

СОФТУЕРНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КРИТИЧНАТА ПУКНАТИНА ПРИ ШАРНИРЕН БОЛТ.

Иванка ДЕЛОВА Йордан МИРЧЕВ Цветомир БОРИСОВ Райчо РАЙЧЕВ

ivankadelova@tu-plovdiv.bg mirchev@imbm.bas.bg

ts.borisov07@gmail.com rpraichev@tu-plovdiv.bg

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

Институт по Механика- БАН, София, 1000, БЪЛГАРИЯ

Настоящото изследване анализира устойчивостта на стомана 42CrMo4 при умора и влиянието на различни термообработки върху критичната пукнатина на шарнирен болт. Чрез числени методи, базирани на закона на Парис и реализирани в MATLAB, е определена критичната дълбочина на пукнатината за четири различни състояния на материала. Резултатите показват, че оптималната термообработка може значително да подобри надеждността на болтовите съединения, особено в условия на високи натоварвания, каквито се срещат в железопътния транспорт.

Ключови думи: критична пукнатина, умора, термообработка, числен анализ, MATLAB.

1. Увод

В съвременните инженерни приложения безопасността и дълготрайността на механичните конструкции са от първостепенно значение. Един от основните фактори, влияещи върху надеждността на болтовите съединения, е появата и развитието на пукнатини в критичните зони на натоварване. В тази връзка, определянето на критичната дълбочина на пукнатината играе ключова роля за предотвратяване на аварии и подобряване на експлоатационния живот на компонентите.

Настоящото изследване се фокусира върху софтуерното определяне на критичната пукнатина при шарнирен болт, изработен от стомана 42CrMo4, при различни термообработки. Използването на софтуерни инструменти за анализ на напреженията и устойчивостта на материала спрямо умората позволява прецизно прогнозиране на поведението на болта при реални работни условия. В изследването са разгледани влиянието на термообработките върху критичната дълбочина на пукнатината и са представени съответните аналитични и числени резултати.

Този подход има за цел не само подобряване на разбирането на процесите на разрушаване в шарнирните болтове, но и да се предложат ефективни инженерни решения за удължаване на експлоатационния срок на такива компоненти.

Работата [Sh. Molaei, et al. 2015] представя задълбочено изследване на съвместното разрушаване на шестнадесет свързващи болта в система цилиндър-бутало на филтър преса. Основната цел на изследването е да се идентифицират причините за едновременната повреда на тези болтове. Авторите провеждат анализ на напрегнатото състояние на болтовете при експлоатационни условия, комбинирайки го с фрактографски изследвания на повърхностите на разрушените болтове. Този подход позволява детайлно разбиране на механизма на разрушаване и идентифициране на потенциалните фактори, допринасящи за повредата. Анализът показва, че основният механизъм на разрушаване е умора на материала. Фрактографските изследвания разкриват характерни белези на умора, като "beach marks" и радиални линии, указващи многократно натоварване и прогресивно разпространение на пукнатините. Допълнително, установено е, че недостатъчен въртящ момент при монтажа на болтовете е довел до неправилно затягане, което е увеличило локалните напрежения и е способствало за инициране на умората.

[Fasai Ren et al. 2019] представя задълбочен анализ на причините за разрушаването на свързващ болт на фланец. Основната цел на изследването е да се идентифицират факторите, довели до повредата на болта по време на експлоатация.

Авторите прилагат комплексен подход, включващ:

- Анализ на химичния състав: Определяне на елементния състав на материала на болта и сравнение със стандартите.

- Механични изпитвания: Измерване на якостни характеристики като предел на провлачване, якост на опън и удължение.

- Металографски анализ: Изследване на микроструктурата на материала за идентифициране на евентуални дефекти или аномалии.

- Фрактографски анализ: Използване на сканираща електронна микроскопия (SEM) за детайлно изследване на повърхността на разрушението и определяне на механизма на разрушаване.

На базата на получените резултати от изследването са направени следните заключения: Комбинацията от повишено съдържание на въглерод, понижено съдържание на хром и наблюдаваната микроструктура предполагат, че болтът е подложен на стресово корозионно напукване. Това е довело до междукристално разрушаване и преждевременна повреда на болта.

В статията [Wen Juan et al. 2021] е представен задълбочен анализ на причините за повреди на високоякостни болтове от стомана 35VB, използвани в субтропичен влажен климат. Основната цел на изследването е да се идентифицират факторите, водещи до повреди, и да се предложат мерки за предотвратяване на бъдещи инциденти.

