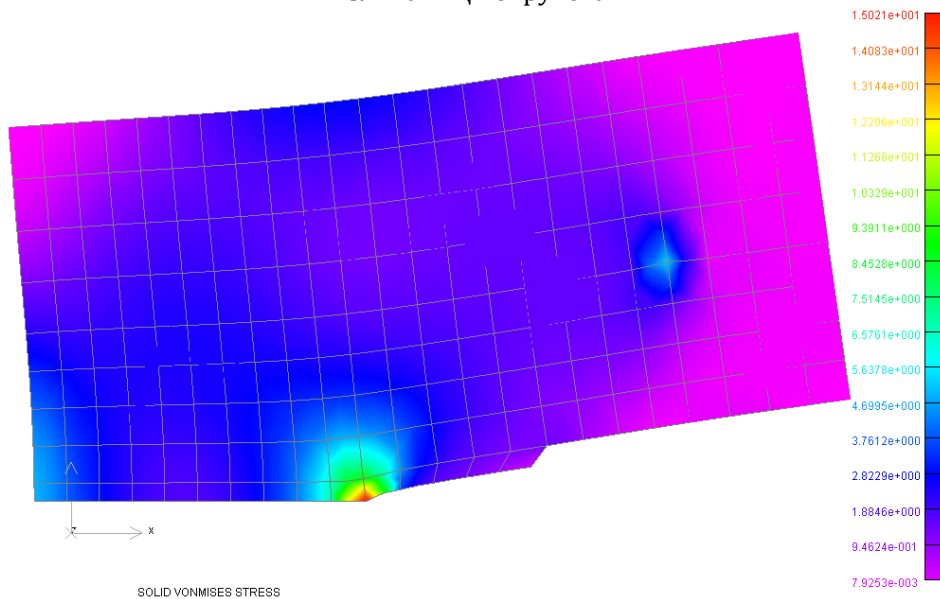
Слика 3. Алгоритам за аутоматско селектовање чворова у крути регион за J-ЕДИ интеграцију

У току развоја софтвера ПАК-ФМ обрађен је велики број теоријских примера из механике лома, са циљем да се верификују нумерички резултати добијени софтверским пакетом. Исти тест примери су решени са софтвером ПАК-ФМ као и са комерцијалним софтверима (COSMOS, MARC, NASTRAN). Упоређени резултати се добро слажу. Упутство за примену софтвера ПАК-ФМ урађено је по узору на упутства светски признатих софтвера као што су FEMAP, NASTRAN, PATRAN, COSMOS, ANSYS, ADINA.

У табели 1 су приказани упоредни резултати фактора интензитета напона ЦТ епрувете, (слике 4 и 5), добијени програмом ПАК-ФМ и MSC NASTRAN.



