



КРИТЕРИИ ЗА ОЦЕНКА НА ПОВЕДЕНИЕТО НА МАТЕРИАЛИ, РАБОТЕЩИ ПРИ ВИСОКИ ТЕМПЕРАТУРИ И ПРОМЕНЛИВО НАТОВАРВАНЕ

гл.ас. инж., Веселин Ц. Цонев, Технически университет-София, e-mail: tzonev@tu-sofia.bg, тел. 02 965 2678
гл.ас. д-р инж., Биляна Д. Димова, Технически университет-София, e-mail: bdimova@tu-sofia.bg, тел. 02 9652678
гл.ас. д-р инж., Николай Д. Николов, Технически университет-София, e-mail: nyky@tu-sofia.bg, тел. 02 965 3291

Резюме: В тази статия е разгледано поведението на материалите при повишени температури и променливо натоварване. Дадени са най-често използваните критерии за оценка на поведението на материалите в условията на пълзене и умора. Описани са модели за прогнозиране на ресурса при едновременно протичащи процеси на пълзене и умора и е предложена методика за оценка на ресурса при тези условия. Решена е примерна задача за оценка на ресурса на детайл, изработен от аустенитна хром-никелова стомана.

Ключови думи: пълзене, умора, ресурс

CRITERIA FOR ASSESSING THE BEHAVIOR OF MATERIALS OPERATING AT HIGH TEMPERATURES AND ALTERNATING STRESS

Abstract: This article examines the behavior of materials at elevated temperatures and variable load. Here are the most commonly used criteria for evaluating the behavior of materials in terms of creep and fatigue. Models for predicting resource for both the processes of creep and fatigue are described and methodology for resource assessment in these circumstances is proposed. Sample problem on the resource assessment of detail, made of austenitic chrome-nickel steel are solved.

Key words: creep, fatigue, lifetime, constitutive model

Увод

Едно от предизвикателствата пред съвременното машиностроене е необходимостта от повишаване на надеждността на конструкционните елементи, работещи при повишени температури и променливо натоварване, при едновременно намаляване на тяхната металоемкост. Налага се да се използват нови материали, работещи в условия, близки до пределните им възможности.

Надеждността е ключов фактор при оценка експлоатационните качества на всеки обект в техниката. Основен показател на дълготрайността, която е един от показателите на надеждността, е ресурсът [1]. Ресурс в техниката се нарича обемът от работа или срокът на експлоатация, за който е разчетена дадена машина, съоръжение или детайл. Затова прогнозирането на ресурса е важен етап от конструирането или оценката на обекти, подложени на продължителна експлоатация.

Колкото условията на експлоатация са по-тежки, толкова по-скъпи и отговорни са съответните конструкционни елементи. Съответно толкова по-важно е с достатъчна точност да може да се прогнозира техният ресурс.

Особено неблагоприятна комбинация от работни условия се получава в случаите, когато е налице продължително време на експлоатация (години), при високи температури и големи натоварвания. При това, често както температурата, така и натоварването са променливи във времето. В тези условия в материала протичат както процеси на пълзене, така и процеси на умора, с което ресурсът значително намалява. На такива условия са подложени редица детайли от съоръжения в енергетиката, химическата промишленост, буталните и газотурбинни двигатели с вътрешно горене и други [2].

Якостното оразмеряване на конструкционни елементи, работещи при повишени температури и променливо натоварване е сложна и специфична задача. На инженерната практика са необходими надеждни критерии, по които да се гарантира якостта на материалите за ограничен или неограничен срок на експлоатация. В областта на инвестиционното машиностроене се приема, че ако разрушаването не настъпи до 100 000 часа (11,5 години), конструкцията е годна за експлоатация в неограничен срок от време. Провеждането на експерименти с такава

продължителност в повечето случаи е нецелесъобразно. Обикновено материалите се изпитват за по-кратко време при условия, значително по-неблагоприятни от реалните. След това, с натрупаните експериментални данни, по определени критерии се прогнозира ресурсът на материала при реалните условия на експлоатация. Цел на настоящата разработка е да се създаде и демонстрира методика за оценка на ресурса на детайли, работещи в условия, при които се наблюдава пълзене и умора на материала. Изчисленията се извършват на базата на ограничени във времето експериментални изследвания.