Анализът на получените резултати показва, че основните причини за повреди са:

- комбинацията от механичен стрес и корозивна среда в субтропичния влажен климат, води до напукване и последващо разрушение на болтовете.

- наличие на включвания и неправилности в микроструктурата на стоманата, които действат като концентратори на напрежение и инициират пукнатини.

Документът [E. Amsterdam et al. 2021] представя изчерпателен анализ на методологията за прогнозиране на умората, базирана на теорията за малките пукнатини. Авторите изследват способността на модел, основан на пластичността и затварянето на пукнатини, да предсказва живота на умора на метални материали при различни условия на натоварване. Те въвеждат фактори на ограничение на върха на пукнатината, които отчитат триизмерните напрегнати състояния, за да корелират данните за скоростта на растеж на големи пукнатини като функция на ефективния диапазон на

коэффициента на интензивност на напрежението (ΔK_{eff}) при натоварване с постоянна амплитуда. Резултатите от тестовете и анализите показват добро съответствие.

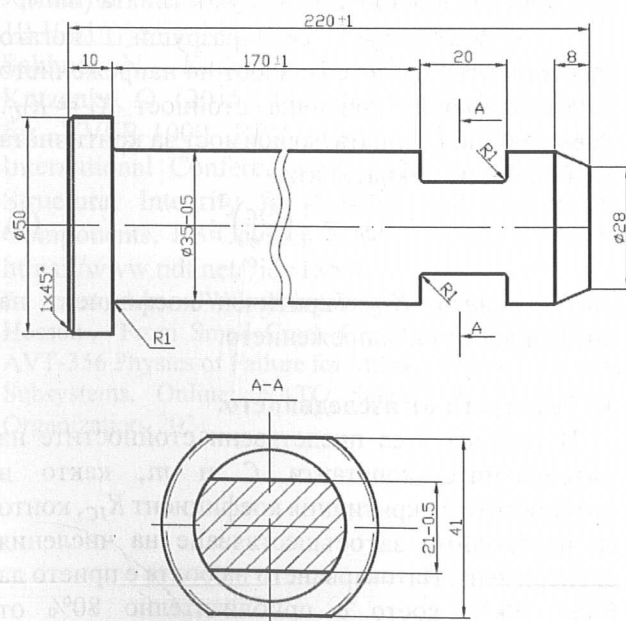
2. Описание на изследването.

Обект на изследването е шарнирен безрезбови болт, който е важен компонент от сложна механична система, свързана с ресорното окачване при железопътния транспорт. Шарнирните болтове съединяват ресорния комплект с рамата на вагоните и имат основна роля за безопасността и надеждността на ресорното окачване. Изследвания, свързани с динамичното поведение на железопътния състав в експлоатационни условия показват, че страничните и вертикалните ускорения, при движение по релсов път, надхвърлят установените нормативни граници. Това означава, че елементите на окачването са подложени на големи натоварвания. Механичните напрежения в повечето случаи превишават определените допустими стойности и границата на умора се достига много по-рано от очакваното.

Основната цел в настоящото изследване е да се определи с помощта на специализиран софтуер, критичната пукнатина при която ще настъпи уморно разрушение при болта.

Изследванията са осъществени за шарнирни болтове без наличие на модифицирана структура и за болтове с наличие на модифицирана структура.

На фиг. 1 е представена схема на изследваните шарнирни болтове.



Фиг. 1 Схема на изследваните образци.

таблица 1

Термообработка	C (mm/cycle)	m	K_{IC} (MPa $\sqrt{m}$)
Без термообработка	5.0×10^{-12}	3.2	45
Закаляване в масло	8.0×10^{-11}	2.8	60
Закаляване във вода	6.5×10^{-11}	2.7	65
Цементация + закаляване	4.5×10^{-11}	2.6	70

Критичната пукнатина е определена чрез числен анализ, който е реализиран в средата на специализирания софтуер MATLAB. За дефиниране на изходния код към програмата е използван закона на Парис (Paris' Law), който дава връзката между скоростта на растеж на пукнатината и коефициента на интензивност на напрежението при циклично натоварване:

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

където: $\frac{da}{dN}$ – нарастване на пукнатината (mm/цикъл);

C , m – материални константи, определени експериментално;

ΔK – размах на коефициента на интензивност на напрежението (MPa $\sqrt{m}$).

$$\Delta K = Y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}; \quad (2)$$

където:

Y – корекционен фактор (обикновено за цилиндрични повърхностни пукнатини $Y \approx 1,2$);

$\Delta \sigma$ – размах на цикличното напрежение (MPa);

a – текуща дълбочина на пукнатината.

