

ВЛИЯНИЕ НА ОРИЕНТАЦИЯТА НА НАЧАЛНИЯ ДЕФЕКТ ВЪРХУ РАСТЕЖА 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 ориентацията на началната пукнатина върху растежа на уморни дефекти при СТ-образци от стомана 42CrMo4. Чрез числени симулации в ANSYS Workbench (Smart Crack Growth) са разгледани различни ъгли на наклон на пукнатината спрямо оста на натоварване. Анализирани са стойностите на коефициента на интензивност на напреженията (SIF), пътят на разпространение и параметрите на пукнатиноустойчивост. Резултатите показват, че ориентацията на началния дефект оказва съществено влияние върху скоростта и траекторията на пукнатината, което е ключово за по-точна прогноза на остатъчния живот на конструктивни елементи.

Ключови думи: умора, СТ-образец, ориентация на пукнатини, ANSYS, 42CrMo4

1. Увод

Изследването на растежа на уморните пукнатини при стандартни СТ-образци е от съществено значение за по-доброто разбиране на поведението на конструкционните материали при циклично натоварване. Началните дефекти в материала често определят скоростта и посоката на разпространение на пукнатината, като тяхната геометрия и ориентация могат да окажат значително влияние върху локалното напрегнато състояние и интензивността на напреженията в челото на пукнатината. В практиката ориентацията на дефекта рядко е идеално перпендикулярна на натоварването, което налага изследване на реални сценарии, включващи наклонени или асиметрични начални пукнатини. Анализът на този ефект е важен както за прецизната оценка на остатъчния живот на елементите, така и за разработването на надеждни методи за мониторинг и прогноза на повреди. Настоящата работа разглежда влиянието на ориентацията на началния дефект върху процеса на растеж на пукнатини при СТ-образци от конструкционна стомана.

Статията [Wang et al., 2023] изследва поведението на СТ образци с отклонени пукнатини чрез числени симулации с метода на крайните елементи. Авторите анализират влиянието на геометрията и ъгъла на отклонение

на пукнатината върху ключови фрактурни параметри като SIF и енергия на разрушаване. Резултатите показват, че отклонението на пукнатината води до промени в пътя на разпространение и до значителна вариация на локалните напрежения. Изследването предоставя ценна информация за по-точното прогнозиране на поведението на материали с дефекти и е полезно за проектиране на по-надеждни конструкции.

Статията [Fageehi et al., 2025] изследва влиянието на първоначални ударни дефекти върху уморното поведение на композитни ламинирани материали. Проведени са изпитвания, при които образците първо се подлагат на нискоенергиен удар, а след това на циклично натоварване. Резултатите показват, че дефекти като деламинации и микропукнатини ускоряват процеса на уморно разрушаване и намаляват остатъчния живот на материала. Изследването подчертава значението на комбинирания анализ на удар и умора за по-точна оценка на надеждността на композитни конструкции в авиацията и транспорта.

В [Laboviciute et al., 2015] е представено приложение на CJP (Christopher-James-Patterson) модел за анализ на уморни пукнатини под различни ъгли в алуминий 2024-T6. Чрез цифрова корелация на образа са измерени полетата на преместване около върха на

пукнатината и сравнени с предсказанията на модела. Резултатите показват, че CJP моделът отчита ефекта на пластичното екраниране и дава по-добра корелация със скоростта на растеж на наклонени пукнатини спрямо класическите методи. Изследването демонстрира потенциала на модела за по-точно описание на сложни траектории на уморно разпространение.

Статията [Rani et al., 2024] изследва ефекта на ориентацията на пукнатината и дебелината на образца върху поведението при разрушаване на СТ образци чрез метода на крайните елементи. Резултатите показват, че с увеличаване на ъгъла приносът на Mode I намалява, а на Mode III се увеличава, което води до по-изразен смесен режим. При по-голяма дебелина стойностите на факторите на интензивност на напреженията също намаляват. Изследването подчертава същественото значение на геометричните параметри за оценка на устойчивостта срещу разпространение на пукнатини.