Пълзене на материалите

Якостта на материалите, работещи продължително при високи температури, се оценява по два критерия – граница на пълзене и граница на продължителна якост. *Граница на пълзене* се нарича напрежението, при което деформацията на пълзене за даден интервал от време t при температура T достига големина, определена от техническите условия. *Граница на продължителна якост* $R_{u/t/T}$ се нарича онази стойност на напрежението σ , при която материалът се разрушава за време t_R при дадена температура T . За експериментално определяне на границата на пълзене е необходимо да се следи изменението на деформацията на пълзене, което усложнява експеримента. Границата на продължителна якост се установява по-лесно, защото се измерва само времето до разрушаване.

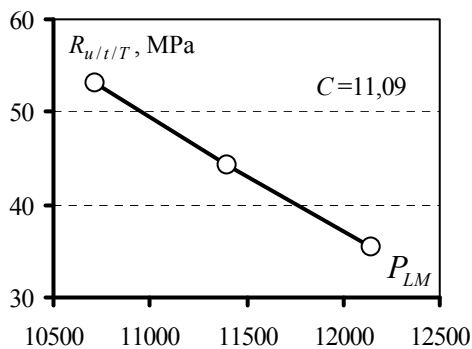
Съществуват различни зависимости, които дават връзка между величините $R_{u/t/T}$, t_R и T . Тези зависимости се наричат параметри и носят името на изследователите, които са ги предложили. Някои от тях са дадени в табл. 1 [3]. Тези параметри са установени експериментално и са валидни за конкретни материали. За различните материали са подходящи различни параметри.

Таблица 1

Параметър на:	Зависимост	Материални константи за определяне
Larson-Miller	$P_{LM} = f(R_{u/t/T}) = T(C + \lg t_R)$	C
Manson-Haferd	$P_{MH} = f(R_{u/t/T}) = \frac{\lg t_R - \lg t_a}{T - T_a}$	T_a, t_a
Manson-Brown	$P_{MB} = f(R_{u/t/T}) = \frac{\lg t_R - \lg t_a}{(T - T_a)^n}$	T_a, t_a, n
Manson-Succop	$P_{MS} = f(R_{u/t/T}) = \lg t_R + C.T$	C
Org-Sherby-Dorn	$P_{OSD} = f(R_{u/t/T}) = \lg t_R - \frac{B}{T}$	B

Параметрите, дадени в табл. 1 се установяват при високи температури и напрежения, при които времето до разрушаване е малко. След това те се използват за прогнозиране на времето за разрушаване при по-ниски температури, за които при същите напрежения ще се получат значително по-големи стойности на t_R .

Най-точни и най-често използвани в практиката са зависимостите, предложени от Larson-Miller (P_{LM}) и Manson-Haferd (P_{MH}). Параметърът P_{MH} е по-точен от P_{LM} , но съдържа две константи. P_{LM} съдържа само една константа, което го прави предпочитан и по-лесно приложим. На фиг. 1 е показана графика на параметъра на Larson-Miller $P_{LM}(\sigma)$, построена за аустенитна хром-никелова стомана 1.4859 [3].



Фиг. 1 Графика $P_{LM}(\sigma)$ за стомана 1.4859.

