

СОФТУЕРНО ОПРЕДЕЛЯНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА ПУКНАТИНОУСТОЙЧИВОСТ ПРИ ШАРНИРЕН БОЛТ С МОДИФИЦИРАНА СТРУКТУРА.

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 влиянието на различни термични обработки върху пукнатиноустойчивостта на шарнирен болт, изработен от стомана 42CrMo4. Основният фокус е върху определянето на коефициента на интензивност на напрежението (ΔK) и скоростта на растеж на пукнатината (da/dN) при различни условия на термична обработка. Чрез числено моделиране в MATLAB са изследвани следните варианти: без термообработка, закаляване в масло, закаляване във вода и цементация.

Получените резултати подчертават значението на подходящата термообработка за повишаване на експлоатационната надеждност на инженерни конструкции.

Ключови думи: пукнатиноустойчивост, 42CrMo4, термообработка, числено моделиране,.

1. Увод

В инженерната практика устойчивостта на конструктивните елементи срещу разрушаване е от съществено значение за тяхната безопасност, дълготрайност и надеждна експлоатация. В много технически приложения, особено в машиностроенето, автомобилостроенето и авиационната индустрия, структурните компоненти са подложени на сложни натоварвания, които могат да доведат до образуване и разпространение на пукнатини. Дълготрайността на тези компоненти зависи не само от първоначалната здравина на материала, но и от неговата способност да се съпротивлява срещу развитието на дефекти при статични и динамични натоварвания.

Един от ключовите параметри, характеризиращи механичната надеждност на детайлите, е пукнатиноустойчивостта, която определя способността на материала да противодейства срещу разпространението на пукнатини под въздействието на различни механични фактори. Високата пукнатиноустойчивост е критична за предотвратяване на внезапни разрушения, особено при детайли, работещи в условия на циклични натоварвания, ударни натоварвания или агресивна среда. Този параметър е от решаващо значение при проектирането на

конструкции, подложени на продължителна експлоатация, тъй като дори микроскопични дефекти в материала могат да се развият в критични пукнатини, водещи до отказ на системата.

За да се осигури висока устойчивост срещу зараждане и развитие на пукнатини, материалите и компонентите често се подлагат на различни технологични обработки като термична обработка, повърхностно уякчаване и модификация на структурата. Оптималният избор на тези процеси играе съществена роля за повишаване на пукнатиноустойчивостта и гарантиране на дълготрайна и безопасна експлоатация на инженерните конструкции.

В основата на [Costa P., 2020] е прогнозирането на остатъчния ресурс при умора на ос от железопътно превозно средство. Подробно са анализирани фазите на инициране и разпространение на уморни пукнатини. Прогнозирането на остатъчния ресурс на оста е съществено както въз основа на числен анализ по метода на крайните елементи, така и с помощта на аналитични решения. Разгледан е и подход за локално напрежение, основан на правилото на Нойбер (което дава връзката между хипотетичните и реалните напрежения при върха на пукнатината) и уравнението на Рамберг-Осгуд (което представя

нелинейната връзка между напреженията и деформациите).

В [Sulochana, Joshi U., 2014] е представен аналитичен метод за определяне максималните разрезни напрежения на железопътна ос, за три различни натоварвания (22,82t, 25t и 30t) при постоянна скорост 100 km/h. Този подход е базиран на общата теория за натоварване на валове. С помощта на софтуера за моделиране CATIA V5 е създаден тримерен модел на железопътна ос, който е импортиран в средата на ANSYS 14.0 за да бъдат осъществени компютърни симулации. Получените резултати от симулациите са сравнени с тези от аналитичния подход и разликата между тях е по-малко от 15%. Основната причина за тази разлика е направеното идеализиране на вала при аналитичните пресмятания.

Целта на изследването в [Rudavsky D., et al. 2020] е създаването на изчислителен модел, който да отразява растежа на повърхностно-уморни пукнатини по оста на железопътно превозно средство при експлоатационни натоварвания. Методът на най-малките квадрати е използван за определяне на изследваните механични константи на материала, които съдържат динамичните уравнения на изчислителния модел. Системата от диференциални уравнения за динамиката на растежа на пукнатините е решена числено по метода на Рунге-Кута. Резултатите от изследването са представени в графичен вид.

