

ЧИСЛЕН АНАЛИЗ НА ВЛИЯНИЕТО НА НАЧАЛНА ПУКНАТИНА ВЪРХУ УСТОЙЧИВОСТТА КЪМ РАСТЕЖ НА ПУКНАТИНИ ПРИ СТ-ОБРАЗЕЦ

Райчо РАЙЧЕВ Иванка ДЕЛОВА Йордан МИРЧЕВ Цветомир БОРИСОВ
rpraichev@tu-plovdiv.bg ivankadelova@tu-plovdiv.bg
mirchev@imbm.bas.bg ts.borisov07@gmail.com

Катедра „Механика“, ТУ София - филиал Пловдив, 4000, БЪЛГАРИЯ
 Институт по Механика- БАН, София, 1113, БЪЛГАРИЯ

В статията е изследвано влиянието на началната пукнатина върху растежа на уморни пукнатини при СТ-образци от стомана 42CrMo4. Чрез числен модел в ANSYS (Arbitrary Crack и SMART Crack Growth) е проследен растежът на дефекта от 5 mm до 15 mm. Получените стойности за коефициента на интензивност на напреженията са сравнени със съществуващи аналитични зависимости, като е установено добро съответствие. Резултатите показват, че началният размер на пукнатината оказва съществено влияние върху устойчивостта на материала и критичната дълбочина на дефекта.

Ключови думи: умора, СТ-образец, ANSYS, пукнатини

1. Увод

Умората на материалите представлява един от най-честите механизми на разрушаване в машиностроенето, енергетиката, транспорта и редица други индустрии. Под въздействие на повтарящи се натоварвания в конструкционните елементи възникват локализиращи зони с повишена концентрация на напрежения, които в течение на експлоатацията могат да доведат до зародиш и развитие на пукнатини. Тези процеси са особено опасни, тъй като протичат скрито в рамките на значителна част от живота на конструкцията, а окончателното разрушаване настъпва внезапно и често без видими предварителни признаци. Поради това изследването на закономерностите на растежа на уморните пукнатини е ключов етап при прогнозиране на надеждността и оценка на остатъчния живот на машинни елементи и съоръжения.

В рамките на експерименталните методики за изследване на устойчивостта към растеж на пукнатини широко приложение намират стандартните образци, разработени от ASTM и ISO. Един от най-често използваните е СТ-образецът (Compact Tension specimen), който се отличава с удобна геометрия за въвеждане на контролирана начална пукнатина и за прилагане на натоварване в условия, близки до реалната експлоатация. Чрез изпитване на СТ-образци се определят важни параметри като коефициента на интензивност на напреженията (SIF), прага на

растеж на пукнатината и константите на закона на Парис, описващ скоростта на уморните пукнатини.

Наличието на начална пукнатина в образеца играе съществена роля върху устойчивостта към растеж. Размерът и формата на пукнатината определят първоначалните стойности на SIF и влияят върху прехода между стабилен и нестабилен растеж. По-големите начални дефекти могат да доведат до ускорено развитие на пукнатината и до намаляване на ресурса на материала, докато по-малките дефекти удължават стадия на стабилна уморна пукнатина. В инженерната практика този аспект е от особено значение, тъй като реалните детайли често съдържат производствени или експлоатационни дефекти, които трябва да бъдат отчетени при проектирането и оценката на остатъчния живот.

Съвременните изследвания показват, че числените методи и в частност методът на крайните елементи (МКЕ) са мощен инструмент за анализ на развитието на пукнатини. Чрез тях може да се моделира разпределението на напрежения и деформации в околността на челото на пукнатината, да се изчислят стойностите на SIF и да се прогнозира скоростта на растеж при различни условия на натоварване. В допълнение, числените симулации дават възможност за оценка на влиянието на различни начални дължини на пукнатината, което трудно може да бъде реализирано експериментално

поради ограничения във времето, ресурси или точност на изработване на образците.

В последните години все по-голямо внимание се отделя на интегрирания подход, съчетаващ експериментални данни с резултати от числени симулации. Това позволява не само валидиране на числените модели, но и изграждане на по-надеждни прогностични методики за оценка на поведението на реални конструкции. Специален интерес представляват легираните стомани, които намират приложение в силово натоварени елементи като болтове, оси и валове. За тях е от съществено значение да се познава влиянието на началните дефекти върху устойчивостта към уморно разрушаване, тъй като в практиката често се допуска наличие на микропукнатини от механична обработка, термообработка или експлоатационни въздействия.