В [Alshoaibi, 2023] е изследвано влиянието на дебелината на образците върху скоростта на растеж на уморни пукнатини в метали. Установено е, че при по-тънки образци, скоростта на растеж е по-висока поради по-голямата пластичност и по-слабото ограничаване, докато при по-дебели образци се наблюдава забавяне на разпространението. Резултатите показват ясна зависимост между дебелината и параметрите на закона на Парис, което е важно за надеждното прогнозиране на остатъчния живот. Изследването подчертава необходимостта дебелината да се отчита при механични анализи и проектиране на конструкции.

Статията [Su et al. 2020] представя експериментално и числено изследване върху компактни образци под смесено натоварване. Авторите анализират поведението на пукнатините, ъгъла на отклонение, границите на натоварване и привидната устойчивост на разрушаване. Установено е, че формулата на Tanaka дава най-точни резултати за еквивалентния коефициент на интензивност на напреженията, докато критериите на MTS (Maximum Tangential Stress criterion) и Richard осигуряват по-консервативна оценка, подходяща за инженерни приложения. На базата на получените данни е предложен нов модел за прогнозиране на растежа на пукнатини в условия на смесен режим, който подобрява оценката на остатъчния живот на конструкциите.

Статията [Alshoaibi et al., 2020] представя числено моделиране на растежа на уморни пукнатини в линейно-еластични материали при смесено натоварване. Използван е модифициран

образец Compact Tension с отвори, като симулациите са проведени в ANSYS Mechanical APDL 19.2 чрез метода Smart Crack Growth. Резултатите показват, че пукнатините се привличат от отворите – или променят траекторията си към тях, или се отклоняват и продължават растежа си. Валидирането със съществуващи експериментални данни показва висока точност на предсказанията за пътя на пукнатините и уморния живот. Изследването подчертава, че числените методи са ефективна и икономична алтернатива на експерименталните тестове при анализа на смесени режими на разрушаване.

Статията [Martins et al., 2024] разглежда чрез числено моделиране поведението на пукнатини в метални материали при смесени режими на натоварване. Използван е методът на крайните елементи за определяне на факторите на интензивност на напреженията и за проследяване на пътя на пукнатините. Резултатите показват, че при комбинирано действие на Mode I и Mode II посоката на разпространение на пукнатината зависи силно от ъгъла на наклона и приложените натоварвания. Валидирането с експериментални данни потвърждава добрата точност на симулациите, а разработеният модел позволява по-точно предсказване на скоростта и траекторията на растеж на пукнатини. Изследването подчертава приложимостта на числените методи за анализ на сложни случаи на уморно разрушаване в метални конструкции.

2. Материал и методика на изследването.

Настоящото изследване е проведено изцяло чрез числено моделиране с метода на крайните елементи. Използван е стандартен СТ-образец, представен в предходни научни трудове [Raychev et. al. 2025]. Образца е изработен от конструкционна стомана 42CrMo4, характеризираща се с висока якост и добра пукнатиноустойчивост при динамични натоварвания. Материалът е моделиран като линейно-еластичен изотропен, като за целите на анализа са използвани механични характеристики от предварително осъществени експериментални изследвания.

Числените симулации са реализирани в ANSYS Workbench, модул Smart Crack Growth, който позволява автоматизирано проследяване на траекторията на пукнатината и изчисляване на коефициента на интензивност на напреженията (SIF). Геометрията на образца е дискретизирана с тетраедрална крайноелементна мрежа с локално съгъстяване около върха на пукнатината, осигуряваща висока точност на резултатите.

Граничните условия са зададени съгласно стандартната конфигурация за СТ-образци – единият отвор е фиксиран чрез цилиндрична опора, а другият е подложен на монотонно натоварване, еквивалентно на опън, приложено чрез щифтова връзка. Началната пукнатина е дефинирана в централната част на образца, като са разгледани различни ъгли на наклон спрямо оста на натоварване.

