

# ОПРЕДЕЛЯНЕ ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ПУКНАТИНОУСТОЙЧИВОСТ ПРИ ПРИЗМАТИЧНИ И ЦИЛИНДРИЧНИ ПРОБНИ ОБРАЗЦИ, С ПОМОЩТА НА СПЕЦИАЛИЗИРАН СОФТУЕР

ИВАНКА ДЕЛОВА<sup>1</sup>, РАЙЧО РАЙЧЕВ<sup>2</sup>

*Технически университет София – филиал Пловдив<sup>1, 2</sup>  
ivankadelova@tu-plovdiv.bg<sup>1</sup>, rpraichev@tu-plovdiv.bg<sup>2</sup>*

**Резюме:** *Обект на настоящата статия е определяне коефициента на интензивност на напрежението, траекторията на пукнатината и броя на уморните цикли при стандартни призматични и цилиндрични стоманени образци, подложени на осово натоварване. Изследването е осъществено чрез вградената функция SMART Crack Growth към специализирания софтуер ANSYS, за различни съотношения на геометричните размери на образците. Резултатите са представени в табличен и графичен вид.*

**Ключови думи:** *коефициент на интензивност на напреженията, ANSYS, SMART Crack Growth, пукнатини, стандартни пробни образци.*

## DETERMINATION CRACK RESISTANCE CHARACTERISTICS OF PRISMATIC AND CYLINDRICAL SPECIMENS USING SPECIALIZED SOFTWARE

IVANKA DELOVA<sup>1</sup>, RAYCHO RAYCHEV<sup>2</sup>

*Technical University of Sofia Branch Plovdiv<sup>1, 2</sup>  
ivankadelova@tu-plovdiv.bg<sup>1</sup>, rpraichev@tu-plovdiv.bg<sup>2</sup>*

**Abstract:** *The object of this article is to determine the stress intensity factor, the crack trajectory and the number of fatigue cycles in standard prismatic and cylindrical steel specimens subjected to axial loading. The study was performed using the built-in SMART Crack Growth function to the specialized ANSYS software, for different ratios of the geometric dimensions of the samples. The results are presented in tabular and graphical form.*

**Key words:** *stress intensity factor, ANSYS, SMART Crack Growth, cracks, standard test specimens.*

### 1. Въведение

Основна цел в настоящата статия е определяне характеристиките на пукнатиноустойчивост – коефициента  $K_I$  на интензивност на напрежението, траекторията на пукнатината и броя на уморните цикли при призматични и цилиндрични стандартни образци. Изследването се провежда чрез модула SMART Crack Growth, който е част от специализирания софтуер ANSYS.

Редица изследвания, които са свързани с проблемите в областта на механиката на

разрушаването, са публикувани в различни специализирани издания.

В статията [3] е представен нов свободно разпространен модул за симулиране растежа на уморни пукнатини, който се използва чрез софтуера Abaqus. Модула включва няколко различни модела на уморни пукнатини и използва разширения метод на крайните елементи (XFEM) за да бъдат осъществени симулациите. Анализът, който се осъществява е двумерен, но покрива всички необходими стъпки за симулиране растежа на пукнатини. Подробно са описани стъпките, необходими за

осъществяване на симулацията от създаване на геометричния модел до получаване на изходните резултати. Валидирането на модула се потвърждава чрез сравняване на резултатите от симулациите с аналитични и експериментални резултати. Като основни предимства са посочени:

Налична геометрия за шест стандартни пробни образци, което улеснява потребителя при използване на модула;

Разпространението на пукнатината се обработва с XFEM и първоначалната пукнатина може да бъде определена само с помощта на координати.

Наличието на пет закона за растеж на пукнатините от умора, пет начина за изчисляване на коефициента на интензивност на напрежението и три критерия за посоката на разпространение на пукнатината.

В [4] е представена софтуерната система ProCrack, която е предназначена за автоматизирана симулация на уморни пукнатини в произволно натоварени триизмерни обекти. Предварителната обработка и анализът на крайните елементи се осъществяват с помощта на комерсиалната софтуерна система Abaqus. Симулациите на растежа на уморните пукнатини се извършва в рамките на класическата линейно еластична механика на разрушение. За изчисляване коефициентите на интензивност на напрежението се използва техниката на подмоделиране в комбинация с интегриране. За илюстриране възможностите и производителността на симулационния инструмент ProCrack, са представени два примера. При първият пример са определени параметрите на пукнатиноустойчивост при стоманена конзола, подложена на циклично натоварване, а при втория пример е изследвано разпространението на пукнатина при вал с постоянно кръгово сечение, подложен на усукване. Резултатите от генерираната софтуерна мрежа на крайните елементи, както и получените резултати от симулациите са визуализирани.