Настоящата работа е насочена към числен анализ на влиянието на началната пукнатина върху устойчивостта към растеж на пукнатини при СТ-образец. В рамките на изследването чрез метод на крайните елементи се моделират различни начални дължини на пукнатината и се оценява тяхното въздействие върху стойностите на коефициента на интензивност на напреженията и върху устойчивостта на материала към развитие на умора. Получените резултати могат да бъдат използвани за по-прецизна оценка на ресурса на конструкционни елементи и за разработване на критерии за допустими начални дефекти при експлоатация.

В тази връзка в научната литература са представени редица изследвания, насочени към влиянието на началните пукнатини върху уморния растеж и остатъчния живот на конструктивни елементи.

В [Zhang et al. 2023] е изследвано влиянието на началната позиция на пукнатината върху уморното разрушаване на зъби в тежко натоварени предавки чрез XFEM модел в ABAQUS, валидиран експериментално. Използван е материал 20Cr2Ni4A (цементация, закаляване, отвърщане), като пукнатини са зададени на пет позиции в основата на зъба. Установено е, че дефекти в средната част се развиват най-бързо в широчина и дълбочина, докато крайно разположените нарастват по-бавно и удължават ресурса. Фрактографският анализ свързва зародиша с неметални включвания, а структурата показва, че мартензитът ускорява растежа по широчина, а бейнитът го ограничава в дълбочина. Заключение е, че най-уязвима е средната зона на корена и повишаването на якостта там би удължило живота на предавките.

В [Kumar et al. 2015] е предложен усъвършенстван XFEM подход за моделиране на уморни пукнатини, при който хомогенизацията на областите извън пукнатината намалява изчислителния обем до около 20% при запазена точност. Резултатите за скорост на растеж и живот съвпадат с класически XFEM и експериментални данни, доказвайки ефективността на метода в инженерни приложения.

В [Fang et al. 2023] е изследвано влиянието на началната пукнатина върху уморното разпространение при смесени режими (Mode II + III), като е установено, че доминиращо е въздействието на режим II. Открит е обратнопропорционален ефект – по-дълбоки пукнатини растат по-бавно, докато увеличаването им ускорява разпространението. Резултатите подчертават ключовото значение на геометрията и размерите на дефектите за прогнозирането на експлоатационния живот.

В [Koteš et al. 2021] е изследвано влиянието на уморните пукнатини върху носимоспособността на стоманени мостови конструкции чрез експериментални данни и числени модели. Установено е, че развитието на пукнатини значително намалява устойчивостта и води до прогресивно влошаване на носимоспособността. Представен е интегриран подход, съчетаващ уморен анализ и оценка на остатъчната здравина, приложим за прогнозиране на експлоатационния живот и необходимостта от ремонт или подсилване.

В [Xu et al. 2022] е представено числено и експериментално изследване върху влиянието на ъгъла на началните пукнатини върху уморното разрушаване на валове. Чрез моделиране с метода на крайните елементи и изпитвания е установено, че с увеличаване на ъгъла на началната пукнатина се ускорява преходът към нестабилен растеж и се скъсява фазата на стабилно развитие. Авторите разграничават три основни фази на разпространение: бърза, буферна и нестабилна, като продължителността на буферната фаза е силно зависима от ориентацията на началната пукнатина. Резултатите подчертават важността на геометрията на дефекта за оценката на остатъчния живот и надеждността на конструктивните елементи.

Статията на [Zhang et al. 2023] изследва разпространението на уморни пукнатини и оценката на живот до разрушаване при високоякостни болтове чрез методите на механика на разрушение. Авторите комбинират числени симулации с ABAQUS и FRANC3D и експериментални изпитвания, за да моделират

растежа на пукнатини в резбовите съединения. Резултатите показват, че размерът и положението на началната пукнатина значително влияят върху скоростта на уморно напукване и остатъчният живот на болтовете. Сравнението между симулации и експерименти демонстрира добро съответствие, което потвърждава надеждността на използвания подход. Авторите подчертават, че представената методология може да служи като основа за прогнозиране на ресурса и за подобряване на надеждността на болтови съединения в инженерната практика.

Статията на [Делова et al. 2025] представя числен анализ на растежа на уморни пукнатини в болтове от стомана 42CrMo4 при различни термообработки. Резултатите показват, че термичната обработка значително повишава устойчивостта на материала, като най-добри характеристики се постигат при цементация и закаляване, а разработената методология позволява надеждна прогноза на остатъчният живот на болтовите съединения.

Статията на [Райчев et al. 2025] представя моделиране на уморни пукнатини в СТ-образци от стомана 42CrMo4 чрез ANSYS и MATLAB, като е приложен законът на Парис. Установено е добро съответствие между двата подхода и е показано, че термообработката значително подобрява устойчивостта на материала, особено при цементация и закаляване.