Умора на материалите

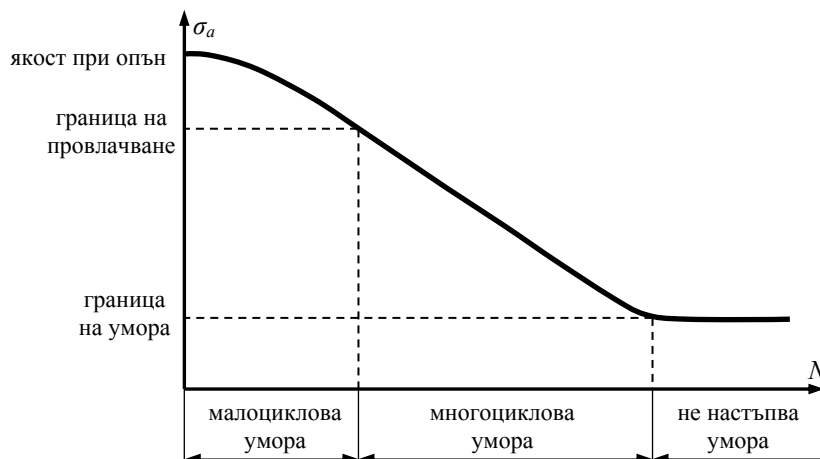
Критериите за разрушаване от умора се установяват чрез обобщаване на експериментални данни, или на основата на физически обосновани параметри. Те представляват зависимости между времето до разрушаване (броя цикли) и някои от параметрите на хистерезисната крива, получена при изчертаване амплитудата на цикъла σ_a във функция от деформацията ε (която е сума от еластична деформация ε_e и пластична деформация ε_p). Параметри на хистерезисната крива са σ_a , ε_e , ε_p и специфичната енергия на цикъла W , която представлява площта на хистерезиса [4]. Следователно критериите за разрушаване биват *силови*, *деформационни* и *енергетични*. В табл. 2 са дадени най-често използваните критерии.

Таблица 2

Вид критерий	Критерий на:	Зависимост	Материални и експериментални константи
Силов	Basquin	$\sigma_a = \sigma'_f (N_f)^c$	σ'_f, c
Деформационен	Menson-Coffin	$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (2N_f)^c$	ε'_f, c
	Menson-Coffin- Basquin	$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'}$	E, K', n'
Енергетичен	Halford	$W = w'_f (N_f)^c$	w'_f, c

Силовите критерии са широко използвани в инженерната практика. Най-често се използва зависимостта между амплитудата на номиналното напрежение σ_a и броя цикли до разрушаване N_f (крива на умора – фиг.2). Кривата на умора се определя експериментално, за даден материал и натоварване. В литературата са предложени различни зависимости, описващи тази крива. Някои от тях, например на Basquin (табл.2), описват еднакво добре експерименталните резултати за малоцикловата и за многоцикловата област.

Повечето *деформационни критерии* за разрушаване от умора предполагат наличието на връзка между амплитудата на деформацията и броя цикли до разрушаване. Menson-Coffin поставят началото на използването на нееластичната деформация като параметър на повредите. Те формулират деформационен критерий за разрушаване от умора в малоцикловата област. Критерият на Menson-Coffin-Basquin е по-общ и отчита и влиянието на еластичната деформация (табл.2).



Фиг.2 Крива на умора.

При *енергетичните критерии* се предполага, че разсеяната енергия причинява необратими повреди в материала. При тях мярка за повредите е работата, необходима за протичане на деформация в материала. Halford използва нееластичната енергия в качеството на параметър на повредите (табл.2). При използване на енергетичен критерий е необходимо намирането на специфичната разсеяната енергия за всеки цикъл.

Модели на взаимодействие пълзене-умора

Много изследователи са изучавали процесите на зараждане и развитие на пукнатина в условията на пълзене и умора. Някои от тях фокусират изследванията си върху ефекта от специфични параметри като време на

задържане на натоварването, амплитуда на напреженията, работна среда, влияние на материалните параметри и др. Някои са изучили различни металургични проблеми или разсъждават върху конструктивни и технологични правила. Някои използват числени методи за прогнозиране на ресурса, или предлагат свои собствени модели [2].

Най-често срещаният подход за прогнозиране на ресурса е базиран на линейното сумиране на повредите, причинени от умората и пълзенето. Този подход комбинира сумиране на повредите по Robinson за пълзене [5] и Miner за умора [6] за i на брой режими на работа, както следва:

$$D = D_c + D_f = \sum \frac{N_i}{N_{fi}} + \sum \frac{t_i}{t_{Ri}},$$

където $D_c = \sum N_i/N_{fi}$ са повредите в следствие умора, N_i е брой отработени цикли, N_{fi} е брой цикли до разрушаване при дадената температура и параметри на цикъла; $D_f = \sum t_i/t_{Ri}$ са повредите в следствие пълзене, t_i е отработеното време, t_{Ri} е времето до разрушаване при дадената температура и напрежение, D е сумарен параметър на повредите. Предполага се, че разрушаването ще настъпи при $D=1$.

