

ВТУ “Т. Каблешков”



МЕХАНИКА НА РАЗРУШАВАНЕТО

доц. Ахмаджова

МЕХАНИЧНО РАЗРУШАВАНЕ

Механичното разрушаване може да се дефинира като всяко изменение на размерите, формата и свойствата на материалите на машините или на отделните детайли, вследствие на което машините не могат задоволително да изпълняват функциите си

- **Еластична деформация** – като вид разрушаване трябва да се разбира в следния смисъл: еластичната деформация на детайла е толкова голяма, че той не може да изпълнява функциите си по предназначение.
- **Провлачане** – в следния смисъл: пластичната деформация е толкова голяма, че детайлът не може да изпълнява функциите си по предназначение.
- **Бринелиране** (локална пластична деформация): статичните усилия водят до пластични деформации в мястото на контакта.
- **Креохко разрушаване**: еластичната деформация е относително толкова голяма, че елементът се разделя на две или повече части; вътрешните дефекти и образуващите се пукнатини се разпространяват до пълното разрушаване; ломът е неравен и зърнист (“относително” – в смисъл на еластичните възможности на материала).
- **Жилаво разрушаване**: пластичната деформация е толкова голяма, че детайлът се разделя на две части; разрушаването е резултат на зараждането, сливането и разпространяването на вътрешни пукнатини; ломът е гладък и вълнист.
- **Умора**: многоциклова; малкоциклова; термична; повърхностна (питинг); ударна; корозионна; фретинг-умора.

- **Корозия:** химична; електрохимична; пукнатинна; точкова (питингова); междукристална; избирателно извличане; ерозионна; кавитационна; корозия, причиняваща водородно повреждане; биологична; корозия под напрежение; фретинг-корозия.
- **Износване:** адхезионно; абразивно; корозионно; повърхностно-уморно; деформационно; ударно; фретинг-износване.
- **Разрушаване при удар:** разкъсване при удар; деформиране при удар; ударно износване; ударен фретинг; умора при удар.
- **Фретинг.**
- **Разкъсване при пълзене.**
- **Разкъсване при пълзене с умора.**
- **Разкъсване при кратковременно пълзене.**
- **Разрушаване от термична релаксация.**
- **Топлинен удар.**
- **Издуване.**
- **Издуване при пълзене.**
- **Задиране и захващане.**
- **Откъртване.**
- **Радиационно повреждане.**

ВЪВЕДЕНИЕ В МЕХАНИКАТА НА РАЗРУШАВАНЕТО

Главен предмет на механиката на разрушаването е явлението разрушаване, а **цел** – създаването на модели на разрушаването на детайлите в машините. Основните работи в областта на механиката на разрушаването главно са посветени на **механиката на пукнатините** – предимно на развитието на магистралните пукнатини в еднородна среда

Магистрална пукнатина е пукнатината, развиваща се с по-голяма скорост спрямо останалите пукнатини при зададени условия на натоварването.

Изследванията са довели до важния извод, че номиналното напрежение, при което става разрушаването, е свързано с размерите на налична пукнатина или пукнатинообразен дефект в материала на детайлите.

При т.нар. механика на линейно-еластичното разрушаване (**линейна механика на разрушаването**) се получават най-прости модели за описване на напреженията около върха на пукнатината при предположенията за:

- линейно-еластично поведение на материала;
- двумерно напрегнато-деформационно състояние около върха на пукнатината.

Линейната механика на разрушаването (известна и като механика на развитието на магистралните пукнатини) описва крехкото разрушаване, получаващо се в резултат на нарастването на пукнатината.

Тъй като пред върха на всяка реална пукнатина винаги се образува и пластична зона, в която разпределенията на напреженията и деформациите се различават от линейно разпределение, възниква въпросът: “Доколко са издържани линейните модели ?”.

Отговорът е условен:

1. Докато пластичната зона е **пренебрежимо малка** в сравнение с дължината на пукнатината, линейно-еластичните модели дават **добри** резултати – линейната механика е коректна.

2. Докато пластичната зона е **определено малка** в сравнение с дължината на пукнатината, линейно-еластичните модели с известни поправки също дават **добри** резултати. В противен случай се прилагат методите на механиката на еластично-пластичното разрушаване (**нелинейната механика на разрушаването**).