Чрез интегриране закона на Парис се определя броя на циклите до разрушение:

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(Y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a})^m}; \quad (3)$$

Решението на този интеграл дава:

$$N_f = \frac{2}{C(Y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi})^m(2-m)} (a_i^{\frac{2-m}{2}} - a_f^{\frac{2-m}{2}}); \quad (4)$$

където: a_i – начална дълбочина на пукнатината (mm);

a_f – критична дълбочина на пукнатината (mm);

Болтът ще се разруши, когато коефициентът на интензивност на напрежението достигне своята критична стойност $K_I = K_{IC}$. Това води до следната зависимост за критичната дълбочина на пукнатината:

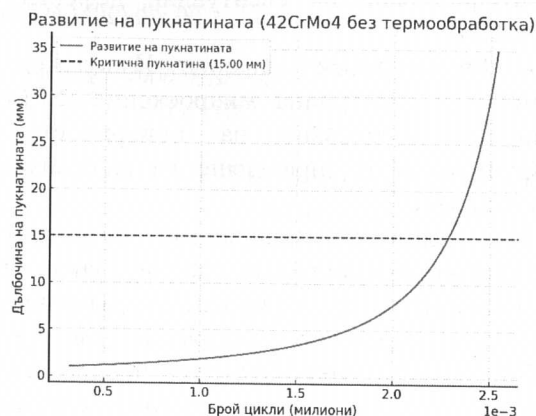
$$a_{cr} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{Y \cdot \sigma} \right)^2; \quad (5)$$

където: K_{IC} – критичен коефициент на интензивност на напрежението.

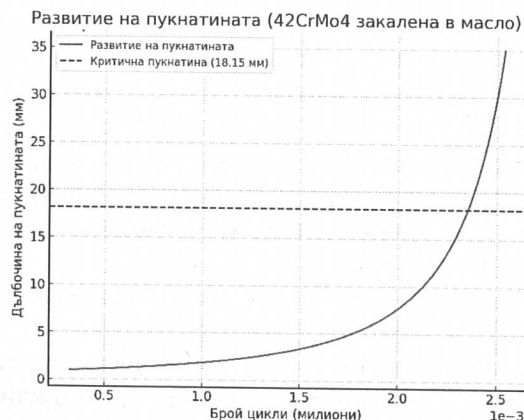
3. Резултати от изследването.

В таблица 1 са представени стойностите на материалните константи C и m , както и стойностите на критичния коефициент K_{IC} , които са необходими за осъществяване на числения експеримент. Натоварването на болта е прието да бъде 39kN, което е приблизително 80% от максималното натоварване на което са подложени тези болтове [Николов В. 2019].

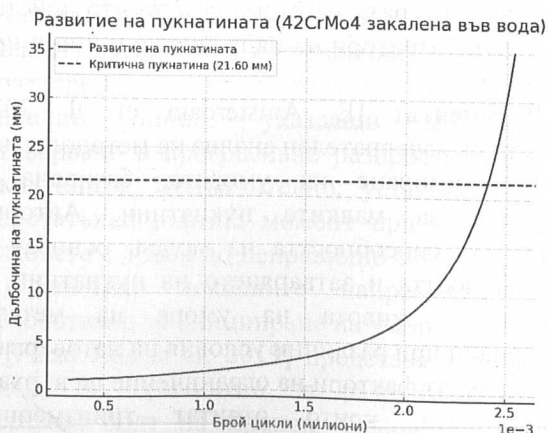
На фиг. 2, фиг. 3, фиг. 4 и фиг. 5 са представени получените резултати от изследването.



Фиг. 2 Резултати от изследването на стомана 42CrMo4 без термообработка.

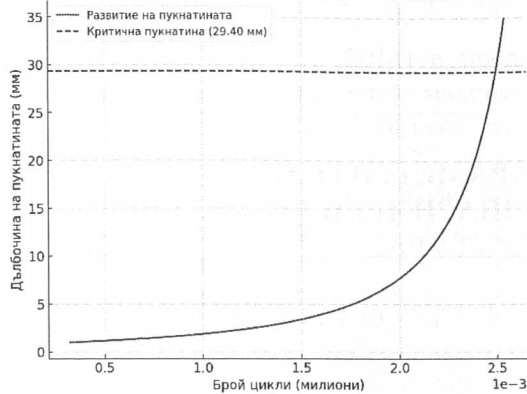


Фиг. 3 Резултати от изследването на стомана 42CrMo4 след закаляване в масло.