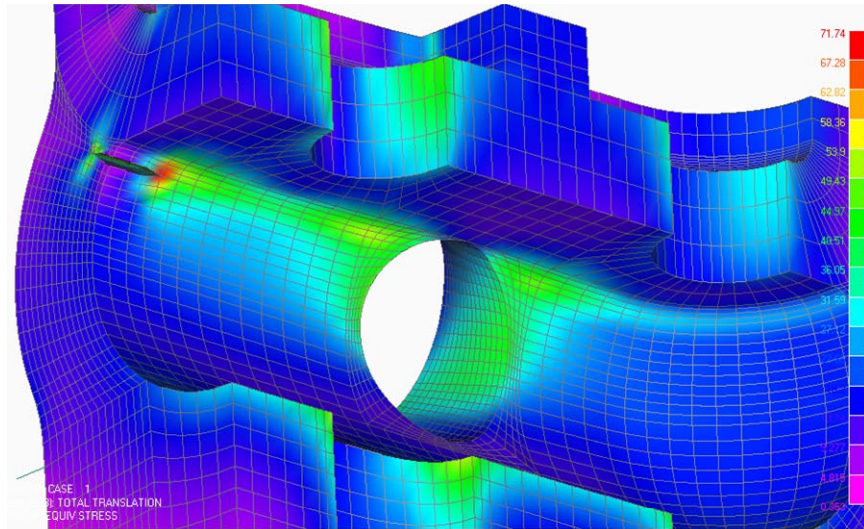
Слика 4. ЦТ епрувета



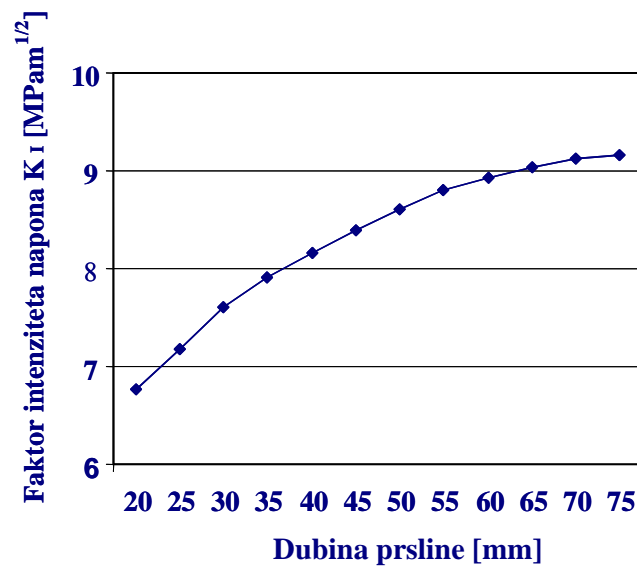
Слика 5. Поље ефективног напона код ЦТ епрувете –половина модела
Табела 1. Фактор интензитета напона код ЦТ епрувете - упоредни резултати
(аналитички, $K_{I1} = 24.899 \times 10^7 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$)

	$K_I [\times 10^7 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}]$	Грешка [%]
MSC NASTRAN	20.2804	16
PAK-FM&F	23.5683	2.4

Након верификације софтвера на тест примерима који су једноставни али у пракси неопходни за верификацију софтвера, софтвера је тестиран на сложеним реалним конструкцијама термо-блокова ЕПС-а.

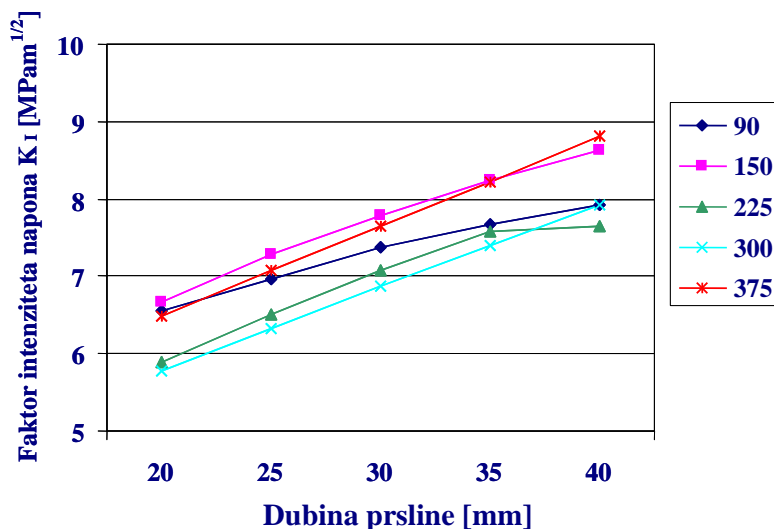


Слика 6. Анализа прсине у кућишту турбине - поље ефективног напона



Слика 6. Зависност фактора интензитета напона K_I од дубине пукотине (дужина пукотине 90мм)

Од реалних конструкција, урађена је 2Д и 3Д анализа утицаја величине прсина на факторе интензитета напона за кућиште турбине 4 ТЕ Колубара. На основу термо-еласто-пластичне анализе кућишта турбине и добијених вредности фактора интензитета напона при различитим дужинама и дубинама иницијалне прсине (слика 7 и 8) извршена је процена њеног интегритета.



