

ИЗСЛЕДВАНЕ ГРАНИЦАТА НА УМОРА ПРИ СТОМАНА 42CrMo4 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 границата на умора на стомана 42CrMo4, като се акцентира върху влиянието на модифицираната структура върху устойчивостта ѝ при циклични натоварвания. Структурните изменения на материала са постигнати чрез различни методи на термична обработка. Чрез експериментални изпитвания, проведени по метода на Вьолер (Wöhler test), е определена кривата на умора, като е анализирано поведението на материала при различни амплитуди на напрежение и брой цикли до разрушение.

Ключови думи: граница на умора, крива на Вьолер, ANSYS, пробни образци

1. Увод

В съвременното машиностроене и индустриалните приложения, определянето на границата на умора при конструкционните материали е от съществено значение за осигуряване на дълготрайност и безопасност на механичните компоненти. Един от широко използваните материали за високонатоварени детайли е легираната хром-молибденова стомана 42CrMo4 (AISI 4140). Тя се характеризира с висока якост, добра ударна устойчивост и способност за термична обработка, което я прави предпочитан избор за изработка на зъбни козла, оси, валове, болтове и други критични елементи.

Границата на умора е параметър, който описва максималното циклично напрежение, при което материалът може да издържи неограничен брой цикли без разрушаване. При стоманите, особено при високоякостните легирани стомани като 42CrMo4, устойчивостта на умора се влияе от множество фактори, включително:

- Микроструктурата и топлинната обработка – закаляването и отпусването значително повишават границата на умора в сравнение с нормализираното състояние.
- Типът на натоварване – различни механизми на умора при огъване, усукване и аксиално натоварване.
- Състоянието на повърхността – полирани и обработени повърхности намаляват

концентрацията на напрежения и повишават устойчивостта на умора.

-Остатъчни напрежения и дефекти – заваръчни съединения, прорези и микронапуквания могат значително да намалят експлоатационния живот на компонента.

В статията [Findley, K. O., et al. 2013] се разглежда влиянието на неметалните включвания върху умората на стоманените сплави. Тези включвания могат да действат като концентратори на напрежение, което води до понижаване на механичните свойства на стоманата, особено по отношение на умората.

Основната цел на изследването е да се анализира как различните видове, размери и морфологии на неметалните включвания влияят върху умората на стоманените сплави. Авторите се стремят да установят връзката между характеристиките на включванията и намаляване живота на материала при циклично натоварване.

В изследването са използвани както експериментални, така и аналитични подходи. Експериментално са проведени уморни тестове на стоманени образци с различно съдържание и характеристики на включванията. Аналитично са приложени статистически методи за оценка на разпределението на включванията и тяхното влияние върху иницирането и разпространението на пукнатини.

Получените резултати показват, че големината, формата и разпределението на

включванията имат съществено влияние върху умората на стоманата.

В [Furuu, Y et al. 2019] са представени изследвания, свързани с умората в гигациковия режим при високоякостни стомани. Основната цел е да се анализират механизмите, водещи до вътрешни разрушения при гигациклова умора на високоякостни стомани, и да се разработят модели за предсказване на тяхната уморна якост. Поради продължителността на традиционните уморни тестове (до 3–4 месеца за 10^9 цикъла при 100 Hz), за описаните изследвания се използват ултразвукови уморни тестове при 20 kHz, които позволяват достигане на 10^9 цикъла в рамките на един ден. Въпреки първоначалните опасения относно ефекта от високата честота, се установява, че тя е незначителна при условия, водещи до вътрешни разрушения.

Изследването подчертава необходимостта от разработване на адекватни модели за предсказване на умората в гигациковия диапазон, като се вземат предвид специфичните характеристики на вътрешните разрушения. Предложен е нов модел, базиран на измервания на растежа на малки вътрешни пукнатини, който предоставя по-точни предсказания за уморната якост на различни класове високоякостни стомани.