Ако дължината на пластичната зона пред върха на пукнатината е над **20%** от полудължината (дължината) на пукнатината, то се налага да се отчита съпротивлението на материала срещу пластичното му деформиране. При такава постановка се прилага нелинейната механика на разрушаването, чиито модели отчитат наличието на достатъчно развита пластична зона пред върха на пукнатината

Стадии в развитието на разрушаването

разграничат се 3 основни стадия на разрушаването

- През **първия стадий** деформирането на основния материал се ограничава в прослойките, където се образува зона на концентрация на напреженията. Основният материал откъм страната на прослойката се намира под действието на опънови напрежения, а основният материал непосредствено извън прослойката – под натискови.
- През **втория стадий** се образува пукнатина: тече процес на нарастване на опъновите напрежения, което води до по-нататъшно увеличаване на концентрацията на напреженията и до откъсване на прослойката от основния материал – първоначално в зоната на концентрацията на напреженията. С “раждането” на пукнатината напреженията бързо се преразпределят, като досега натисковите преминават в опънови: от ограничаващи деформацията преминават към стимулиращи разпространението на пукнатината.
- Третият стадий **представява стартирането на бързо нарастване на пукнатината, след като тя е достигнала критични параметри, в това число критични размери.**

Разрушителният процес, съответстващ на трите стадия, има принципно различен характер – в зависимост от вида на материала:

- Ако **материалът е крехък**, пукнатината се развива до критични размери и стартира.
- Ако **материалът е пластичен**, пукнатината достига критично разтваряне и тогава стартира.
- Ако **материалът е високо еластичен** (способен да издържа при големи еластични деформации), пукнатината придобива формата на елипсовиден отвор, а след това може да приеме и форма, близка до кръгъл отвор – по-слаб концентратор на напреженията. Когато деформациите в областта на концентратора превишат допустимите стойности, стартира разрушаването на материала.

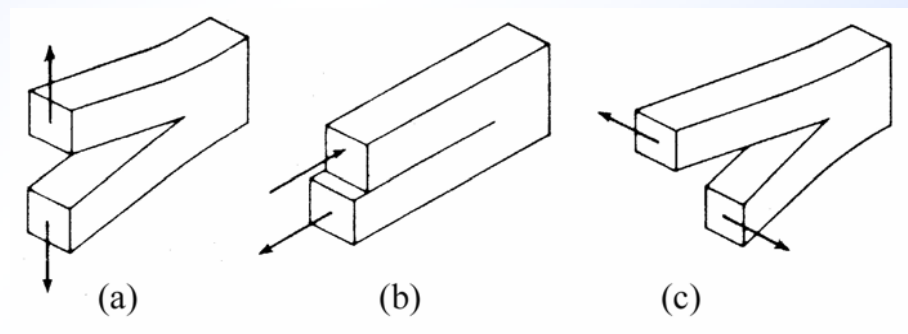
И трите стадия се съпровождат с образуването и разпространяването на еластични вълни на напреженията. Тяхното “улавяне” и подходящият анализ на техните параметри дава възможности за прогнозиране на разрушаването.

Определяне на напреженията и преместванията около върха на пукнатината в линейната механика на разрушаването

Методите за изследване на пукнатините целят определянето на характера на полето на напреженията около върха на пукнатината.

Установено е, че:

- границите на пукнатината оказват основно влияние върху характера на разпределението на напреженията;
- границите на тялото и външните сили влияят само върху интензивността на локалното поле на напреженията около върха на пукнатината.



Фиг. 1. Основни типове деформиране на пукнатини

Приети са **типови схеми** на деформиране на пукнатините (на преместване на повърхнините на пукнатините или на разрушаване):

- (a) **разтваряне** – повърхностите на пукнатината се раздалечават в противоположни посоки, **I тип**;
- (b) **перпендикулярно преплъзване** – повърхнините на пукнатината се плъзгат една спрямо друга в посока, перпендикулярна на върха на пукнатината, **II тип**;
- (c) **паралелно преплъзване** – повърхнините се плъзгат в посока, паралелна на върха на пукнатината, **III тип**.