Слика 8. Зависност фактора интензитета напона K_I од дубине пукотине за различите дужине

У свим прорачунима чврстоће вредности напона и деформација добијене софтвером ПАК-ФМ се веома добро слажу са решењима других комерцијалних софтвера. Треба нагласити да се и параметри механике лома (овде се пре свега мисли на факторе интензитета напона) добијени применом софтвера ПАК-ФМ изузетно добро слажу са резултатима добијеним другим комерцијалним софтверима.

Развијени софтвер је инсталиран у термоелектранама ЕПС-а и извршена је обука инжењера којима су издати сертификати. Софтвер ПАК-ФМ је расположив за комерцијалну употребу, на домаћем и страном тржишту, у индустрији и на техничким факултетима за потребе истраживања и едукације.

5. Литература

1. Lin C-Y., Determination of the Fracture Parameters in a Stiffened Composite Panel, Ph.D. Thesis, North Carolina State University, 2000.
2. Gosz M., Dolbow J., Moran B., Domain integral formulation for stress intensity factor computation along curved three-dimensional interface cracks, Int. J. Solids Structures Vol. 35, No. 15, pp. 1763-1783, 1998.
3. Dolbow J.E., An Extended Finite Element Method with Discontinuous Enrichment for Applied Mechanics, Ph.D. Thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois, 1999;
4. Enderlein M. Kuna M., Comparison of finite element techniques for 2D and 3D crack analysis under impact loading, International Journal for Solid and Structures, No 40, 2003;
5. Jovicic G., Zivkovic M., Jovicic N., Numerical Method Incorporated In the PAK Software for Determination of the Fracture Parameters, The First International Conference on Computational Mechanics (CM04), Belgrade, Serbia and Montenegro, November 15-17, 2004;
6. Jovicic G., Zivkovic M., Kojic M., Vulovic S., Numerical programs for life assessment of the steam turbine housing of the thermal power plant, From Fracture Mechanics to Structural Integrity Assessment, Monography, Editors: S. Sedmak, Z. Radaković, Belgrade 2004.

7. Slavkovic R., Zivkovic M., Grujovic N., Vujanac R., Jovicic G., The application of finite elements method in modern engineering practice, Conference of Modern Engineering Practice 2004, Faculty of Technical Sciences, Institute for Civil Engineering, Novi Sad, 15 – 16 April 2004;
8. Zivkovic M., Jovicic G., Vulovic S., Vujanac R., Influence choice of FE meshing toward determinate amount of Stress Intensity Factors, IBR '04, Bečići, May 2004;
9. Živković M., Jovičić G., Vulović S., Đorđević N., Procena preostalog radnog veka elemenata termoelektrane, XII Simpozijum termičara SCG, Soko Banja, 18.-21. oktobar, 2005
10. Zivkovic M., Jovicic G., Slavkovic R., Grujovic N., A Numerical Procedure for Structure Life Assessment, Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, An IACM Special Interest Conference, 25-27 May 2005, Santorini Island, Greece;
11. Jovicic G., Zivkovic M., Jovicic N., Numerical modeling of crack growth using the level set fast marching method, FME Transaction, pp 1-10, Vol. 33, No. 1, Belgrade, 2005
12. M. Zivkovic, G. Jovicic, Slavkovic R., Grujovic N., A Numerical Procedure for Structure Life Assessment, Int. Conf. on Computational Method for Coupled Problems in Science and Engineering, CIMNE, Barselona 2005
13. Jovičić G., Rešavanje problema mehanike loma i zamora materijala proširenom metodom konačnih elementa, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Kragujevac, 2005
14. G. Jovicic, M. Zivkovic, N. Jovicic, Numerical Evaluation of the J-Equivalent Domain Integral, Journal of Mechanical Engineering Design, Vol. 10, No 1, 2007.
15. G. Jovicic, M. Zivkovic, N. Jovicic, Stress Intensity Factor Calculation for Steam Turbine Housing in the Thermal Power Plant, Machine Design Monography, 2007
16. Jovicic G., Grabulov V., Maksimovic S., Zivkovic M., Jovicic N., Boskovic G., Maksimovic K., Residual life estimation of power plant component the high pressure turbine housing case, Thermal Science, (2009) vol.13 br.4, pp. 99-106.

