

ОПРЕДЕЛЯНЕ ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ПУКНАТИНОУСТОЙЧИВОСТ ПРИ ПРАВОЪГЪЛНИ ПЛАСТИНИ, С ПОМОЩТА НА СПЕЦИАЛИЗИРАН СОФТУЕР

РАЙЧО РАЙЧЕВ¹, ИВАНКА ДЕЛОВА²

*Технически университет София – филиал Пловдив^{1, 2}
rpraichev@tu-plovdiv.bg¹, ivankadelova@tu-plovdiv.bg²*

Резюме: *Обект на настоящата статия са определяне коефициента на интензивност на напреженията, траекторията на пукнатината и броя на уморните цикли при стандартни правоъгълни стоманени пластини, подложени на осово натоварване. Изследването е осъществено при различни съотношения на геометричните размери на образците. За определяне на търсените параметри е използвана вградената функция SMART Crack Growth към специализирания софтуер ANSYS. Резултатите са представени в табличен и графичен вид.*

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

DETERMINATION OF CHARACTERISTICS ON CRACK RESISTANCE IN RECTANGULAR PLATE USING SPECIALIZED SOFTWARE

RAYCHO RAYCHEV¹, IVANKA DELOVA²

*Technical University of Sofia Branch Plovdiv^{1, 2}
rpraichev@tu-plovdiv.bg¹, ivankadelova@tu-plovdiv.bg²*

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

Key words: *stress intensity factor, fatigue cycles, ANSYS, SMART Crack Growth, standard specimens.*

1. Въведение

Наличието на пукнатини в детайлите изисква съвременни подходи, както за оценка на свойствата на материалите, така и при якостните изчисления на конструкциите. Тези подходи трябва да дават възможност да се пресметнат както разрушаващите напрежения, така и допустимите дължини на пукнатините.

Голяма част от специализираната литература са свързани с методите за определяне коефициента на интензивност на напреженията, траекториите на уморните пукнатини, както и броят на циклите до разрушение на изследваните образци.

Статия [3] е фокусирана върху изследването на плоски стоманени образци, с V-

образни и полуелиптични надрези. Образците са подложени на циклично натоварване с постоянна и променлива амплитуда, за да се анализира влиянието на ефектите от цикличното натоварване върху разпространението на пукнатината и за да се получи информация за експлоатационния живот на компонентите. В зависимост от последователността на натоварването, разпространението на пукнатината може да бъде ускорено, забавено или в някои случаи дори спряно, което води до следи в зоната на разрушение. Осъществени са фрактографски анализи на тестваните образци чрез светлиннооптична микроскопия, за да бъдат определени различните етапи на разпространение на пукнатината. Извършени са

числени и аналитични изчисления съгласно линейно-еластична механика на разрушение (LEFM), базирани на дву- и триизмерни модели за натоварвания с постоянна и променлива амплитуда. Всички получени резултати на образеца с V-образен надрез са представени в графичен вид. Окончателното сравнение на фрактографските анализи и числените изчисления за разпространението на пукнатините илюстрира разликите в резултатите и предоставя информация за по-прецизна оценка за растежа на уморната пукнатина при натоварване с променлива амплитуда.

В [4] е предложена комбинация от FRANC2D/ (2D програма за симулация на растеж на пукнатини) и механична програма ANSYS (3D механичен анализ на разрушение). Сравненията между двата софтуера се извършват за различни случаи, като основните параметри за сравнение са коефициента на интензивност на напрежението (SIF) и траекторията на растеж на пукнатината.

Растежът на пукнатината се симулира числено чрез метод на 3D и 2D крайни елементи стъпка по стъпка. Коефициентите на интензивност на напрежението (SIFs) се изчисляват чрез използване на техниката корелация на преместване. Процедурата се състои от изчисляване на SIFs, пътя на растеж на пукнатината, напреженията и разпределението на деформациите чрез инкрементален анализ на разширението на пукнатината.

Анализът на крайните елементи за растежа на уморна пукнатина се извършва чрез софтуера, базиран на закона на Парис, а ориентацията на пукнатината се определя с помощта на теорията за максимални периферни напрежения. Резултатите от симулацията, получени в това изследване, осигуряват добро съвпадение с експерименталните резултати за всички разгледани случаи.