Изрази за компонентите на напреженията около върха на пукнатината – в условията на двумерно, т.е. равнинно, напрегнато-деформационно състояние

• **(a) за I тип:**
$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots \quad \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \dots$$

в условията на равнинно деформационно състояние (равнинна деформация) останалите компоненти на напреженията се определят така:

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad \tau_{xz} = 0 \quad \tau_{yz} = 0$$

• **(b) за II тип:**
$$\sigma_x = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(-\sin \frac{\theta}{2} \right) \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) + \dots$$

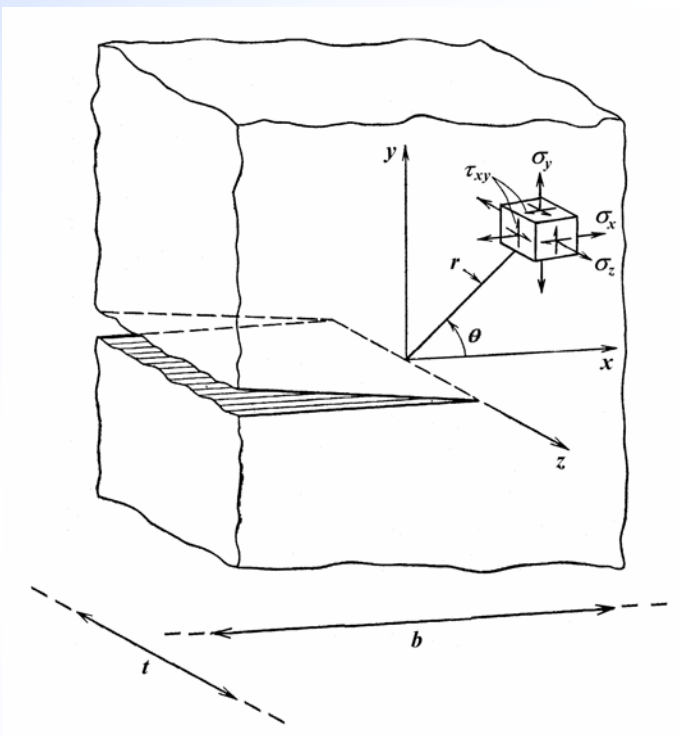
$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \dots \quad \tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots$$

в условията на равнинна деформация

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad \tau_{xz} = 0 \quad \tau_{yz} = 0$$

• **(c) за III тип:**
$$\tau_{xz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \left(-\sin \frac{\theta}{2} \right) + \dots \quad \tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} + \dots \quad \sigma_x = 0 \quad \sigma_y = 0 \quad \sigma_z = 0 \quad \tau_{xy} = 0$$

σ_i и τ_{ij} ($i, j = x, y, z$) са общоприетите означения съответно на нормалните и тангенциалните напрежения; r, θ – полярни координати; ν – коефициентът на Пуасон; K_I, K_{II} и K_{III} , (напрежение)·(дължина)^{1/2} – най-често MPa·m^{1/2} или (сила)/(дължина)^{3/2} – най-често MN/m^{3/2}, – коефициенти на интензивност на полето на напреженията около върха на пукнатината или по-кратко – **коефициенти на интензивност на напреженията**; многоточията означават, че са пренебрегнати определено малки членове за областта около върха на пукнатината; изразите са асимптотични; в зависимост от типа на деформиране на пукнатината външното натоварване се отчита със съответно напрежение – с общо означение s_{min} ; напрежението не фигурира явно – от него зависи съответният коефициент на интензивност на напреженията, – K_I, K_{II} или K_{III} .



Фиг. 2. Пукнатина и координатна система с начало във върха на пукнатината (b е ширината, t – дебелината на детайла (образеца)).

Изрази и за компонентите на преместванията около върха на пукнатината

- **(a) за I тип (в условията на равнинна деформация):**

$$u_x = \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2}\right) + \dots \quad u_y = \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2}\right) + \dots \quad u_z = 0$$

- **(b) за II тип (в условията на равнинна деформация):**

$$u_x = \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2}\right) + \dots \quad u_y = \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(2\nu - 1 + \sin^2 \frac{\theta}{2}\right) + \dots \quad u_z = 0$$

- **(c) за III тип:**

$$u_y = 0 \quad u_z = \frac{K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\theta}{2} + \dots \quad u_z = \frac{K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \text{ където: } \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ е модулът на ъгловите деформации}$$