В [Sherman, A.M. 1975] са изследвани механичните характеристики на нисколегирани стомани с висока якост, като се фокусира върху поведението им при умора. Основната цел на изследването е да се определи границата на умора, влиянието на легиращите елементи върху устойчивостта и микроструктурните фактори, които допринасят за иницирането и разпространението на пукнатини. За постигане на тези цели се използва експериментален подход, включващ изпитания на умора при различни натоварвания, микроскопски анализи чрез оптична и сканираща електронна микроскопия, както и химичен и механичен анализ.

Резултатите от изследването показват, че високоякостни нисколегирани стомани имат по-висока граница на умора в сравнение с обикновените въглеродни стомани, като тяхната устойчивост зависи основно от размера на зърната и наличието на включвания и микропукнатини.

Анализът на резултатите подчертава, че комбинацията от фино-зърнеста структура и подходящо легиране значително подобрява устойчивостта на умора на тези стомани. В същото време е установено, че остатъчните напрежения и повърхностните дефекти могат да понижат границата на умора, което има

практически последици за индустриалните приложения на тези материали.

В [Goswami, T. 1995] се изследва сложното взаимодействие между пълзене (creep) и умора (fatigue) при нисколегирани стомани, които се използват в конструкции, работещи при високи температури и циклични натоварвания. Основната цел на изследването е да се разбере как едновременният ефект на тези два механизма влияе върху експлоатационния живот на материала и да се идентифицират критичните фактори, които допринасят за неговото разрушаване. Използваната методология включва експериментални изпитания при различни температури и механични натоварвания, микроструктурен анализ чрез електронна микроскопия и математическо моделиране за предсказване на поведението на материала в дългосрочен план.

Резултатите от изследването показват, че нисколегирани стомани проявяват значително намаляване на границата на умора при високи температури поради комбинирания ефект на пълзене и циклично натоварване.

Предложен е математически модел за прогнозиране на експлоатационния живот на нисколегирани стомани, базиран на комбинираното въздействие на цикличното натоварване и високотемпературното пълзене. Моделът отчита както натрупването на пластична деформация, така и микроструктурните промени, като предлага по-прецизен начин за оценка на живота на материалите в реални условия.

В [Manigandan, K. et al. 2013] е изследвано поведението на легирани стомани при високочестотна умора (High Cycle Fatigue – HCF) и механизмите на крайното разрушаване. Основната цел е да се анализират факторите, които влияят върху устойчивостта на материала при продължително циклично натоварване, както и да се идентифицират микроструктурните характеристики, водещи до инициране и разпространение на пукнатини. Авторите използват комбинация от механични изпитания, микроструктурен анализ и сканираща електронна микроскопия (SEM), за да определят зависимостите между структурата на легираната стомана и нейната граница на умора.

Резултатите от изследването показват, че границата на високочестотна умора е силно зависима от състава на стоманата, размера на зърната и наличието на включвания и дефекти. Легиращите елементи като хром, никел и молибден играят важна роля за подобряване на устойчивостта, като осигуряват уякчаване на

материала и намаляват склонността към локализирана пластична деформация.

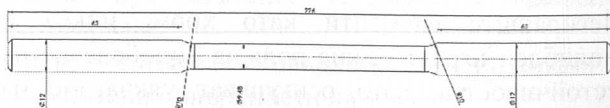
Работата [Kremnev, L.S et al. 2019] изследва механизма на преход от нискочестотна към високочестотна умора в металите, като се фокусира върху особеностите на разрушителния процес и влиянието на микроструктурните фактори върху устойчивостта на материала. Основната цел на изследването е да се определи критичният праг, при който механизмът на разрушаване се измества от доминирано от пластична деформация напукване към по-крехки характеристики на разрушаването.

Резултатите от изследването показват, че в режимите на нискочестотна умора разрушаването се характеризира с интензивна пластична деформация и стабилно разпространение на пукнатината. При тези условия материалът проявява значителна способност за абсорбиране на енергия преди окончателното разрушаване, а зоната около челото на пукнатината показва добре изразени пластични следи, като микровдлъбнатини и разтягания на зърната. С увеличаване на броя на циклите и преминаване към високочестотна умора, механизмът на разрушаване се измества, като пластичната деформация намалява и започва да доминира междузърнесто и квазикрехко напукване. Това се дължи на натрупването на микронапрежения, които водят до ускорено инициране и разпространение на пукнатини по границите на зърната.