Целта на настоящата статия е да се извърши числен анализ на влиянието на началната пукнатина върху устойчивостта към растеж на пукнатини при СТ-образци. Изследването има за задача да определи как началният размер на дефекта повлиява върху скоростта на уморно разпространение, критичната дълбочина на пукнатината и остатъчният живот на материала. За тази цел се прилага комбиниран подход, включващ моделиране чрез метода на крайните елементи и аналитични зависимости от механика на разрушение, като се цели постигане на точна прогноза за поведението на конструктивните елементи при циклично натоварване.

2. Числен модел и подход на изследването.

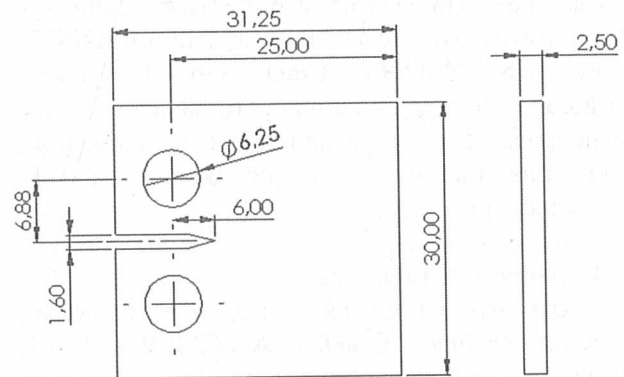
В рамките на настоящото изследване е разработен числен модел на СТ-образец в съответствие със стандарта ASTM E399/E647, който е широко използван за анализ на уморното разпространение на пукнатини. Геометрията и размерите на образца са избрани така, че да осигуряват коректно изчисляване на коефициента на интензивност на напреженията (SIF) и да се минимизират граничните ефекти.

Материалът, използван в симулациите, е легирана стомана 42CrMo4, която намира широко приложение в елементи, работещи под циклични натоварвания. В числените модели са въведени различни начални дължини на пукнатината, като целта е да се изследва тяхното влияние върху скоростта на растеж и критичната дълбочина. За по-пълна оценка са разгледани различни сценарии на натоварване с променлив коефициент на асиметрия R, отразяващ реални условия на циклично натоварване.

Симулациите са проведени чрез метода на крайните елементи в ANSYS Workbench (SMART Crack Growth), който позволява автоматизирано проследяване на челото на пукнатината и изчисляване на SIF във всяка стъпка на растеж. За проверка на надеждността на резултатите са използвани и аналитични зависимости от закона на Парис, чрез които се оценява скоростта на развитие на пукнатината и остатъчният живот.

Основните параметри, получени от анализа, са скоростта на растеж на пукнатината, критичната ѝ дълбочина и броят цикли до разрушаване, които служат като база за дискусия и сравнение.

На фигура 1 е представен чертеж с геометричните размери (в mm) на компактният образец, използван в симулациите.



фиг.1 Чертеж на компактният образец.

Аналитичната зависимост, по която се определя коефициента на интензивност на напрежението за СТ-образец има следния вид:

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (1)$$

където:

K_I - коефициент на интензивност на напрежението, [MPa√m];

P - приложена сила [N];

B - дебелина на образца [mm];

W - ширина на пробата [mm];

a - дължина на пукнатината [mm];

$f(a/W)$ - емпирична корекционна функция.

Съгласно ASTM E399, за компактен образец тя се характеризира със следното уравнение:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2+\left(\frac{a}{W}\right)}{\left(1-\frac{a}{W}\right)^{3/2}} \cdot \left(0.886 + 4.64\left(\frac{a}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{W}\right)^4\right), \quad (2)$$

Законът на Парис описва скоростта на развитие на пукнатината в зависимост от амплитудата на коефициента на интензивност на напрежението. Основната формула има следния вид:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m, \quad (3)$$

където:

da/dN - скорост на разрастване на пукнатината на цикъл (м/цикл);

ΔK - амплитуда на коефициента на интензивност на напрежението;

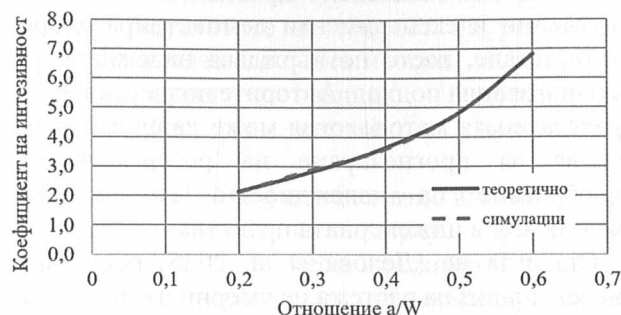
C, m - материални константи (зависят от термичната обработка);