В [Giannella V., et al. 2020] е описан създаден алгоритъм за оценка на остатъчния ресурс при наличие на дефект в железопътни оси. За тази цел са използвани съществуващи в специализираната литература данни за разпространението на уморни пукнатини за натоварени оси, изработени от стомана 30NiCrMoV12. Тези данни са използвани за калибриране на формулировка на софтуера NASGRO за прогнозиране остатъчния ресурс на оста, като се вземат предвид различни размери на дефектите. Изграден е и опростен симулационен модел на оста базиран на метода на двойните гранични елементи. Получените резултати от симулацията са сравнени с аналитичните данни и показват много добро съответствие.

В [Jead R., et al 2021] е представено изследване остатъчния ресурс на железопътна ос, чрез метода на крайните елементи. Информацията, необходима за осъществяване на симулациите е свързана със счупване на железопътна ос по време на нейната експлоатация. За изграждане и настройка на симулационния модел е използван софтуера SolidWorks. Описани са необходимите стъпки,

свързани със задаването на материала, формиране на крайноелементната мрежа, както и действията свързани с фиксирането и натоварването на оста. Резултатите от симулацията са представени в графичен вид,

В [Náhlík L. et al. 2017] е представена методология за прогнозиране на остатъчния ресурс на железопътната ос поради умора, основана на концепцията за линейна еластична механика на разрушението. За оценка на остатъчния ресурс на оста и необходимостта от определяне мястото на зараждане и разпространение на пукнатината са анализирани източниците на натоварванията в критичната област.

С помощта на анализ по метода на крайните елементи на железопътна ос съдържаща пукнатина, се определят коефициентите на интензивност на напрежението на растящата пукнатина и се оценява броят на натоварените елементи, които оказват влияние върху разпространението на уморни пукнатини от първоначалния дефект до критичните дължини на пукнатините. Численият анализ е осъществен в средата на ANSYS, като са използвани характеристиките на стомана EA4T.

2. Описание на изследването.

В настоящото изследване се анализира шарнирен болт, изработен от стомана 42CrMo4, като основният акцент е върху влиянието на различни термични обработки върху неговата устойчивост срещу зараждане и развитие на пукнатини. Чрез модифициране на структурата на материала се цели подобряване на неговите експлоатационни характеристики.

Принципната схема на изследваните болтове е представена в предходно изследване на същите автори.

Основните параметри, които са обект на настоящото изследване са коефициент на интензивност на напрежението K_{IC} и скоростта на растеж на пукнатината da/dN . Приложеното натоварване върху болта е $F = 49,03\text{kN}$. Тази стойност съответства на максималното натоварване при която се използват този тип болтове. Началната пукнатина, необходима за моделирането е $a_0 = 1\text{mm}$.

В таблица 1 са дадени стойностите, които се използват за численото моделиране на изследваните болтове.

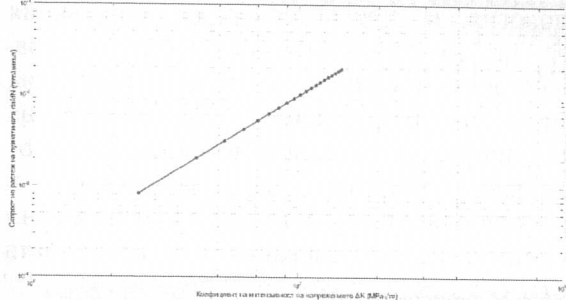
Таблица 1

Термообработка	Материална константа C (m/cycle)	Материална константа m
Без термообработка	2.5E-12	3,2
Закаляване в масло	1.8E-12	3,5
Закаляване във вода	1.2E-12	3,8
Цементация + закаляване	0.8E-12	4

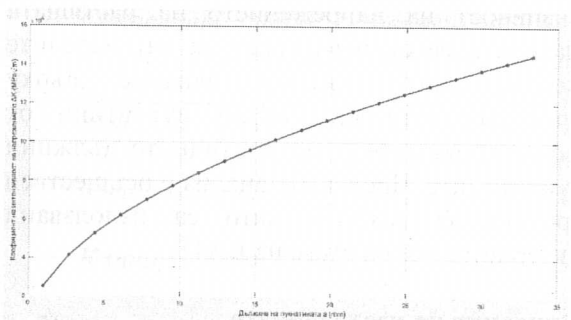
Численото моделиране е осъществено в средата на специализирания софтуер MATLAB.

3. Резултати от изследването.

