

СОФТУЕРНО ОПРЕДЕЛЯНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА ПУКНАТИНОУСТОЙЧИВОСТ ПРИ СТАНДАРТНИ ОБРАЗЦИ, ПОДЛОЖЕНИ НА ЦИКЛИЧНО НАТОВАРВАНЕ.

Иванка ДЕЛОВА

ivankadelova@tu-plovdiv.bg

Райчо РАЙЧЕВ

rpraichev@tu-plovdiv.bg

катедра „Механика“, ТУ София - филиал Пловдив, 4000, БЪЛГАРИЯ

Основната цел в настоящата статия е определяне на основни параметри на пукнатиноустойчивост при стандартни пробни тела, подложени на циклично натоварване. За настоящото изследване са използвани образци с наличие на предварително иницирирана пукнатина. Образците са подложени на триточково и четириточково огъване. Симулациите са реализирани с помощта на специализирания софтуер nCode Designlife. Получените резултати за броя цикли до разрушение и коефициента на интензивност на напрежението при различни геометрични съотношения на линейните размери са представени в графичен вид.

Ключови думи: пукнатиноустойчивост, nCode Designlife, коефициента на интензивност на напрежението.

1. Увод

Изследванията, свързани с нарастването на уморни пукнатини играят важна роля за да бъде оценена якостта на инженерните компоненти, както и техния експлоатационен живот. Използвайки основната концепция от механиката на еластично разрушение, областта на напрежение пред фронта на пукнатина се характеризира с един параметър, известен като коефициент на интензивност на напрежението K_I . Нарастването и развитието на пукнатината зависи именно от този параметър. Поради тази причина неговото определяне при различни видове натоварвания е от съществено значение.

Основна цел в [Gong et al. 2017] е да се оцени продължителността на растежа на уморните пукнатини, образувани при лопатките на шнек в специализирана машина. Нарастването на тези пукнатини се оценява на базата на произволно натоварване, което е разпределено по Гаусов закон, кривата $da/dN - \Delta K$, линейно-еластичната механика на разрушение и модела на Остин за растеж на пукнатините. Получените резултати показват, че наличието на уморна пукнатина води до внезапно разрушение на лопатката на шнека и при първоначален размер на пукнатината от 1,00 mm, животът на лопатката е приблизително 3,18

години, с крайна дължина на пукнатината от 4,8 mm.

В [Beden et al. 2010] основната цел е да се определят ефектите от разпространение на уморни пукнатини при натоварване с променлива амплитуда. Използвани са различни спектри на натоварване, базирани на основа на моделите на Austen, Forman и NASGRO. Получените резултати са сравнени с резултати от симулации, осъществени с помощта на специализираните софтуери FASTRAN и AFGROW. Моделите са валидирани с известни в специализираната литература данни от тестове за растеж на уморни пукнатини при алуминиеви сплави 2024-T3. Резултатите от симулациите показват добро съответствие с тестовите данни.

В [Malekan et al. 2021] е представен нов, свободно разпространяван плъгин за симулиране на нарастване на пукнатини от умора. Този плъгин използва средата на специализирания софтуер Abaqus. Добавката включва пет различни модела на растеж на пукнатини от умора и разчита на разширения метод на крайните елементи за симулиране разпространението на пукнатини. Добавката е ограничена до 2D анализи, но покрива всички необходими стъпки за симулации на растеж на пукнатини от умора: от създаване на

геометрията до визуализиране на резултатите. Изпълнението на приставката се валидира чрез сравняване на нейните прогнози с аналитични и експериментални резултати.

Целта в [Nemant et al. 2016] е да се анализира механичното напрежение и да се оцени работоспособността на предната ос на тежкотоварен автомобил при вертикално натоварване и вертикално спирачно усилие. Издръжливостта на предната ос при циклични натоварвания обикновено се оценява чрез методите за издръжливост на напрежение и деформация. Сглобката на гредата на предния мост е моделирана в софтуера NX. Анализът на напрегнатото състояние се извършва в работната среда на ANSYS, а анализът на умора се осъществява чрез допълнителния модул nCodeDesignlife при различни случаи на натоварване. Издръжливостта на оста, получена по метода на крайно-елементния анализ, е повече от 2×10^5 цикъла, което се счита за безопасно при случаите на вертикално натоварване. На базата на същия метод за уморната издръжливост са получени стойности от 4×10^3 цикъла, което се счита за безопасно при случай на вертикално спирачно усилие.