Изследването се осъществява по следния начин: първо се дефинират пет начални дължини на пукнатината в диапазона $0.2 \leq a/W \leq 0.6$, с цел да се обхване влиянието на различни стартови дефекти върху устойчивостта на образца. За всяка от тях чрез аналитичните зависимости се изчисляват коефициентът на интензивност на напрежението и скоростта на развитие на пукнатината. Получените стойности се сравняват с резултатите от числените симулации в ANSYS Workbench (SMART Crack Growth), което позволява да се оцени точността на модела и да се направят изводи за влиянието на началната пукнатина върху остатъчния живот на СТ-образца.

3. Резултати и дискусия.

В рамките на числения модел е приложен модулът *Arbitrary Crack* в ANSYS Workbench 2021R1, който позволява задаване и автоматизирано проследяване на произволна пукнатина в образца. Началната дължина на дефекта е дефинирана като $a = 5 \text{ mm}$, а развитието на пукнатината е проследено до достигане на $a = 15 \text{ mm}$. Симулациите са реализирани при различни коефициенти на асиметрия на натоварването ($R = 0; 0.1; 0.3$ и -1), с цел да се обхванат различни експлоатационни режими. Всяка стъпка от растежа се реализира чрез SMART Crack Growth, при което се изчисляват стойностите на коефициента на интензивност на напреженията (SIF) и се оценява устойчивостта на СТ-образца към уморно разрушаване. Получените резултати служат като база за сравнение с аналитичния подход и позволяват по-прецизна прогноза за критичната дълбочина на пукнатината.

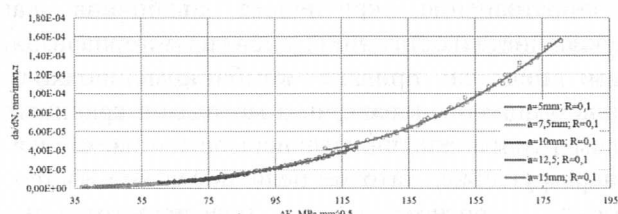
На фигура 2 са представени резултатите за коефициента на интензивност на напрежението, получени от аналитичната зависимост и симулациите при натоварване $P=200 \text{ N}$.



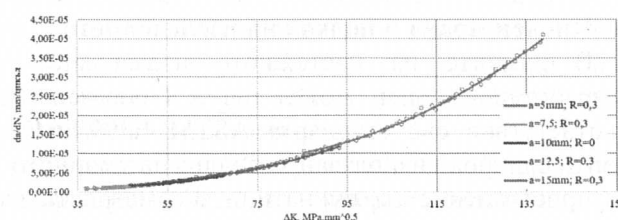
фиг.2 Коефициент SIF във функция от геометричните размери на образца

Съпоставянето между аналитичните резултати и численото моделиране в ANSYS показва разлики под 5% за целия диапазон на пукнатината $a=5\div 15 \text{ mm}$. При малки дефекти ($a = 5 \text{ mm}$) стойностите съвпадат почти напълно, като отклонението е под 1%. С нарастване на пукнатината разликата се увеличава леко – при $a=10 \text{ mm}$ тя достига около 3%, а при $a=15 \text{ mm}$ не надвишава 5%. Тези резултати показват висока надеждност на числения модел и потвърждават неговата приложимост за прогнозиране на уморното поведение на СТ-образци от стомана 42CrMo4.

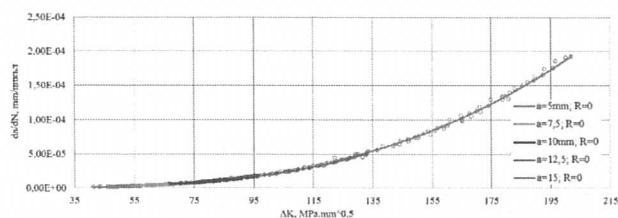
На фигури 3, 4, 5 и 6 са представени резултатите за скоростта на нарастване на пукнатините във функция от ΔK , за различните дължини на пукнатините при различни коефициенти R .



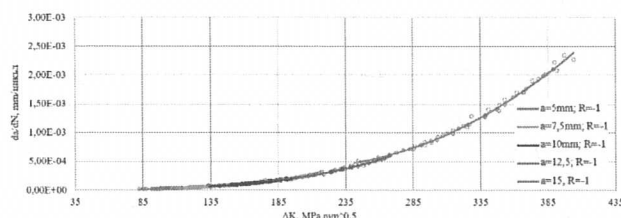
фиг. 3 Зависимост на ΔK от скоростта da/dN при $R = 0,1$.