2. Описание на опитната постановка и резултати от изследването.

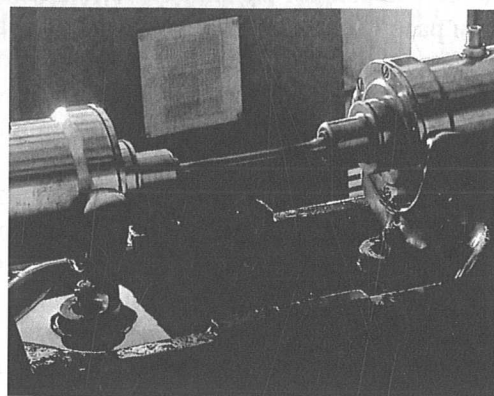
Стоманата 42CrMo4 е високо-якостен конструкционен материал, използван в редица инженерни приложения, изискващи висока устойчивост на механични натоварвания и умора. За определяне на границата на умора на този материал е проведено експериментално изследване по метода на Вюлер. Основната цел на изследването е да се установи влиянието на различни структурни модификации върху поведението на стоманата при циклично натоварване, както и да се определи критичното напрежение, при което настъпва разрушение след определен брой цикли. Модифицирането на структурата на материала е осъществено съгласно EN ISO 683-2:2018.

На фиг. 1 е представена схема на опитните образци, използвани за настоящото изследване.



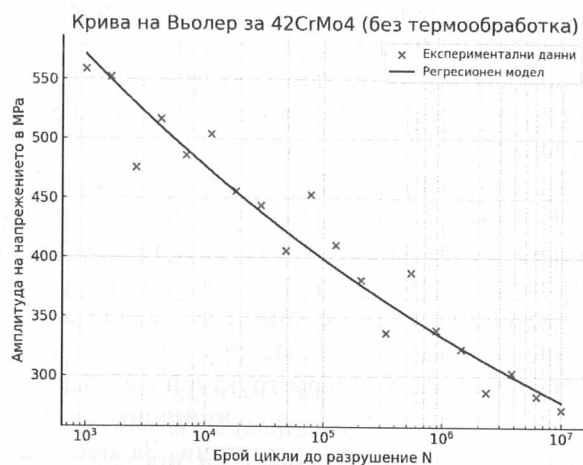
Фиг. 1 Схема на изследваните образци.

Уморните тестове са реализирани чрез въртящ се товар, изпълняващ симетричен цикъл на натоварване $R=-1$ и честота 100Hz (фиг. 2). Кривата на умора е построена чрез изпитването на образци за всяка амплитуда на натоварване.

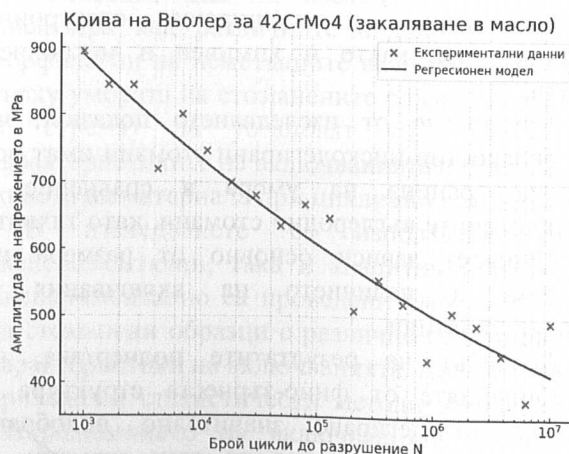


Фиг. 2 Схема на изпитвателната машина.

На фиг. 3, фиг. 4, фиг. 5 и фиг. 6 са представени в графичен вид резултатите от осъществените изследвания.