Правилото на Miner-Robinson за линейно сумиране на повредите е заложено в редица специализирани софутерни продукти за инженерни разчети на съоръжения от химическата промишленост и енергетиката, включително и такива, разработени в нашата страна [7].

Ако се предположи, че поведението на пълзене зависи най-вече от средните напрежения σ_m , а поведението на умора зависи и от амплитудата на напреженията σ_a се достига до друг модел на взаимодействие пълзене-умора [2]:

$$\frac{\sigma_a}{S_f} + \frac{\sigma_m}{R_u} \geq 1,$$

където R_u е границата на продължителна якост при дадена температура и време до разрушаване, а S_f е якост на умора при дадена температура и даден брой цикли.

Методика за оценка на ресурса

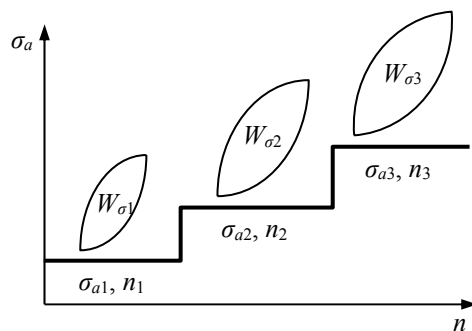
На базата на горните разглеждания е формулирана методика, която позволява да се направи оценка на ресурса, ако са дадени: вид на материала; работна температура T ; параметри на цикличното натоварване – средно напрежение σ_m , амплитуда σ_a , честота на изменение на натоварването f , брой цикли N , форма на цикъла. Следва се следната последователност:

1. Изработват се пробни тела от изследвания материал.
2. Провежда се изследване на пълзене с цел да се прогнозира времето до разрушаване t_R при зададената температура T и напрежение σ_m .
 - 2.1. Провеждат се опити при различни комбинации от високи температури $T_i = \text{const}$ и напрежения $\sigma_j = \text{const}$, и се засича времето за разрушаване.
 - 2.2. Установява се кой параметър дава най-добра връзка между величините $R_{u/i/T}$, t_R и T . Построява се графика на функцията $P = f(R_{u/i/T})$. Например, в [3] е дадена методика за определяне на P_{LM} .
 - 2.3. От графиката, построена в предходната стъпка, се определя стойността на P за дадената стойност на σ_m .
 - 2.4. От уравнението на съответния параметър се изразява и пресмята t_R .
3. Определят се повредите D_f от пълзене на материала:

$$D_f = \frac{t}{t_R},$$

където $t = t_c \cdot N$, а t_c е времето за 1 цикъл.

4. Провежда се изследване на умора за да се прогнозира броят цикли до разрушаване N_f при зададените параметри на цикъла на натоварване.
 - 4.1. Провежда се експеримент при зададените T и σ_m и стъпално натоварване (използва се методът на динамичната хистерезисна крива [8]). Всяко стъпало се характеризира с амплитуда σ_{ai} и брой цикли n_i (фиг.3). Честотата на натоварване е дадена по условие. Регистрират се параметрите амплитуда на напрежението σ_{ai} и амплитуда на деформацията ϵ_{ai} и се строят хистерезисните криви за всяко стъпало.



Фиг. 3 Стъпаловидно циклично натоварване.

4.2. Определя се специфичната разсеяна енергия W_{σ_i} , равна на площта на хистерезиса, за всяка амплитуда σ_{ai} .

4.3. Определя се сумарната разсеяна енергия до отказ: $W_{\Sigma} = n_i W_{\sigma_i}$.

4.4. Приема се $W_{\Sigma} = const$ и се определя броят цикли до разрушаване за всяка амплитуда σ_{ai} чрез хипотезата за линейно натрупване на повредите:

$$N_{fi} = \frac{W_{\Sigma}}{W_{\sigma_i}}$$

4.5. Построява се кривата на умора, определена чрез разсеяната енергия - фиг 4.

4.6. От кривата на умора, за дадената стойност на σ_a се определя броят цикли до разрушаване N_f .