Основната цел на анализа е да се оцени влиянието на ориентацията на началната пукнатина върху пътя на нейното разпространение, стойностите на факторите на интензивност на напреженията и общите параметри на пукнатиноустойчивост. Резултатите от симулациите позволяват да се направи количествена оценка на значението на геометрията на дефекта за остатъчния живот на конструктивните елементи.

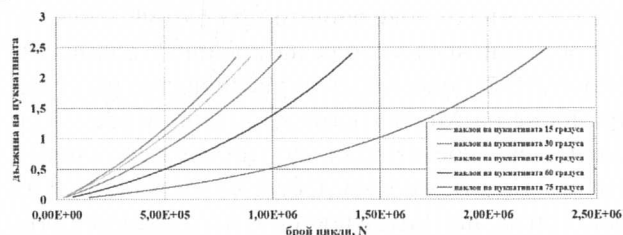
3. Резултати и дискусия.

В настоящото изследване началната пукнатина е дефинирана чрез опцията *Arbitrary Crack* в ANSYS Workbench, модул *Smart Crack Growth*. Тази функционалност позволява въвеждане на дефекти с произволна ориентация спрямо оста на натоварване и е особено подходяща за симулиране на реални експлоатационни сценарии, при които пукнатините рядко възникват в идеално перпендикулярна посока. Избраният подход дава възможност за анализ на смесен режим на разрушаване, при който в различна степен участват компонентите Mode I (отваряне) и Mode II (плъзгане).

Началната пукнатина е зададена в централната зона на СТ-образца, като са разгледани пет варианта на ориентация: 15°, 30°, 45°, 60° и 75° спрямо оста на приложеното натоварване. По този начин се осигурява пълна картина на поведението на материала при наклонени дефекти – от почти фронтално разположена пукнатина (15°), при която преобладаващ е режимът на отваряне, до силно наклонена пукнатина (75°), при която влиянието на срязващите напрежения става водещо. За всеки от разгледаните случаи симулациите позволяват проследяване на пътя на разпространение на дефекта, промяната в локалните стойности на коефициента на интензивност на напреженията (SIF), както и прехода между различните режими на натоварване.

Подобен подход дава възможност да се оцени как геометрията и ориентацията на началния дефект влияят върху устойчивостта на СТ-образца и върху скоростта на растеж на

пукнатината. Получените резултати имат съществено значение за по-точното прогнозиране на остатъчния живот на конструктивните елементи, особено в условията на комплексни натоварвания, при които дефектите не са разположени под прав ъгъл спрямо основната ос на напреженията. Във Фигура 1 е илюстрирана връзката между дължината на пукнатината и броя на циклите при различните изследвани случаи.



фиг. 1 Дължина на пукнатината като функция от броя на циклите за всички изследвани случаи.

Всички криви демонстрират характерното за уморния процес поведение – начален етап на бавен растеж, зона на стабилно линейно разпространение и финален ускорен сегмент, водещ до достигане на критична дължина.

При малки ъгли на наклон (15° и 30°) се наблюдава най-бавно развитие на дефекта. Например при около 100 000 цикъла пукнатината достига дължина едва ~0.18–0.20 mm, което съответства на доминиране на режим на отваряне (Mode I). При наклон 45° се отчита междинно поведение – още при ~130 000 цикъла пукнатината надхвърля 0.20 mm, което показва активиране на смесен режим (Mode I + Mode II). При по-големи наклони (60° и 75°) се установява ясно ускорен растеж – например при 270 000 цикъла дължината вече надхвърля 0.22 mm. Въпреки че при 75° началният растеж започва при по-голям брой цикли (~148 000), скоростта на разпространение е значително по-висока, което води до съкращаване на остатъчния живот.

Количественият анализ показва, че образците с малки наклони (15° и 30°) издържат приблизително с 30–40% повече цикли до достигане на критична дължина в сравнение с тези при 60° и 75°. Най-неблагоприятно поведение се наблюдава при 75°, където ускореното разпространение на пукнатината съкращава значително експлоатационния ресурс.