Статията [5] е посветена на проблемите, свързани с изчисляване коефициента на интензивност на напрежението (SIFs) при полуелиптични пукнатини, разположени в зоните на концентрация на напрежение при съд под налягане. Задачата е реализирана числено чрез усъвършенстван глобално-локален анализ на крайни елементи (FE). За разглеждания случай е характерно, че напрежението в зоната на пукнатината варира по трите направления. Зависимости за определяне коефициента на интензивност на напрежението за такива

проблеми не са налични нито аналитично, нито числено, тъй като съществуващите понастоящем решения в литературата (числови резултати, емпирични уравнения на Нюман-Раджу, решения на тегловни функции и др.) са валидни само за равномерно разпределение на напрежението по аксиално и периферно направление на съда под налягане и позволяват промяна само през дебелината. Коефициентите на интензивност на напрежението са представени в подходящ табличен формат за различни геометрични конфигурации при полуелиптичната пукнатина. Детайлите по моделирането и методологията използвана в анализа, са подробно обсъдени, а численият подход е се оказва много ефективен за изчисляване на интензивността на напрежение при полуелиптични пукнатини.

Целта на изследването в [6] е да се представи симулационно моделиране на траекторията на разпространение на пукнатината в линейно еластичен материал, подложен на смесени натоварвания и да се изследват ефектите от наличието на отвор върху растежа на уморната пукнатина. Обект на изследване е правоъгълна плоча с наличие на три отвора, която е подложена на осово натоварване. Изследването е проведено при различна дебелина на геометрията. Функцията Smart Crack Growth (Технология за интелигентен растеж на пукнатините), от софтуера ANSYS, е използвана в ANSYS Mechanical APDL 19.2 за прогнозиране на траекторията на разпространение на пукнатините, както и за оценка на факторите за интензивност на напрежението. Критерият за максимално периферно напрежение се прилага като критерий за посока при линейна еластична механика на разрушение (LEFM). Според позицията на отвора, резултатите показват, че уморната пукнатина нараства към отвора поради неуравновесените напрежения при върха на пукнатината, предизвикана от отвора. Резултатите от тази симулация са верифицирани по отношение на траекторията на растеж на пукнатини, коефициентите на интензивност на напрежението и умората на материала при условия на натоварване в смесен режим.

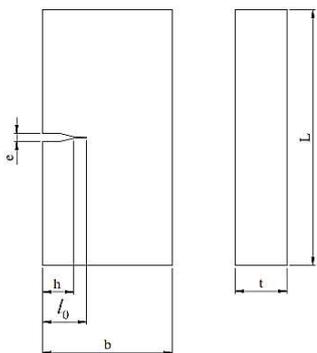
## 2. Описание на изследването.

Обекти на настоящото изследване са:

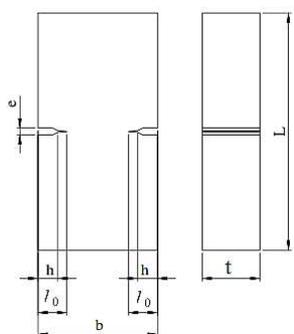
- призматичен образец с едностранна пукнатина;
- призматичен образец с двустранна пукнатина;
- цилиндричен образец с кръгова пукнатина.

На фиг. 1, фиг.2 и фиг. 3 са представени схемите на изследваните обекти, а в таблица.1,

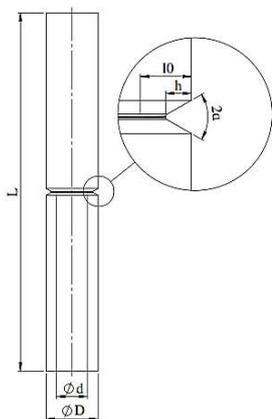
таблица.2 и таблица. 3 са дадени геометричните размери на изследваните образци.



Фиг. 1. Призматичен образец 1 с едностранна пукнатина.