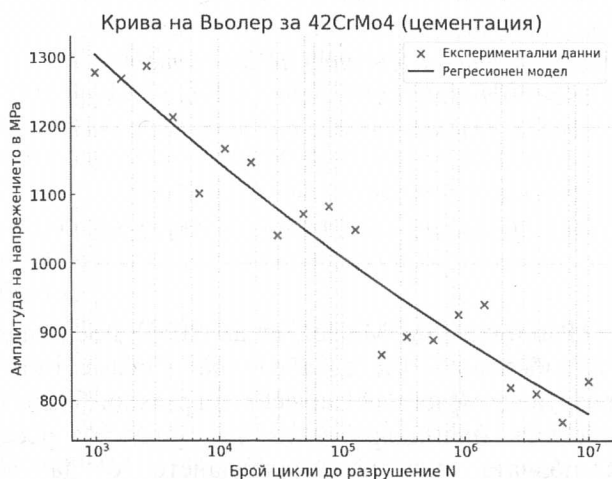
Фиг. 3 Резултати от изследването на стомана 42CrMo4 без термообработка.



Фиг. 4 Резултати от изследването на стомана 42CrMo4 след закаляване в масло.



Фиг. 5 Резултати от изследването на стомана 42CrMo4 след закаляване във вода.



Фиг. 6 Резултати от изследването на стомана 42CrMo4 след цементация.

В настоящото изследване кривите на Вюлер са апроксимирани чрез регресионни модели от вида $S = \sigma_f \cdot N^b$ където σ_f е началната якост на умора N е броят цикли до разрушение а b е наклонът на кривата По-малкият наклон b означава по-дълъг живот на материала при дадено натоварване.

3. Изводи и заключение.

Анализа на получените резултати показва, че необработената стомана има най-ниска якост на умора и достига 250 МПа след 10^7 цикъла Закаляването в масло значително подобрява умората като запазва 400 МПа след 10^7 цикъла Закаляването във вода предоставя още по-високи стойности, но има риск от разрушение поради вътрешни напрежения Цементацията с последващо закаляване и отгряване осигурява най-добри характеристики като амплитудата на напрежението е 700 МПа при 10^7 цикъла.

Резултатите от изследването показват, че чрез подходяща термична обработка може значително да се увеличи животът на материала при циклични натоварвания. Модифицирането на стомана 42CrMo4 чрез цементация с последващо закаляване и отгряване е оптималният избор за детайли подложени на високи динамични натоварвания. Закаляване в масло е подходящо за средни натоварвания където балансът между здравина и икономичност е важен. Закаляване във вода може да бъде използвано при необходимост от по-висока якост но с повишено внимание към вътрешните напрежения Необработената стомана трябва да се използва само за ниско натоварени конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

- Findley, K. O., Cryderman, R. L., Nissan, A. B., & Matlock, D. K. (2013). The effects of inclusions on fatigue performance of steel alloys. *Iron & Steel Technology*, 10(6), 234–243.
- Furuya, Y., Hirukawa, H., & Takeuchi, E. (2019). Gigacycle fatigue in high strength steels. *Science and Technology of Advanced Materials*, 20(1), 643–656. <https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1610904>.
- Sherman, A.M. Fatigue properties of high strength-low alloy steels. *Metall Trans A* 6, 1035–1040 (1975). <https://doi.org/10.1007/BF02661357>
- Goswami, T. (1995). Creep Fatigue Paper I: Compilation of Data and Trends in the Creep-Fatigue Behavior of Low Alloy Steels. *High Temperature Materials and Processes*, 14(1), 1–20. <https://doi.org/10.1515/HTMP.1995.14.1.1>
- Manigandan, K., Srivatsan, T.S., Quick, T., Freborg, A.M. (2013). The High Cycle Fatigue and Final Fracture Behavior of Alloy Steel 9310 for Use in Performance-Sensitive Applications. In: Srivatsan, T.S., Imam, M.A., Srinivasan, R. (eds) *Fatigue of Materials II*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48105-0_16
- Kremnev, L.S., Matyunin, V., Marchenkov, A.Y., & Vinogradova, L. (2019). Features of low-to-high cycle fatigue fracture transition. *arXiv: Materials Science*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.03579>