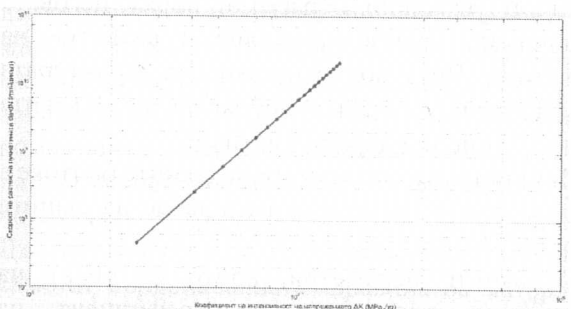
На фигури от 1 до 8 са представени получените резултати от изследването.



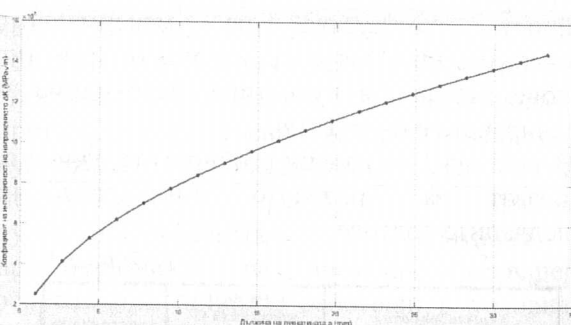
фиг. 1 Графична зависимост на $\frac{da}{dN}$ към ΔK при стомана 42CrMo4 без термообработка.



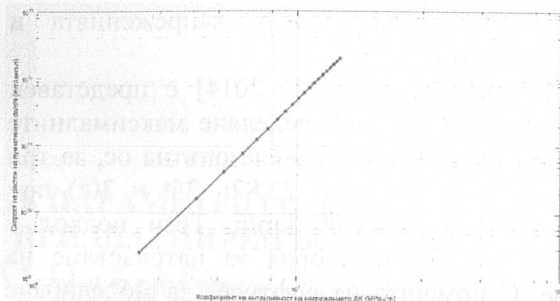
фиг. 2 Графична зависимост за дължината на пукнатината във функция от ΔK при стомана 42CrMo4 без термообработка.



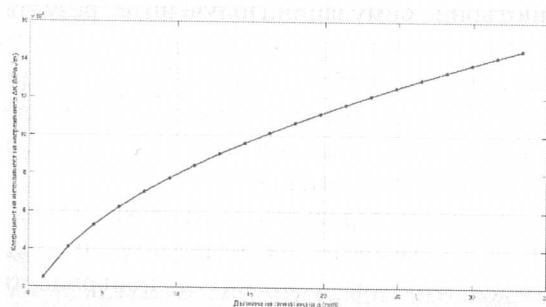
фиг. 3 Графична зависимост на $\frac{da}{dN}$ към ΔK при стомана 42CrMo4 след закаляване в масло.



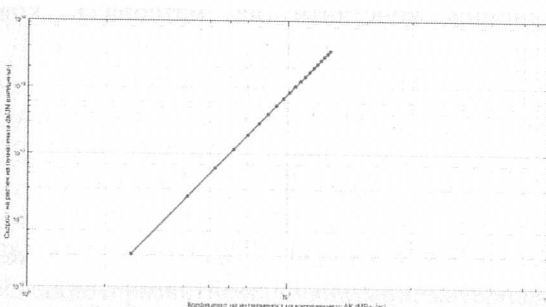
фиг. 4 Графична зависимост за дължината на пукнатината във функция от ΔK при стомана 42CrMo4 след закаляване в масло.



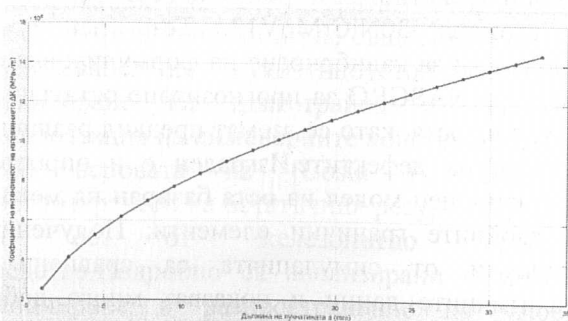
фиг. 5 Графична зависимост на $\frac{da}{dN}$ към ΔK при стомана 42CrMo4 след закаляване във вода.



фиг. 6 Графична зависимост за дължината на пукнатината във функция от ΔK при стомана 42CrMo4 след закаляване във вода.