Получените резултати потвърждават, че ориентацията на началния дефект е определящ фактор за скоростта на растеж на пукнатините и прогнозата за остатъчния живот на конструктивните елементи.

На Фигури 2–6 са показани зависимостите между скоростта на растеж на пукнатината и

коэффициента на интензивност на напреженията за всички изследвани случаи.



Фиг. 2. Зависимост между скоростта на растеж на пукнатината и коефициента на интензивност на напреженията при наклон 15°



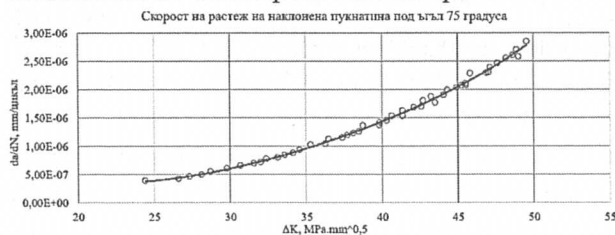
Фиг. 3. Зависимост между скоростта на растеж на пукнатината и коефициента на интензивност на напреженията при наклон 30°



Фиг. 4. Зависимост между скоростта на растеж на пукнатината и коефициента на интензивност на напреженията при наклон 45°



Фиг. 5. Зависимост между скоростта на растеж на пукнатината и коефициента на интензивност на напреженията при наклон 60°



Фиг. 6. Зависимост между скоростта на растеж на пукнатината и коефициента на интензивност на напреженията при наклон 75°

Получените криви отговарят на типичното поведение, описано от закона на Парис, като ясно се разграничават области на стабилен и ускорен растеж.

При малки наклони (15° и 30°) се наблюдава най-ниска скорост на растеж при дадени стойности на ΔK . Това потвърждава доминиращото влияние на Mode I, при който механизмът на отваряне води до по-бавно развитие на дефекта. С увеличаване на ΔK кривите показват плавно нарастване на da/dN , като зоната на стабилен растеж е по-широка.

При наклон 45° се отчита междинно поведение. Кривата се измества нагоре спрямо случаите с малки ъгли, което свидетелства за по-висока скорост на растеж при същите стойности на ΔK . Това е резултат от комбинираното действие на Mode I и Mode II, което води до повишаване на локалните напрежения в челото на пукнатината.

При по-големи наклони (60° и 75°) се установява значително по-висока скорост на растеж. Кривите са разположени в горната част на графиката, като още при сравнително ниски стойности на ΔK се достига ускорен режим на развитие. Това показва, че в тези случаи смесеният режим с доминиращо срязване (Mode II) води до силно съкращаване на зоната на стабилен растеж и рязко увеличаване на da/dN . Количествено сравнението показва, че при 60° и 75° скоростта на растеж на пукнатината може да бъде приблизително 2–3 пъти по-висока в сравнение с 15° и 30° за еднакви стойности на ΔK . Това води до значително по-кратък остатъчен живот на образците.

Обобщено, резултатите от Фигури 2–6 ясно демонстрират, че ориентацията на началния дефект има определящо значение за закона на растеж на уморните пукнатини. Докато малките наклони осигуряват по-устойчиво поведение, силно наклонените дефекти водят до ускорен растеж и съществено съкращаване на остатъчния живот на конструктивния елемент.

4. Заключение.

Настоящото изследване разглежда влиянието на ориентацията на началния дефект върху растежа на уморни пукнатини в СТ-образци от стомана 42CrMo4. Чрез прилагане на числено моделиране в ANSYS Workbench, модул Smart Crack Growth, са проследени траекторията на пукнатината, изменението на коефициента на интензивност на напреженията и скоростта на развитие при различни ъгли на наклон: 15° , 30° , 45° , 60° и 75° . Получените резултати позволяват да се формулират няколко съществени извода:

Първо, ориентацията на началния дефект се потвърди като критичен фактор, определящ скоростта и характера на уморното разрушаване. При малки ъгли (15° и 30°) пукнатината се развива най-бавно, като доминира режимът на отваряне (Mode I). Това води до удължаване на зоната на стабилен растеж и съответно до по-голям остатъчен живот на образците. При междинния наклон от 45° се наблюдава отчетливо участие на смесен режим (Mode I + Mode II), което ускорява разпространението и съкращава работния ресурс. При големи наклони (60° и 75°) доминира срязващият режим (Mode II), при който скоростта на растеж е най-висока, а зоната на стабилен растеж е най-тесна.