Основната задачи в [5] са:

- числено моделиране траекторията на растеж на пукнатините в линейни еластични материали при смесени натоварвания;
- изследване на ефекта от наличието на отвор върху разпространението на уморна пукнатина и броя на уморните цикли при модифициран образец подложен на осово натоварване с постоянна амплитуда;

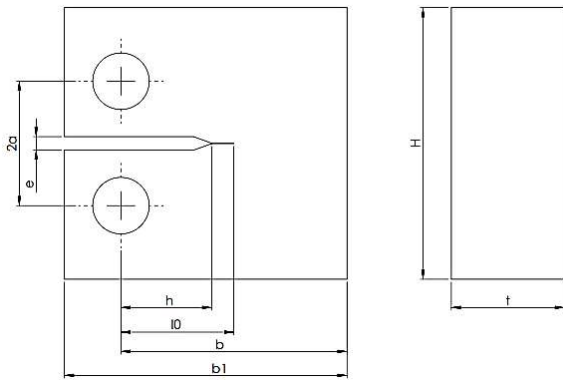
За реализиране на поставените задачи е използвана функцията SMART Crack Growth, която е вградена в софтуера ANSYS Mechanical APDL 19.2. Моделът на Парис е използван за оценка на издръжливостта на умора, за различни конфигурации на изследвания образец (MCTS). Подходът на изследването включва точна оценка

на коефициента на интензивност на напрежението (SIFs), определяне пътя на растежа на пукнатината и оценка на издръжливостта на умора чрез анализиране разширението на пукнатината. Анализа на резултатите показват, че уморната пукнатина винаги е привлечена към отвора така че, или може само да извива пътя си и да се разпространява към отвора, или може само да „изплува“ от отвора и да расте по-нататък. По отношение на траекториите на разпространение на пукнатината при условия на натоварване в смесен режим, резултатите от това изследване са валидирани с няколко експеримента за разпространение на пукнатини, публикувани в литературата, показващи подобни наблюдения. Постигнати са точни резултати от прогнозираните уморни цикли в сравнение с публикуваните в специализираните издания данни, получени при изследването на двумерни модели.

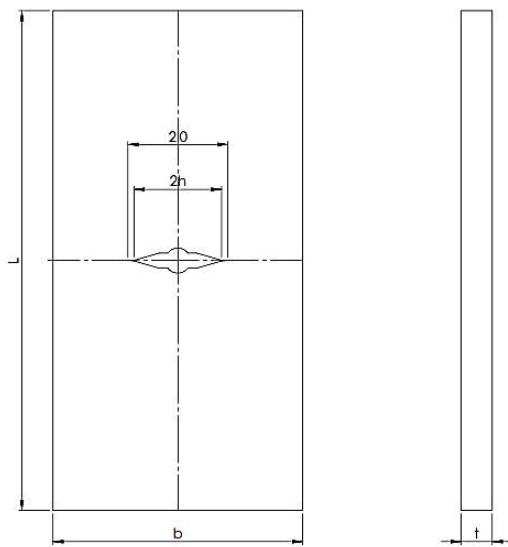
В [6] е представено числено моделиране на развитие на пукнатина при смесени натоварвания в линейни еластични материали и е изследвано влиянието на наличие на отвор върху разпространението на уморна пукнатина. Симулациите са осъществени в средата на софтуера ANSYS Mechanical APDL 19.2, като е използвана функция SMART Crack Growth (Технология за интелигентен растеж на пукнатини). Тази функция позволява да се прогнозира посоката на разпространение на пукнатината и броя на уморните цикли при конструктивните компоненти, използвайки разширения метод на крайните елементи (XFEM). Модел, подчинен на закона на Парис е използван за оценка на уморните цикли в смесен режим при модифицирана четириточкова греда, подложена на огъване и при правоъгълна плоча, подложена на опън. Направени са прецизни оценки за коефициента на интензивност на напрежението (SIF), траекторията на растеж на пукнатината и броя на уморните цикли чрез анализ на нарастващо разпространение на пукнатината. Резултатите от този анализ са валидирани чрез съществуващи публикувани научни трудове, по отношение на траекториите на разпространение на пукнатините при условия на натоварване в смесен режим.

Обект на настоящото изследване са правоъгълен компактен образец и плосък правоъгълен образец с централна пукнатина.

На фиг. 1 и фиг. 2 в параметричен вид са представени геометричните параметри на изследваните образци, а в таблица 1 и таблица 2 са дадени размерите на образците при които са реализирани симулациите.



Фиг. 1. Схематичен вид на правоъгълния компактен образец.