В [Mi et al. 1994] е представено приложение на метода на двойните гранични елементи за анализ на триизмерно нарастване на пукнатини в смесен режим. Процесите на нарастване на пукнатината се симулират числено с инкрементален анализ на разширяването на пукнатината, базиран на критерия за минимална енергийна плътност на деформация и закон за растеж на уморна пукнатина. За всяко разширение на пукнатината, размерът (растеж на пукнатината) и посоката на растеж се оценяват по фронта на пукнатината. Метода на двойните гранични елементи се прилага за извършване анализ на изолирана област и за определяне коефициента на интензивност на напрежението. Разширението на пукнатината се моделира с въвеждането на нови гранични елементи, премахвайки изискването за вътрешно повторно изглаждане-характеристика, която е характерна за метода на двойните гранични елементи. Резултатите от анализа са представени за няколко геометрии, включително планарно и непланарно развитие на пукнатини.

В [Jiang et al. 2010] се предлага оптимален метод на крайните елементи (XFEM), чрез който да бъдат неутрализирани недостатъците в стандартния XFEM-метод, приложен в софтуера Abaqus. Разширеният метод на крайните елементи (XFEM) предоставя ефективен инструмент за анализ на проблеми свързани с

механиката на разрушение. XFEM се състои от стандартни крайни елементи, които се използват в по-голямата част от разглежданата област и обогатени крайни елементи в локални подобласти за да бъдат уловени специфични свойства на решението, като прекъсвания и сингулярности. Представени са модифицирани функции за обогатяване на мрежата, които могат да се възпроизведат точно навсякъде в областта. За анализ на разрушение е разработена съответна програма на FORTRAN. За сравнение на програмата се използва класически проблем от механиката на разрушение. Резултатите показват, че оптималният XFEM може да минимизира грешките и да подобри числената прецизност.

В [Zhu et al. 2017] е изследвана промяната на разпределение на остатъчното напрежение при разпространението на уморни пукнатини. Прогнозирано е разпространението на пукнатини чрез отчитане на остатъчното напрежение. Установен е подход за анализ на резултатите, който е базиран на дифузионната теорията за кухините, която се прилага за изследване на пукнатини с различна ориентация. Проведени са експерименти, за да се валидират резултатите от прогнозата за остатъчното напрежение. Функция базирана на разпределението на Вейбул е използвана, за да се оцени точността на прогнозираното остатъчно напрежение. Създаден е модел за анализ, който се използва за оценка скоростта на разпространение на пукнатини. Анализите показват, че получените резултати са по същество идентични с експерименталните, което дава основание да се приеме, че предложеният подход е адекватен.

Целта на настоящата работа е с помощта на специализирания софтуер nCodeDesignlife, да се определят основни параметри на пукнатиноустойчивост при стандартни пробни образци, които се характеризират с наличие на предварително инициирани пукнатини. Образците са подложени на триточково и четириточково огъване.

Основните параметри са изследвани за различни геометрични съотношения на линейните размери на образците.

2. Описание на софтуера nCodeDesignlife.

Специализирания софтуер nCodeDesignlife съдържа изчерпателен набор от инструменти и използва усъвършенствани методи за определяне издръжливостта на конструкциите, като се базира на резултатите от основен анализ на крайните елементи (FEA). Симулациите се осъществяват чрез функционални блокове,

наречени „Глифове (Glyphs)“, които са разположени в основния интерфейс.

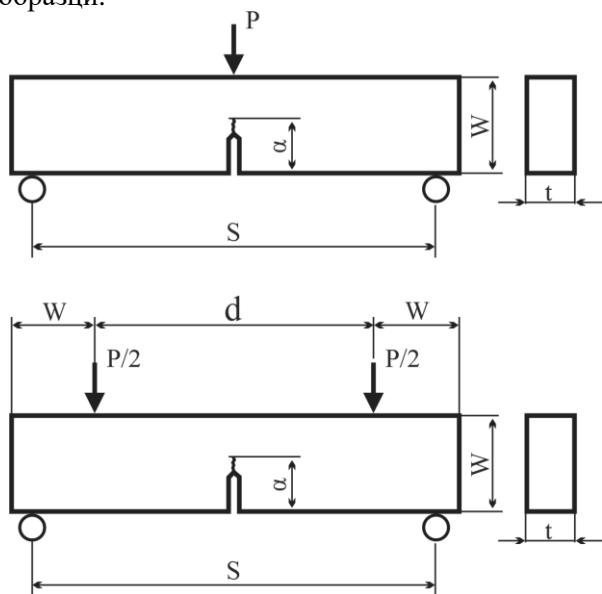
В nCodeDesignlife анализът за растеж на пукнатини се изпълнява при следната последователност:

- Входен сигнал;
- Глиф за растеж на пукнатини;
- Глиф за записване на получените данни в файл;
- Глиф за визуализиране на получените резултати.

3. Описание на изследваните образци.

Обекти на изследване в настоящата статия са стандартни призматични пробни образци, с наличие на предварително инициирани пукнатини. Образците са подложени на триточково и четириточково огъване

На фиг. 1 са представени формата и параметричните размери на изследваните образци.