Второ, количественият анализ показва, че при неблагоприятни ориентации (60° и 75°) скоростта на растеж на пукнатината може да бъде до 2–3 пъти по-голяма, а остатъчният живот – съкратен с около 30–40% в сравнение с дефекти с малък наклон. Това ясно подчертава значението на геометрията на началния дефект за надеждността на елементите, подложени на циклични натоварвания.

Трето, анализът на зависимостите da/dN – ΔK (Фигури 2–6) потвърди приложимостта на закона на Парис за описване на растежа на пукнатини при различни ориентации. Наблюдава се изместване на кривите при увеличаване на ъгъла на наклон, като за същите стойности на ΔK скоростта da/dN е значително по-висока. Това показва, че ориентацията на дефекта не само влияе върху траекторията на разпространение, но и променя кинетиката на самия процес.

В заключение може да се обобщи, че ориентацията на началния дефект е определяща за прогнозата на остатъчния живот и устойчивостта на конструктивните елементи. Резултатите от проведеното изследване имат пряко приложение при оценка на риска от повреди в реални машиностроителни и транспортни конструкции, където началните пукнатини рядко са разположени под прав ъгъл спрямо главните оси на напрежение. В тази връзка е целесъобразно при бъдещи разработки да се включат експериментални верификации и разширени числени анализи, обхващащи не само различни геометрии на дефекта, но и влиянието на материални характеристики, топлинни обработки и променливи режими на натоварване. Подобен интегриран подход би позволил по-прецизна оценка на остатъчния ресурс и по-надеждно прогнозиране на експлоатационната годност на инженерните конструкции.

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

- Wang J., Hu J., Jin P., Chen H., Fu S., Liu Z., Gao H., Wang X., Chen X., Fracture parameters analysis of compact tension specimens with deflected fatigue cracks: ZK60 magnesium alloy, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Volume 127, 2023, 104068, ISSN 0167-8442, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.104068>.
- Fageehi, A.; Alshoaibi, A.M. Mixed-Mode Crack Growth Behavior of Compact Tension Shear (CTS) Specimens: A Study on the Impact of the Fatigue Stress Ratio, Loading Angle, and Geometry Thickness. *Materials* 2025, 18, 1484. <https://doi.org/10.3390/ma18071484>
- Laboviciute G, Christopher C., James M., Patterson E., Growth of inclined fatigue cracks using the biaxial CJP model, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 33 (2015) 167-173; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.33.21
- Rani N., Neeraj B., Influence of Crack Inclination Angle and Thickness on Mode-Mixity Using FEM, *Advances in Research* 25 (4):316-24, 2024. <https://doi.org/10.9734/air/2024/v25i41109>
- Alshoaibi AM. Fatigue Crack Growth Analysis in Modified Compact Tension Specimen with Varying Stress Ratios: A Finite Element Study. *Applied Sciences*. 2023; 13(24):13160. <https://doi.org/10.3390/app132413160>
- Su S., Zhang W., Li L., Fracture criterion analysis and crack growth property of mixed-mode crack experiments, *ICAS 2020 Conference Papers*, pp. 1–10, 2020.
- Alshoaibi A., Fageehi Y., Numerical Analysis of Fatigue Crack Growth Path and Life Predictions for Linear Elastic Material. *Materials (Basel)*. 2020 Jul 30;13(15):3380. doi:10.3390/ma13153380.
- Martins R., Xavier J., Caldeira J., Numerical Fatigue Crack Growth on Compact Tension Specimens under Mode I and Mixed-Mode (I+II) Loading. *Materials (Basel)*. 2024 Sep 18;17(18):4570. doi: 10.3390/ma17184570.
- 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>