Фиг. 2. Схематичен вид на правоъгълния образец с централна пукнатина.

Таблица 1. Геометрични размери на правоъгълния компактен образец.

Геометрични размери на правоъгълен компактен образец								
b	b1	H	t	h	e	2a	10	10/b
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	-
200	250	240	20	16	12	110	20	0.1
100	125	120			6	55		0.2
66.667	83.334	80			4	36.667		0.3
50	62.5	60			3	27.5		0.4
40	50	48			2.4	22		0.5

Таблица 2. Геометрични размери на правоъгълен образец с централна пукнатина.

Геометрични размери на образец с централна пукнатина						
b	L	t	2h	e	210	210/b
mm	mm	mm	mm	mm	mm	-
50	100	10	15	3.000	20	0.40
57.143	114.286			3.429		0.35
66.667	133.334			4.000		0.30
80	160			4.800		0.25
100	200			6.000		0.20

2. Описание на модула SMART Crack Growth.

SMART (Separating, Morphing, Adaptive and Remeshing Technology) Crack Growth е вграден инструмент към софтуера ANSYS, който служи за изчисляване растежа на пукнатини.

Модулът се прилага за триизмерни обекти и чрез него могат да бъдат определени коефициента на интензивност на напрежението K_I , уморните цикли на изследваните обекти, както и посоката на развитие на пукнатината.

В основата на всички изчисления, които се осъществяват чрез специализирания модул е закона на Парис:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_I^m ; \quad (1)$$

където: $\frac{da}{dN}$ е скоростта на нарастване на пукнатината за един цикъл;

ΔK_I е диапазона на коефициента на интензивност на напрежението (базиран на минималните и максималните стойности на напреженията);

C, m са коефициенти, които зависят от материала на изследвания обект и се определят експериментално.

3. Резултати от симулациите.

В таблица 3 и таблица 4 са представени резултатите от симулациите на двата образца.

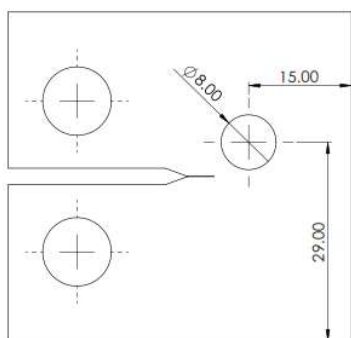
За правоъгълният компактен образец е изследвано влиянието на допълнителен отвор върху резултатите от симулацията. На фиг. 3 е представена схемата на образца с наличие на допълнителен отвор.

Таблица 3. Резултати за правоъгълния компактен образец.

ПРАВОЪГЪЛЕН КОМПАКТЕН ОБРАЗЕЦ									
10/b	Сила	σ_{max}	K_I теоретично	K_I симулация	$K_{I, симулация}$ при наличие на отвор	N цикли до разрушение	Развитие на пукнатината	N цикли до разрушение при наличие на отвор	Развитие на пукнатината при наличие на отвор
-	P, N	MPa	MPa.mm ^{0.5}	MPa.mm ^{0.5}	MPa.mm ^{0.5}	брой	mm	брой	mm
0.1	60000	15	642.252	658.56	703.34	9.65E+09	19.065	2.92E+08	18.314
0.2		30	1282.105	1207.2	1334.1	5.57E+08	18.756	2.04E+07	17.583
0.3		45	2065.243	2141.1	2297.7	7.28E+07	19.028	3.59E+06	18.225
0.4		60	3088.104	3261.8	3160.5	1.02E+07	19.003	7.34E+05	18.748
0.5		75	4581.703	4673.3	5069.5	1.59E+06	18.886	1.47E+05	18.871

Таблица 4. Резултати за правоъгълен образец с централна пукнатина.

ПРАВОЪГЪЛЕН ОБРАЗЕЦ С ЦЕНТРАЛНА ПУКНАТИНА						
Сила	σ_{max}	K_I теоретично	K_I симулация	Развитие на пукнатината	N цикли до разрушение	210/b
P, N	MPa	MPa.mm ^{0.5}	MPa.mm ^{0.5}	mm	брой	-
100000	200	1243.159	1260.400	11.551	7.968E+06	0.40
100000	175	1059.827	1017.200	14.354	1.639E+07	0.35
100000	150	888.706	857.490	20.168	1.323E+06	0.30
100000	125	727.653	734.630	26.060	1.061E+06	0.25
100000	100	573.983	565.600	29.215	2.266E+07	0.20



Фиг. 3. Схематичен вид на допълнителния отвор при компактния образец.