аналитични изрази за коефициентите на интензивност на напреженията

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_{-l}^l \sigma_{I\infty}(x') \sqrt{\frac{l+x'}{l-x'}} dx' \quad K_{II} = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_{-l}^l \tau_{II\infty}(x') \sqrt{\frac{l+x'}{l-x'}} dx' \quad K_{III} = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_{-l}^l \tau_{III\infty}(x') \sqrt{\frac{l+x'}{l-x'}} dx'$$

$2l$ е дължината на пукнатината, т.е. l е нейната полудължина ;

$\sigma_{I\infty}(x')$, $\tau_{II\infty}(x')$ и $\tau_{III\infty}(x')$ – функциите, описващи натоварването на пластината безкрайно далече от пукнатината, – при типовото деформиране на пукнатини съответно I тип, II тип и III тип

Ако положим $\sigma_{I\infty}(x') = \sigma_{I\infty} = \text{const}$; $\tau_{II\infty}(x') = \tau_{II\infty} = \text{const}$; $\tau_{III\infty}(x') = \tau_{III\infty} = \text{const}$

се получава $K_I = \sigma_{I\infty} \sqrt{\pi l}$ $K_{II} = \tau_{II\infty} \sqrt{\pi l}$ $K_{III} = \tau_{III\infty} \sqrt{\pi l}$

Коефициентите на интензивност на напреженията K_I , K_{II} и K_{III} могат да се определят и от уравненията за компонентите на напреженията. Например, за $\theta = 0$ и $r \rightarrow 0$ следва:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \cdot \sigma_y$$

Уравнения на уморното разрушаване

Характерното за физическата страна на възникването на уморното разрушаване е това, че то може да се развие от начални микропукнатини (дефекти), както и при отсъствие на такива.

Посоката на разпространяването на уморната пукнатина, т. е. пукнатината при разрушаване от умора, се мени:

✓ първоначално съответства на посоката на зараждащата се пукнатина (т. нар. първи стадий);

✓ след това – на средна посока, в зависимост от характера на натоварването (т. нар. втори стадий), – пукнатината нараства; например, средната посока е перпендикулярна на опъновото напрежение.

Понастоящем с известните методи на механиката на разрушаването може да се изследва само вторият стадий.

Изхожда се от предположението, че геометрията на пукнатината се определя само от един параметър – нейната дължина \tilde{l} . Скоростта на нарастване на пукнатината по отношение на циклите N (нарастването на дължината на пукнатината за 1 цикъл) – $\frac{d\tilde{l}}{dN}$

в общия случай се търси във вида

$$\frac{d\tilde{l}}{dN} = F(\Delta K, K_{max}, K_c, \Delta K_{th}, E, \nu, \sigma_S, \dots, m, k_1, k_2, \dots)$$

F е търсената функционална зависимост;

под коефициент на интензивност на напреженията K тук ще разбираме предимно K_I , понеже основните практически приложения и експерименталните данни се отнасят към деформация на уморната пукнатина от I тип;

$\Delta K = K_{max} - K_{min}$ се нарича размах на коефициента на интензивност на напреженията;

K_{min} и K_{max} – съответно минималната и максималната стойност на коефициента на интензивност на напреженията;

ΔK_{th} - т. нар. праг на развитие на уморните пукнатини;

σ_S, \dots, m – характеристики на пластичността:

σ_S – границата на провлачане, . . . ,

m – показател на уякчаването;

k_1, k_2, \dots – набор от микромеханични параметри.

формули, описващи скоростта на нарастване на пукнатината

$$\frac{d\tilde{l}}{dN} = F_1(s_{\text{НОМ}}^{\text{бр}}, \tilde{l}, C'_1, \dots, C'_k) \quad \frac{d\tilde{D}}{dN} = F_2(s^H, \tilde{D}, C''_1, \dots, C''_k) \quad \frac{d\tilde{l}}{dN} = F_3(K_{\min}, K_{\max}, C'''_1, \dots, C'''_k)$$

\tilde{D} е определена геометрична характеристика на “повреденото” сечение: площ, инерционен момент и др.