фиг.1 Схема на изследваните образци.

Материалът използван в симулацията за самите образци е нисковъглеродна стомана SAE 1006 (съгласно стандарт ASTM A510M).

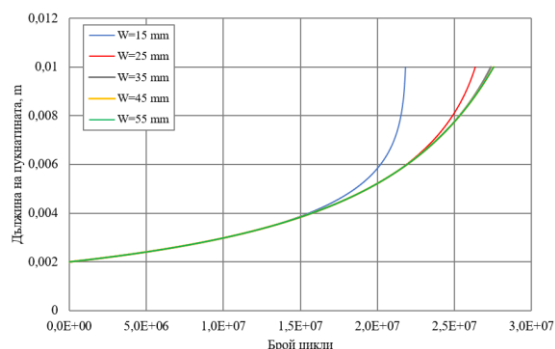
Между геометричните размери на образците съществуват следните съотношения: $S=4W$ ($S=8W$), $t=W/2$.

4. Резултати от симулациите.

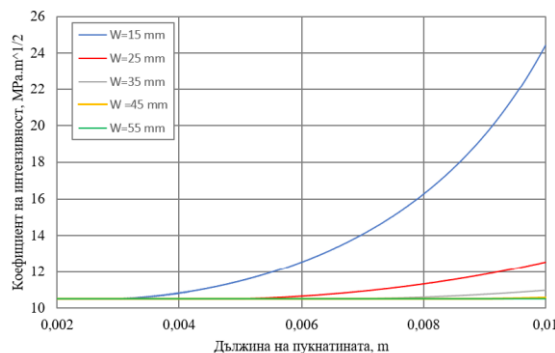
Симулациите при триточковото огъване са осъществени и за двата варианта на параметъра S ($S=4W$ и $S=8W$), докато четириточковото огъване е реализирано при $S=4W$. Изследванията и при двата типа пробни образци са осъществени при следните геометрични размери: $W=15\text{mm}$, 25mm , 35mm , 45mm , 55mm ; $\alpha=2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$; $P=100 \text{ N}$.

Настройването на входните параметри в nCodeDesignlife е реализирано с помощта на функционалния блок Crack Growth, като симулациите за триточково огъване са базирани на вградените в софтуера параметри, отговарящи за този тип натоварване. За четириточковото огъване е използвана възможността за използване на потребителска функция, тъй като този тип натоварване не фигурира в състава на стандартните натоварвания и образци към nCodeDesignlife.

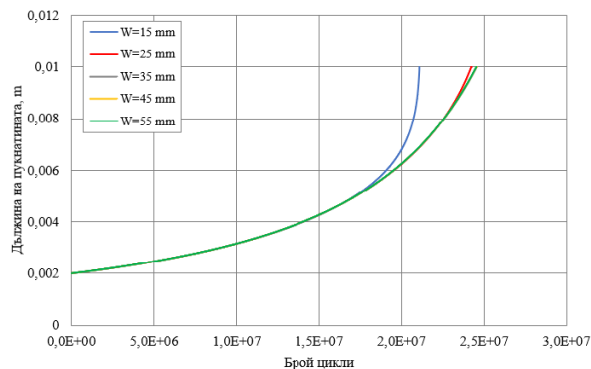
На фиг. 2, фиг. 3, фиг. 4, фиг. 5, фиг. 6 и фиг. 7 в графичен вид са представени получените резултати от симулациите.



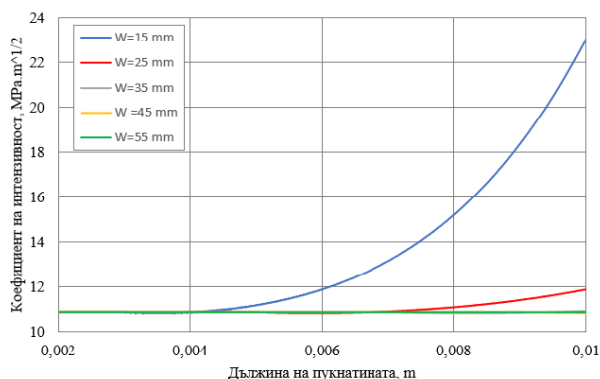
фиг. 2 Дължина на пукнатина в функция от броя цикли при триточково огъване ($S=4W$).