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

„Софтвер за рачунску механику лома“-ПАК-ФМ

аутора: Мирослав Живковић, Гордана Јовичић, Милош Којић, Радован Славковић, Ненад Грујовић, Снежана Вуловић. На основу предлога овог техничког решења подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

Техничко решење „*Софтвер за рачунску механику лома*“- ПАК-ФМ аутора: Мирослав Живковић, Гордана Јовичић, Милош Којић, Радован Славковић, Ненад Грујовић, Снежана Вуловић, реализован 2005-2008 године, приказан је на 10 страница формата А4, писаних 11 фонтом, 1 проредом, садржи 8 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.*

Основне идеје као и резултати овог техничког решења објављивани су у часописима и излагани на научним скуповима. Примена предложеног техничког решења реализована је у **ЈАВНОМ ПРЕДУЗЕЋУ ЕЛЕКТРО-ПРИВРЕДА СРБИЈЕ**

МИШЉЕЊЕ

Аутори техничког решења „Софтвер за рачунску механику лома“ - ПАК-ФМ су јасно приказали, теоријски обрадили и имплементирали комплетну структуру техничког решења.

Развијени софтвер је написан на основу стандардних и новијих теоријских формулација механике лома, а у циљу:

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


На основу описа техничког решења могу се донети следећи закључци:


- 1. Развијени софтвер ПАК-ФМ у поређењу са другим комерцијалним софтверима који су били доступни, има сличне могућности и даје поуздане резултате при нумеричким прорачунима. Треба нагласити да су поред стандардних метода у програмски пакет ПАК-ФМ уграђене и савремене методе прорачуна у области механике лома, као што су J-ЕДИ за 3Д проблеме.*
- 2. Софтвер ПАК-ФМ је развијан према утврђеном програмском задатку, усвојеном на основу анализе потреба ЕПС-а, могућности других комерцијалних софтвера, као и експертског знања великог броја истраживача који су учествовали у развоју софтвера.*
- 3. 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.*

4. Велики број решених примера развијеним софтверским пакетом ПАК-ФМ и упоређивање резултата са резултатима добијеним коришћењем познатих светских софтверских пакета, показују велике могућности програма ПАК-ФМ и поузданост његове примене у решавању сличних реалних проблема. Такође развијени софтвер даје могућност нумеричког прорачуна параметара механике лома конкретних конструкција термо-блокова ЕПС-а, са прлинама произвољног облика и величине, чиме се превазилазе ограничења апроксимативних аналитичких решења применљивих само на једноставне геометријске облике.

Дакле, „Софтвер за рачунску механику лома“ - ПАК-ФМ има значајно место као недеструктивна методологија у анализи интегритета конструкција са уоченим иницијалним прлинама. Са задовољством предлажемо да се „Софтвер за рачунску механику лома“ - ПАК-ФМ прихвати као ново техничко решење.

17.05.2010., у Београду


Др Александар Седмак, ред. проф.


Др Драгослав Шумарац, ред. проф.



Универзитет у Крагујевцу
Машински факултет у Крагујевцу
Број : **ТР-22/2010**
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

ОДЛУКУ

Усвајају се позитивне рецензије техничког решења „Софтвер за механику лома ПАК-ФМ“, аутора **Др Мирослава Живковића, Др Гордане Јовичић, Др Милоша Којића, Др Радована Славковића, Др Ненада Грујовића и Др Снежане Вуловић.**

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.