Фиг. 2. Призматичен образец 2 с двустранна пукнатина.



Фиг. 3. Цилиндричен образец с кръгова пукнатина.

Таблица 1. Геометрични размери на призматичен образец 1.

Геометрични размери на призматичен образец с едностранна пукнатина						
b	L	t	h	e	l <sub>0</sub>	l <sub>0</sub> /b
mm	mm	mm	mm	mm	mm	-
125	250	20	20	7.5	25	0.2
83.333	166.666			5		0.3
62.5	125			4		0.4
50	100			3		0.5
41.666	83.332			2.5		0.6

Таблица 2. Геометрични размери на призматичен образец 2.

Геометрични размери на призматичет образец с двустранна пукнатина						
b	L	t	h	e	l <sub>0</sub>	l <sub>0</sub> /b
mm	mm	mm	mm	mm	mm	-
125	250	20	20	7.5	10	0.08
83.333	166.666			5		0.12
62.5	125			4		0.16
50	100			3		0.20
41.666	83.332			2.5		0.24

Таблица 3. Геометрични размери на цилиндричен образец.

Геометрични размери на цилиндричен образец с кръгова пукнатина							
D	D <sub>k</sub>	L	L <sub>1</sub>	h	d	l <sub>0</sub>	d/D
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	-
20	16	100	140	2	12	4	0.600
30	26	150	210		18.30	5.85	0.610
40	36	200	280		24.8	7.6	0.620
50	46	250	350		31.5	9.25	0.630
60	56	300	420		38	10.8	0.640

Изследването е проведено с помощта на модула SMART Crack Growth от софтуерния пакет ANSYS. Този модул позволява да бъдат определени коефициента на интензивност на напрежението, посоката на развитие на пукнатината, както и броя на уморните цикли при изследваните образци.

### 3. Резултати от изследването.

В таблица 4, таблица 5 и таблица 6 са представени резултатите от изследването при трите образца.

Таблица 4. Резултати за образец 1.

Резултати за образец с едностранна пукнатина					
Сила	σ <sub>max</sub>	K <sub>I,теоретично</sub>	K <sub>I,симулация</sub>	Развитие на пукнатината	N цикли до разрушение
P, N	MPa	MPa·mm <sup>0.5</sup>	MPa·mm <sup>0.5</sup>	mm	брой
100000	40	485.888	483.94	19.097	1.17E+10
	60	882.645	864.68	22.692	9.13E+08
	80	1491.346	1408.9	18.518	9.22E+07
	100	2504.810	2483	20.171	1.22E+07
	120	4282.214	4434.1	18.836	1.07E+06

Таблица 5. Резултати за образец 2.

Резултати за образец с двустранна пукнатина					
Сила	σ <sub>max</sub>	K <sub>I,теоретично</sub>	K <sub>I,симулация</sub>	Развитие на пукнатината	N цикли до разрушение
P, N	MPa	MPa·mm <sup>0.5</sup>	MPa·mm <sup>0.5</sup>	mm	брой
100000	40	249.287	252.55	19.097	1.69E+10
	60	374.510	371.94	21.697	3.20E+09
	80	501.959	522.85	20.158	7.62E+08
	100	634.569	644.02	20.548	5.16E+07
	120	778.174	739.63	19.224	3.81E+06

Таблица 6. Резултати за образец 3.

Резултати за цилиндричен образец с кръгова пукнатина					
Сила	σ <sub>max</sub>	K <sub>I,теоретично</sub>	K <sub>I,симулация</sub>	Развитие на пукнатината	N цикли до разрушение
P, N	MPa	MPa·mm <sup>0.5</sup>	MPa·mm <sup>0.5</sup>	mm	брой
100000	884.194	1755.313	1760.7	19.431	7.97E+06
	380.196	961.557	967.1	16.011	1.04E+07
	207.017	596.880	617.5	13.118	1.83E+07
	128.318	421.436	434.6	11.214	1.02E+08
	86.347	316.294	325.6	9.351	2.42E+08

За определяне на теоретичните коефициенти  $K_I$  при изследваните образци са използвани зависимости, описани в [1,2].