фиг. 7 Графична зависимост на $\frac{da}{dN}$ към ΔK при стомана 42CrMo4 след цементация.



фиг. 8 Графична зависимост за дължината на пукнатината във функция от ΔK при стомана 42CrMo4 след цементация.

4. Анализ на резултатите.

- Скорост на растеж на пукнатината във функция от коефициента на интензивност на напрежението (ΔK):

Изследваните графики показват логаритмична линейна зависимост между (da/dN) и (ΔK) , което

потвърждава валидността на уравнението на Парис. Основните разлики между отделните термообработки са анализирани по-долу:

Цементация – дава най-ниски стойности за скоростта на растеж на пукнатината при дадена стойност на (ΔK), което показва висока устойчивост срещу умора. Това се дължи на повърхностното уякчаване и наличието на остатъчни напрежения.

Закаляване във вода – материалът има по-високи стойности на (da/dN) в сравнение с образеца, подложен на цементация но все още предлага значителна устойчивост на умора.

Закаляване в масло – заема междинна позиция между закаляването във вода и цементацията, като предоставя компромис между якост и устойчивост срещу умора.

Без термообработка – наблюдава се най-висока скорост на растеж на пукнатината, което означава по-ниска устойчивост срещу умора и по-бързо достигане до критичната дължина на пукнатината.

- Коефициент на интензивност на напрежението (ΔK) в зависимост от дължината на пукнатината (a):

Втората серия графики показва как (ΔK) нараства с увеличаването на (a). Това е в съответствие с очакваното поведение, където по-голяма пукнатина води до по-висока концентрация на напрежение в нейния връх. Основните наблюдения са:

Цементацията води до най-бавно нарастване на (ΔK), което означава по-голяма устойчивост на материала.

Закаляването във вода показва малко по-бързо нарастване на (ΔK) от цементацията, което може да се дължи на вътрешните напрежения и структурата на стоманата след този процес.

Закаляване в масло се държи подобно на закаляването във вода, но с по-малко остатъчни напрежения.

Без термообработка материалът показва най-бързо нарастване на (ΔK), което предполага по-бързо достигане на критичната стойност за разрушаване.

5. Заключение.

Анализът на получените резултати показва, че термообработката оказва съществено влияние върху устойчивостта на стомана 42CrMo4 към умора. Най-добрите резултати за устойчивост срещу растежа на пукнатината се наблюдават при цементация, следвана от закаляване в масло и закаляване във вода. Материалът без термообработка показва най-слаби характеристики по отношение на устойчивостта към умора. Тези резултати потвърждават

необходимостта от подходяща термообработка в индустриални приложения, където издръжливостта на материала на циклично натоварване е критична за експлоатационната безопасност. В допълнение, изборът на термообработка трябва да бъде съобразен с конкретните работни условия и очакваните натоварвания, за да се постигне оптимален баланс между якост, жилавост и устойчивост на умора. Допълнителни изследвания могат да включват анализ на остатъчните напрежения и микроструктурни промени след всяка термообработка, както и експериментални тестове за верификация на моделите за растеж на пукнатината.

ЛИТЕРАТУРА

- Costa P., "Fatigue Reliability Analysis of a Rail Vehicle Axle", dissertation on University of Porto, 2020.
- Sulochana, Joshi U., "A Stress Analysis on Railway Axle with Fatigue Crack Growth", International Journal of Engineering Sciences and Research Technology (IJESRT), 2014, ISSN: 2277-9655.
- Rudavsky D., Kaniuk Y., Duriagina Z., Kulyk V., Shefer M., Dolinska I., "Assessing surface fatigue crack growth in railway wheelset axle", Archives of Materials Science and Engineering 2020; 106 (2): 59-67, DOI: 10.5604/01.3001.0014.6973
- Giannella V., Sepe R., Michele G., Esposito R., "Deterministic fatigue crack-growth simulations for a railway axle by Dual Boundary Element Method", 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1038 012080, DOI 10.1088/1757-899X/1038/1/012080
- Jead R., Andoko A., "Failure analysis of railway freight car axle with finite method element", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1034 (2021) 012021, doi:10.1088/1757-899X/1034/1/012021
- Náhlík L., Pokorný P., Ševčík M., Fajkoš R., Matušek P., Hutař P., "Fatigue lifetime estimation of railway axles", Engineering Failure Analysis, Volume 73, 2017, Pages 139-157, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.12.014>.