фиг. 4 Зависимост на ΔK от скоростта da/dN при $R = 0,3$.



фиг. 5 Зависимост на ΔK от скоростта da/dN при $R = 0$.



фиг. 6 Зависимост на ΔK от скоростта da/dN при $R = -1$.

Анализът на резултатите показва ясно, че коефициентът на асиметрия R оказва съществено влияние върху скоростта на уморното разпространение на пукнатините. При отрицателни и ниски стойности на R ($R = -1$ и $R = 0$) скоростта на растеж е по-висока, докато при положителни стойности ($R = 0.1$ и $R = 0.3$) се наблюдава относително по-бавно развитие. Независимо от режима на натоварване, началната дължина на пукнатината е определящ фактор – по-големите дефекти водят до ускорено достигане на критичния коефициент K_{IC} и намаляват остатъчния живот на материала. Това подчертава необходимостта от строг контрол върху стартовите дефекти в конструктивни елементи от стомана 42CrMo4, подложени на циклично натоварване

4. Заключение.

Извършеният числен анализ на СТ-образци от стомана 42CrMo4 потвърди същественото влияние на началната дължина на пукнатината и режима на натоварване върху устойчивостта към уморно разрушаване. Съпоставянето на аналитичните зависимости с резултатите от численото моделиране в ANSYS показва добро съответствие и доказва надеждността на прилагания подход. Установено е, че увеличаването на началния дефект води до по-бързо нарастване на коефициента на интензивност на напреженията и съответно до намаляване на остатъчния живот на материала. Анализът на различните режими на натоварване показва, че при отрицателни и ниски стойности на коефициента на асиметрия ($R = -1$ и $R = 0$) скоростта на уморно разпространение е значително по-висока, докато при положителни стойности ($R = 0.1$ и $R = 0.3$) развитието е относително по-бавно.

Получените резултати подчертават необходимостта от стриктен контрол върху началните дефекти и отчитане на реалните режими на натоварване при оценка на остатъчния живот на конструктивни елементи от стомана 42CrMo4, работещи в условия на циклично натоварване. Това позволява разработването на по-надеждни критерии за допустими дефекти и повишаване на експлоатационната надеждност на машинни компоненти и съоръжения.

Благодарности: Авторите изказват своята благодарност за финансовата подкрепа от Европейския фонд за регионално развитие по линия на оперативна програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация 2021–2027“, проект BG16RFPR002-1.014-0005-C01, Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко-и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- Zhang Y, Tang Z, Zhao L, Gong B, Wang G, Li Z. Effect of Initial Crack Position on Crack Propagation Behaviors of Heavy-Duty Transmission Gear. *Materials*. 2023; 16(17):5961. <https://doi.org/10.3390/ma16175961>
- Kumar S., I.V. Singh, B.K. Mishra, A homogenized XFEM approach to simulate fatigue crack growth problems, *Computers & Structures*, Volume 150, 2015, Pages 1-22, ISSN 0045-7949, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.12.008>.
- Fang X., Zhang H., Ma D., Influence of initial crack on fatigue crack propagation with mixed mode in U71Mn rail subsurface, *Engineering Failure Analysis*, Volume 136, 2022, 106220, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106220>.
- Koteš P, Vičan J. Influence of Fatigue Crack Formation and Propagation on Reliability of Steel Members. *Applied Sciences*. 2021; 11(23):11562. <https://doi.org/10.3390/app112311562>
- Xu Z, Cui Y, Li B, Liu K, Shi F, Cao P. Impact Analysis of Initial Cracks' Angle on Fatigue Failure of Flange Shafts. *Coatings*. 2022; 12(2):276. <https://doi.org/10.3390/coatings12020276>
- Zhang, P., Li, J., Zhao, Y. et al. Crack propagation analysis and fatigue life assessment of high-strength bolts based on fracture mechanics. *Sci Rep* 13, 14567 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41804-z>
- Delova I, Borisov T, Mirchev Y, Raychev R. Numerical Modeling and Analysis of Fatigue Failure in 42CrMo4 Steel Pivot Bolts at Different Heat Treatments. *Engineering Proceedings*. 2025; 100(1):52. <https://doi.org/10.3390/engproc2025100052>
- Raychev R, Delova I, Borisov T, Mirchev Y. Crack Growth Modeling in CT Specimens: The Influence of Heat Treatment and Loading. *Engineering Proceedings*. 2025; 100(1):61. <https://doi.org/10.3390/engproc2025100061>