- За образца с едностранна пукнатина:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l_0} \cdot F_I(\alpha); \quad (1)$$

където:

$$F_I(\alpha) = 1,12 - 0,231\alpha + 10,55\alpha^2 - 21,72\alpha^3 + 30,39\alpha^4$$

$$\alpha = l_0 / b;$$

- За образца с двустранна пукнатина:

Тук отново се прилага формула (1), при която:

$$F_I(\alpha) = \left[ 1 + 0,122 \cos^2 \left( \frac{\pi\alpha}{2} \right) \right] \sqrt{\frac{2}{\pi\alpha} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi\alpha}{2} \right)};$$

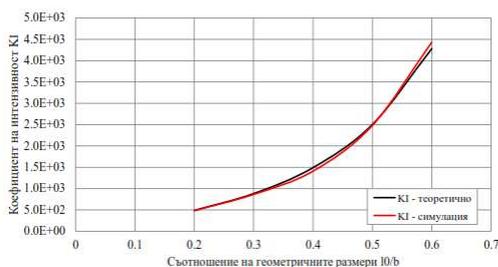
$$\alpha = 2l_0 / b;$$

- За образца с кръгова пукнатина:

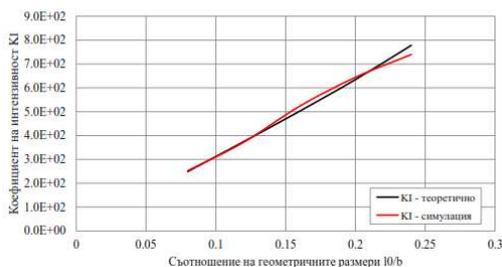
$$K_I = \frac{P}{\sqrt{D^2}} (Y_2' + Y_2''); \quad (2)$$

където:  $Y_2'$  и  $Y_2''$  са тарировъчни коефициенти, чиито стойности се вземат от [1].

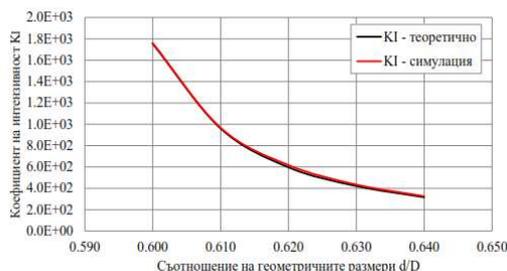
На фиг. 4, фиг. 5 и фиг. 6 са представени графичните зависимости за коефициента  $K_I$  в функция от геометричните размери на образците.



Фиг. 4. Графика на коефициент  $K_I$  в при образец 1.



Фиг. 5. Графика на коефициент  $K_I$  в при образец 2.



Фиг. 6. Графика на коефициент  $K_I$  в при образец 3.

#### 4. Заключение

Основната задача в настоящото изследване е определяне характеристиките на пукнатиноустойчивост при изследваните образци, с помощта на специализиран софтуер. Получените резултати от симулациите за коефициента  $K_I$  показват добро съвпадение с резултатите от аналитичните зависимости. Това ни дава основание да приемем, че и резултатите получени за развитието на пукнатината и уморните цикли също са адекватни.

Като следваща цел за предстоящо изследване е реализирането на реален физически експеримент и сравнението между получените резултати от експеримента с тези, получени от симулацията.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С Георгиев М., Межова Н., „Приложна механика на разрушаването“, Булвест 2000, 2013.
2. Ито Ю., Мураками Ю., Хасебэ Н., Юуки Р., Тоя М., Того К., Мията Х., Терада Х., Миядзаки Н., Аоки С. "Справочник по коефициентам интензивности напряжений - Том 1", Мир 1990.
3. Malekan M., Khosravi A., St-Pierre L., "An Abaqus plug-in to simulate fatigue crack growth", Springer, Engineering with Computers (2021).
4. Rabold F., Kuna M., "Automated finite element simulation of fatigue crack growth in three-dimensional structures with the software system ProCrack", Elsevier, Procedia Materials Science 3), p. 1099 – 1104, 2014.
5. Djillali S., Ali B., Hamid A., "Calculation of SIFs for semi-elliptical surface cracks in U-shaped bellows expansion joints of RR vessel", 13 Congrès de Mécanique 11 - 14 Avril 2017 (Meknès, MAROC).
6. Alshoabi A., "Computational Simulation of 3D Fatigue Crack Growth under Mixed-Mode Loading", Appl. Sci. 2021, 11(13), 5953; doi.org/10.3390/app1113595.