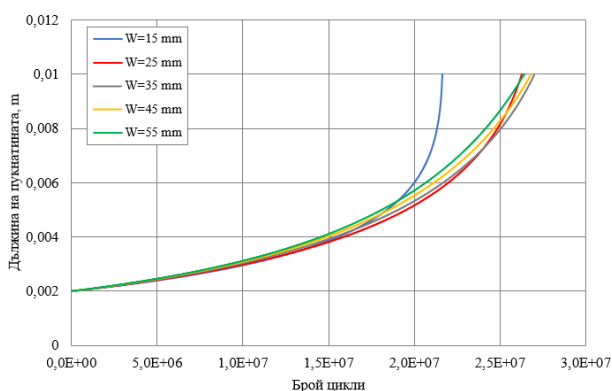
фиг. 3 Коефициент K_I в функция от дължината на пукнатина при триточково огъване ($S=4W$).



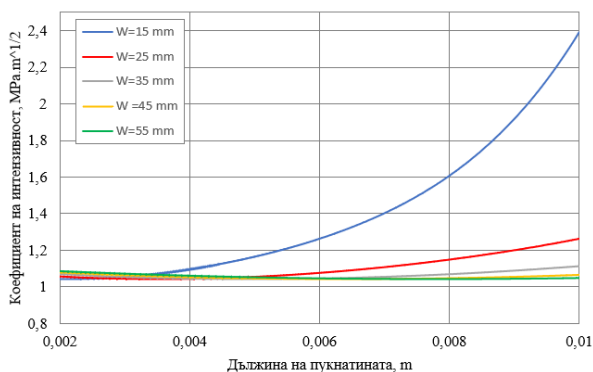
фиг. 4 Дължина на пукнатина в функция от броя цикли при триточково огъване ($S=8W$).



фиг. 5 Коефициент K_I в функция от дължината на пукнатина при триточково огъване ($S=8W$).



фиг. 6 Дължина на пукнатина в функция от броя цикли при четириточково огъване.



фиг. 7 Коефициент K_I в функция от дължината на пукнатина при четириточково огъване.

5. Заключение

Получените резултати от триточковото огъване показват, че:

- И при двата варианта на разстояние между опорите ($S=4W$ и $S=8W$), броя на циклите до разрушение е най-малък при височина на образците $W=15\text{mm}$, а съответно коефициента K_I е най-голям. При $W=25\text{mm}$, 35mm , 45mm и 55mm разликата в броя на циклите е по-малка от 4% и за двата варианта на разстоянието S а разликата между коефициентите K_I е по-малка от 12%.

- При образците с разстояние $S=8W$ жизнения цикъл е с 12% по-малък от колкото при тези с разстояние $S=4W$, докато разликата между коефициентите на интензивност K_I е по-малка от 6%.

Получените резултати от четириточковото огъване показват, подобни съотношения между геометричните размери на образците, броя цикли до разрушение и коефициента K_I .

Сравнявайки стойностите на K_I при триточковото и четириточковото огъване се оказва, че разликата между коефициентите на интензивност при различните геометрични параметри W , е по-малка от 6%.

За да бъдат направени окончателни изводи от получените резултати са необходими по-задълбочени изследвания на симулационните модели, както и тяхното валидиране с реални експерименти.

ЛИТЕРАТУРА

Beden Abdullah S., Ariffin A.K., Al-Asady N.A., "Fatigue crack growth simulation of aluminium alloy under spectrum loadings", *Materials and Design* 31 (2010) 3449–3456, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.039>

Gong J., Zhang F., Li P., Li J., Li S., Yang Z., "Fatigue Crack Growth Life Prediction of Screw Blade in Screw Sand Washing Machine based on Austen Growth Law", *Proceedings of the Second International Conference on Mechanics, Materials and Structural Engineering (ICMMSE 2017)*, <https://doi.org/10.2991/icmmse-17.2017.26>

Hemant L. Aghav, M.V. Walame., "Stress Analysis and Fatigue Analysis of Front Axle of Heavy-Duty Truck using ANSYS Ncode Design Life for Different Loading Cases", *Journal of Engineering Research and Application*, ISSN : 2248-9622, Vol. 6, Issue 6, (Part -2) June 2016, pp.78-82

Jiang S., Ying Z., Du C., "The optimal XFEM approximation for fracture analysis", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 10, 2010, DOI 10.1088/1757-899X/10/1/012067

Malekan M., Khosravi A., St-Pierre J., "An Abaqus plug-in to simulate fatigue crack growth", *Engineering with Computers* volume 38, pages2991–3005 (2022), <https://doi.org/10.1007/s00366-021-01321-x>

Mi, Y.; Aliabadi, M. H., "Three-dimensional crack growth simulation using BEM", *Computers & Structures*, Volume 52, Issue 5, 3 September 1994, Pages 871-878, [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(94\)90072-8](https://doi.org/10.1016/0045-7949(94)90072-8)

Zhu L., Jia M., "A new approach for the influence of residual stress on fatigue crack propagation", *Results in Physics*, Volume 7, 2017, Pages 2204-2212, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.06.039>