За определяне на теоретичния коефициент на интензивност на напрежението K_I , са използвани следните зависимости [1,2]:

- За правоъгълния компактен образец:

$$K_I = \frac{P}{\sqrt{tb}} \cdot f_1(\alpha); \quad (2)$$

където:

$$f_1(\alpha) = \frac{(2+\alpha)(0,886+4,64\alpha-13,32\alpha^2+14,72\alpha^3-5,6\alpha^4)}{(1-\alpha)^{\frac{3}{2}}};$$

$$\alpha = \frac{l_0}{b}.$$

- За правоъгълния образец с централна пукнатина:

$$K_I = \frac{P}{t\sqrt{b}} \cdot Y_I; \quad (3)$$

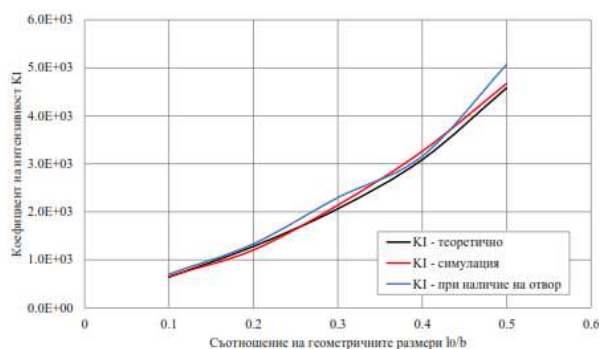
където:

$$Y_I = 0,38 \left[1 + 2,308 \left(\frac{2l}{b} \right) + 2,439 \left(\frac{2l}{b} \right)^2 \right];$$

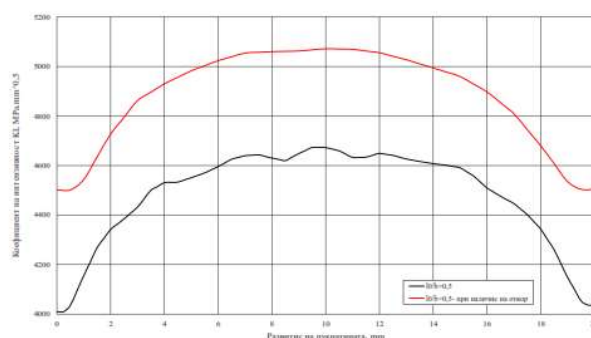
На фиг. 4, фиг. 5 и фиг. 6 в графичен вид са представени резултатите от симулациите при правоъгълния компактен образец, а на фиг. 7 и фиг. 8 са представени визуализации от обществените симулации.

Получените резултати показват, че има добро съвпадение между теоретичния коефициент K_I и този, получен от симулациите с модула SMART Crack Growth.

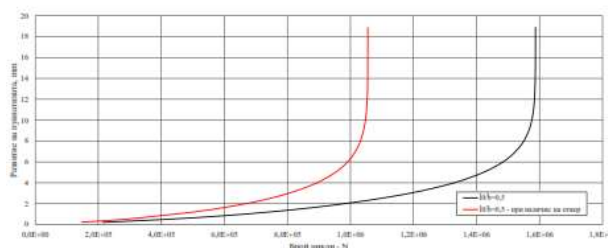
Наличието на допълнителен отвор в образца оказва съществено влияние както върху коефициента K_I , така и върху броя на уморните цикли.



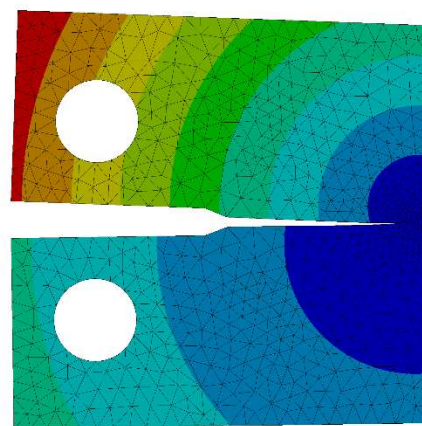
Фиг. 4. Зависимост между коефициента на интензивност на напреженията и геометричните размери на образца.