$\frac{d\tilde{D}}{dN}$ – съответната скорост; $s_{\text{НОМ}}^{\text{бр}}$ – номиналното напрежение в опасното бруто-сечение на детайла

(образеца); например в случая на уморна пукнатина, развиваща се под опъново напрежение: $s_{\text{НОМ}}^{\text{бр}} = \sigma_{\text{НОМ}}^{\text{бр}} = \sigma_{I, \text{НОМ}}^{\text{бр}}$

s^H – текущото напрежение в нето-сечението (“здравото” сечение); C'_1, \dots, C'_k C''_1, \dots, C''_k C'''_1, \dots, C'''_k – константи;

F_1, F_2 и F_3 – функционални връзки

Една от най-използваните формули принадлежи на Пърис $\frac{d\tilde{l}}{dN} = C_p (\Delta K)^n$

n е числов параметър с определена стойност за всеки материал ($n = 2 \div 4$); C_p – размерна константа на материала, зависеща от n : $C_p, MN^{-n} m^{(3n+2)/2}$

интегрирането води до
$$N - N_0 = \int_{\tilde{l}_0}^{\tilde{l}} \frac{d\tilde{l}}{C_p (\Delta K)^n}$$

N_0 и \tilde{l}_0 са съответните начални стойности

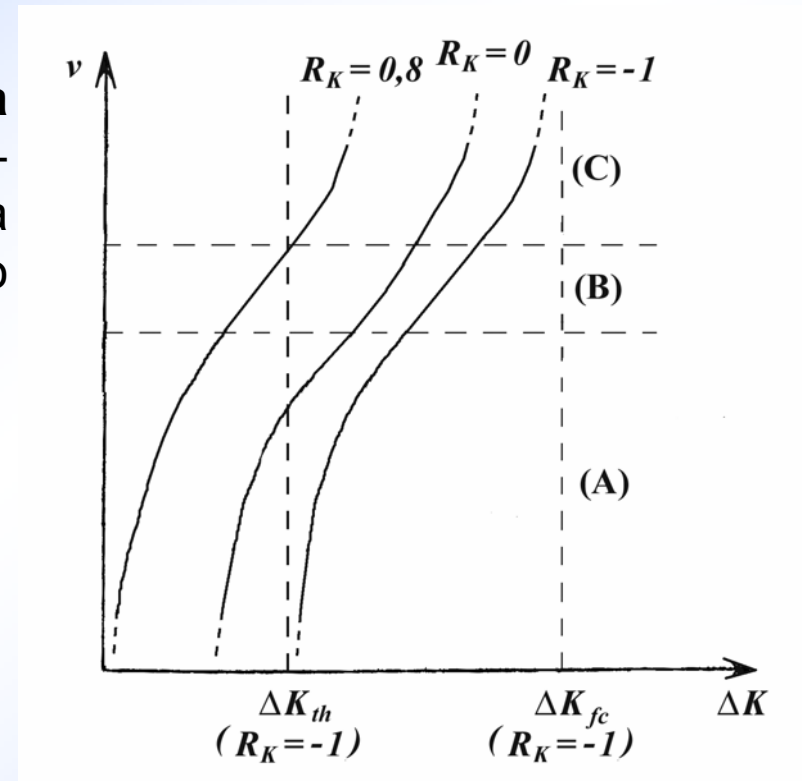
Диаграми на уморното разрушаване

Основна характеристика на **цикличната пукнатиноустойчивост** (пукнатиноустойчивостта при циклична интензивност на напреженията) е диаграмата на уморното разрушаване

Фиг.6. Диаграми на уморното разрушаване на стоманени образци:

Мащабът по абсцисната ос е логаритмичен

Диаграмата на уморното разрушаване е експериментална графична зависимост между скоростта на уморната пукнатина – $v = \frac{d\tilde{l}}{dN}$, и размаха на коефициента на интензивност на напреженията – ΔK



Диаграмите на фиг. 6 са криви с три характерни зони, означени като (A), (B) и (C). В зона (B) кривите се описват с уравнението на Пърис, а в зони (A) и (C) се стремят към вертикални асимптоти, отсичащи от абсцисната ос отсечки с дължини съответно ΔK_{th} и ΔK_{fc} . Вижда се, че при $\Delta K = \Delta K_{th}$ скоростта $v \rightarrow 0$, а при $\Delta K = \Delta K_{fc}$ $v \rightarrow \infty$. Голямо практическо значение има величината ΔK_{th} , наричана **праг на развитие на уморните пукнатини**: физически може да се интерпретира като минимален размах на цикъла ΔK_{th} , при който пукнатината се размърдва (експериментално прагът се определя при $v \leq 10^{-8}$ mm/цикъл); при $\Delta K < \Delta K_{th}$ уморните пукнатини не се развиват