Фиг. 4 Резултати от изследването на стомана 42CrMo4 след закаляване във вода.

Развитие на пукнатината (42CrMo4 цементация + закаляване)



Фиг. 5 Резултати от изследването на стомана 42CrMo4 след цементация.

Анализът на получените резултати показва следното:

- Изследване на стомана 42CrMo4 без термообработка - диаграмата показва, че пукнатината нараства с ускорен темп след около 1.8 хиляди цикъла, а критичната дълбочина от 15.01 мм се достига при 2.2 хиляди цикъла. Това демонстрира ниска устойчивост на умора и повишен риск от разрушение.

- Изследване на стомана 42CrMo4 след закаляване в масло - подобрява механичните свойства на материала, като увеличава критичната дълбочина до 18.16 мм. Пукнатината нараства по-бавно, а критичната стойност се достига след 2.3 хиляди цикъла. Въпреки това, след преминаване на този праг, растежът на пукнатината се ускорява значително.

- Изследване на стомана 42CrMo4 след закаляване във вода - допълнително повишава устойчивостта на материала. Критичната дълбочина е 21.61 мм, което е значително подобрение спрямо предходните два случая. Графиката показва, че пукнатината нараства по-бавно и достига критичното ниво при 2.4 хиляди цикъла. Това потвърждава положителния ефект от тази термообработка върху устойчивостта на материала към умора.

- Изследване на стомана 42CrMo4 след цементация с последващо закаляване - най-добрата устойчивост на срещу развитие на пукнатини се наблюдава при този тип модифициране на структурата на материала. Критичната дълбочина достига 29.42 мм, което значително надвишава останалите случаи. Графиката показва, че пукнатината се развива най-бавно и достига критичното ниво след 2.5 хиляди цикъла, което потвърждава значителното увеличаване на експлоатационния живот на материала.

4. Изводи и заключение.

Настоящото изследване потвърждава, че термообработката е ключов фактор за повишаване на устойчивостта на шарнирните болтове към умора и увеличаване на техния експлоатационен живот. Най-добри резултати се постигат при цементация с последващо закаляване, което значително увеличава критичната дълбочина на пукнатината и броя на циклите до разрушение. Това може да доведе до подобряване на безопасността и надеждността на железопътните транспортни системи, както и на други инженерни конструкции, в които се използват такива болтове.

Допълнителни изследвания могат да бъдат насочени към оптимизиране на параметрите на термообработката, както и към анализ на комбинирани методи за повишаване на дълготрайността на детайлите.

ЛИТЕРАТУРА

- Николов, В. „Моделиране и якостен анализ на шарнирен болт от ресорното окачване на четириосен товарен вагон тип Tamns“, Международна научна конференция "ТРАНСПОРТ - 2019", С. ВТУ, 2019.
- Sh. Molaei, R. Alizadeh, M. Attarian, Y. Jaferian, "A failure analysis study on the fractured connecting bolts of a filter press", Case Studies in Engineering Failure Analysis, Volume 4, 2015, Pages 26-38, ISSN 2213-2902, <https://doi.org/10.1016/j.csefa.2015.07.003>.
- Facai Ren and Xinghua Wu., "Fracture Failure Analysis of Flange Connecting Bolt", 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 631 032060 DOI 10.1088/1757-899X/631/3/032060.
- Wen Juan, Chen Lin, Duan Xu, Yang Jian, Liu Qingcai, Liu Lan., "Fracture Failure Performance of 35VB Steel High-Strength Bolts Used in Subtropical Humid Climate", Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003971
- Sakhno, N., Kadenko, I., Kharytonov, O., & Kutzenko, O. (2015). Flaw handbook development for VVER-1000 RPV inlet nozzle area. 10th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 1-3 October 2013, Cannes, FRANCE. <https://www.ndt.net/?id=18596>
- E Amsterdam, JWE Wiegman, M Nawijn, JTMD Hosson., "From Small Crack Growth to Fatigue Life", AVT-356 Physics of Failure for Military Platform Critical Subsystems, Online: NATO Science & Technology Organization, 2021.