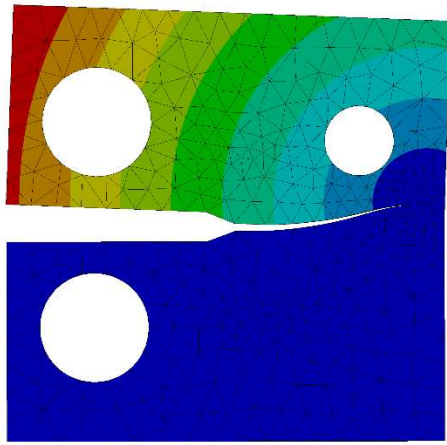
Фиг. 5. Зависимост между коефициента K_I и нарастването на пукнатината.



Фиг. 6. Зависимост между уморните цикли и развитието на пукнатината.

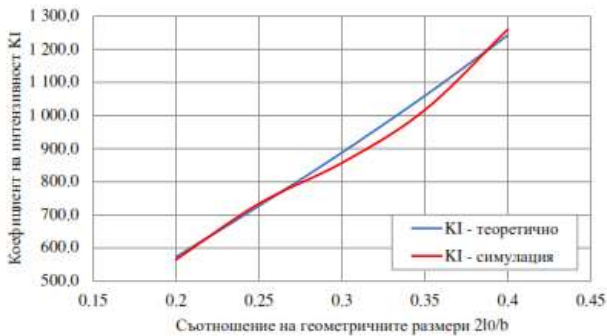


Фиг. 7. Визуализация от симулацията на правоъгълния компактен образец.

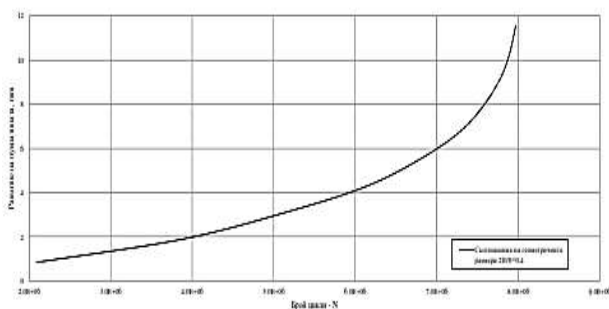


Фиг. 8. Визуализация от симулацията на правоъгълния компактен образец с наличие на допълнителен отвор.

На фиг. 9 и фиг. 10 са представени в графичен вид резултатите от симулациите за правоъгълния образец с централна пукнатина.



Фиг. 9. Зависимост между коефициента K_I и геометричните размери на образца.



Фиг. 10. Зависимост между уморните цикли и развитието на пукнатината.

Получените резултати от симулацията за коефициента K_I при образца с централна пукнатина показват добро съвпадение с теоретичния коефициент, определен чрез зависимостта (3). Това дава основание да се

приемат като адекватни резултатите, получени чрез модула SMART Crack Growth.

6. Заключение

Обект на настоящото изследване са правоъгълен компактен образец и плосък правоъгълен образец с централна пукнатина. Основната поставена задача е свързана с определяне коефициента на интензивност на напрежението K_I , уморните цикли на изследваните обекти и развитието на пукнатината с помощта на специализиран софтуер. Сравнението между получените резултати за коефициента K_I чрез модула SMART Crack Growth и резултатите от аналитичните зависимости показват добро съвпадение (разликата и при двата образца е по-малка от 6%). Това дава основание да допуснем, че получените резултати са адекватни.

Резултатите биха могли да имат практическо значение, само след тяхното валидиране с резултатите от реален физически експеримент.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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 коефициента интензивности напрежений - Том 1", Мир 1990.
3. Simunek D., Leitner M., Maierhofer J., Gänser H., "Fatigue crack growth under constant and variable amplitude loading at semi-elliptical and V-notched steel specimens", Procedia Engineering 133 (2015), 348 – 361.
4. Alshoaibi A., Yasin O., "Finite element simulation of crack growth path and stress intensity factors evaluation in linear elastic materials", J. Comput. Appl. Res. Mech. Eng. Vol. 11. No. 1, pp. 139-149, 2021, DOI: 10.22061/JCARME.2019.5081.1622.
5. Alshoaibi A., Fageehi Y., "Numerical Analysis of Fatigue Crack Growth Path and Life Predictions for Linear Elastic Material", Materials 2020, 13(15), 3380; <https://doi.org/10.3390/ma13153380>.
6. Ali Fageehi Y., "Fatigue Crack Growth Analysis with Extended Finite Element for 3D Linear Elastic Material", Metals 2021, 11(3), 397; doi.org/10.3390/met11030397.