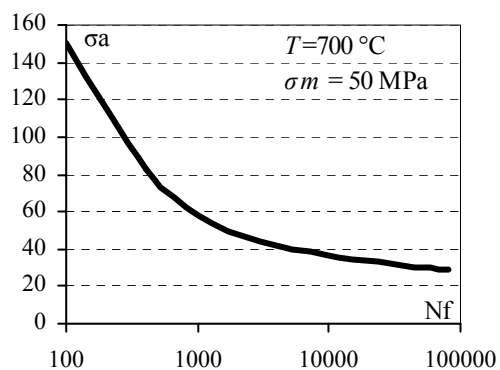
5. Определят се повредите в резултат от умора на

материала: $D_c = \frac{N}{N_f}$.

6. Определят се сумарните повреди:

$$D = D_c + D_f = \frac{N}{N_f} + \frac{t}{t_R}$$

7. Прави се проверка на ресурса. Ако е изпълнено условието $D < 1$, се прави извод, че ресурсът е достатъчен, т.е. че даденият материал ще издържи на зададеното натоварване.



Фиг. 4. Примерна крива на умора за аустенитна стомана.

Пример за приложение на методиката

Задача: Да се направи проверка на ресурса на конструкционен елемент от аустенитна хромникелова стомана, ако: $T=700^\circ\text{C}$, $\sigma_m=50$ МПа, $\sigma_a=30$ МПа; натоварването се изменя по синусоидален закон с период 50 s; време на експлоатация – $t = 720$ h (51840 цикъла).

Решение:

От фиг.4 за $\sigma_a=30$ МПа и $T=700^\circ\text{C}$ се отчита, че $N_f = 75000$ цикъла.

От фиг.1 за $\sigma_m=50$ МПа се отчита, че $P_{LM}=10900$. Тогава:

$$P_{LM} = T(C + \lg t_R) \Rightarrow 10900 = 750(11,09 + \lg t_R) \Rightarrow t_R = 2775,45 \text{ h} = 115,64 \text{ дни.}$$

Определят се сумарните повреди в конструкционния елемент:

$$D = D_c + D_f = \frac{N}{N_f} + \frac{t}{t_R} = \frac{51840}{75000} + \frac{720}{2775,45} = 0,69 + 0,26 = 0,95.$$

Извод: $D < 1$, следователно конструкционният елемент ще издържи на зададеното натоварване при дадената температура, в продължение на желанния срок на експлоатация.

Заклучение

Предложената методика за оценка на ресурса на материали, работещи продължително време при повишени температури и променливо натоварване позволява сравнително бързо и с неголяма експериментална работа да се направи проверка дали даден материал ще издържи в продължение на желанния експлоатационен срок на зададените условия на работа. При прилагането ѝ на практика, методиката трябва да бъде съобразена с особеностите на конкретните материали и условия на работа.

Благодарност

Настоящото изследване е реализирано по Договор с НИС на ТУ-София № 102ни120-4/26.02.2010 на тема „Изследване поведението на топлоустойчиви стомани и магнезиеви сплави в условията на повишени температури и променливо натоварване”.

References

1. Атанасов Т., Николов Н., “Ремонт на бутални и газотурбинни двигатели”. Учебник за висшите технически училища. Издателство на Технически университет-София, България, 2004.
2. Sabour M., Bhat R., „Lifetime prediction in creep-fatigue environment”. Materials Science-Poland, Vol. 26, No. 3, p. 563-584, 2008.
3. Tsonev V., Nikolov N., “Defining the Larson-Miler parameter for a new alloy steel”. RECENT Journal, Vol. 11, No.1 (28), pp. 50-53, Brasov, Romania, March 2010.
4. Димова Б., „Дълготрайност на магнезиеви сплави при променливо натоварване и концентрация на напреженията.” Дисертация. София, България, 2009.
5. Robinson E., „Effect of Temperature Variation on Creep Strength of Steel”, Transaction of ASME, Vol. 160, pp. 253-259, 1938.
6. Miner M., „Cumulative Damage in Fatigue”, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol.12, p. A159-A164, USA, 1945.
7. http://ansyst.com/Ansyst_BG/Ocenka.html, отворен на 01.05.2010 г.
8. Vesselinov K., Dimova B., „Experimental analysis of a method for fast durability estimation”. 10th Jubil. Nat. Congress of Theoretical and Applied Mechanics, p. 407-411, Sept. 13-15, Varna, 2005.