Би могло да считаме прагът като условна граница на умора по интензивност на напреженията – при наличието на пукнатина, докато “класическата” граница на умора въобще не допуска зараждане и развитие на пукнатини

Прагът ΔK_{th} зависи от:

- материала – по отношение на неговите механични свойства (според марката на стоманата или металните сплави);
- дебелината на образеца;
- дължината на пукнатината (докато пукнатините са определено малки);
- динамичния характер на натоварването: коефициента на асиметрия на цикъла – R_K , формата на цикъла, честотата на натоварването и др;
- обкръжаващата среда

Следователно, прагът ΔK_{th} – съществен елемент на цикличната пукнатиноустойчивост, зависи не само от материала, но и от редица фактори, които за детайлите са конструктивни, технологични и експлоатационни (за разлика от статичната пукнатиноустойчивост – ΔK_{Ic} , която е характеристика само на материала). Това уточнява и на разбирането за прага ΔK_{th} като условна якост на умора на детайлите

Начини за задържане на уморните пукнатини

Задържането на уморните пукнатини, т.е. забавянето на развитието им в зададени експлоатационни условия представлява изключителен интерес за експлоатационната надеждност. Изследванията в тази област са показали, че то се наблюдава след претоварване. С многобройни експерименти е установено, че еднократни или многократни претоварвания предизвикват задържане на развитието на уморните пукнатини – с допълнителен ресурс по цикли до разрушаване от порядъка на десетки и стотици хиляди цикли.

Експериментира се и влиянието на:

- температурата при претоварването (повишаването на температурата залага по-голямо задържане на пукнатините);
- газовата среда при претоварването (по-сухата газова среда също залага по-голямо задържане на пукнатините).

Механизмите на явлението задържане на уморните пукнатини тук не са предмет на разглеждане

Влияние на уморното разрушаване върху крехкото разрушаване

В конструкционни елементи на транспортната техника се появяват и развиват уморни пукнатини, които обикновено се откриват и отстраняват при техническите прегледи и ремонтите – преди тези пукнатини да са станали опасни.

При изследването на крехкото разрушаване е установено, че много от пукнатините са възникнали от уморни пукнатини.

Цикличното изменение на напрегнато-деформационното състояние може да спомогне за възникването на крехки разрушения, ако други причини ги пораждат. Цикличните деформации могат локално да повредят материала и да го предразположат към крехко разрушаване при ниски номинални напрежения. Факторът умора на материала трябва да се отчита при наличието на остри врезове (конструктивни или технологични), които могат да породят крехко разрушаване в материали, чувствителни към концентрация на напреженията.

Следователно, на фактора умора на материалите се отдава определена роля в проблема крехко разрушаване

ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕХАНИКАТА НА РАЗРУШАВАНЕТО – ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА НИВОТО НА НАДЕЖДНОСТТА И БЕЗОПАСНОСТТА

В процеса на отработването на ресурса общото съпротивление на транспортния обект срещу разрушаване намалява – вследствие на развилите се пукнатини, износването, корозията и пр.

От гледна точка на безопасността конструктивните решения трябва да бъдат такива, че носещата (основната) конструкция и най-отговорните конструкционни елементи на машината да не се разрушат по време и непосредствено след евентуални аварии или катастрофи. Безопасната машина терминологично е “издръжлива” или “жизнеспособна” (“fail-safe” – на английски език): тя издържа на експлоатационните натоварвания и при наличието на разрушени конструкционни елементи.

Нека сега издръжливостта пренесем на по-ниско конструктивно ниво – към детайли с дефекти. Издръжливостта на детайлите с начални дефекти определя техния ресурс. Голямо значение придобива оценката на ресурса на такива детайли в експлоатационни условия, например, от момента на появата на първата уморна макропукнатина с дължина $0,2 \div 0,5$, *mm* до тяхното *окончателно разрушаване*.

Явлението задържане на уморните пукнатини има голямо практическо значение за разработването на методи за:

- оценяване на издръжливостта при нестационарно натоварване;*
- оценяване и повишаване на надеждността на детайлите и машините.*

Развитието на експерименталните методи за оценка на пукнатиноустойчивостта и разкриването на закономерностите в развитието на пукнатините предлагат възможности за:

- разработването на съвременни критерии за избор на материалите за транспортните машини;*
- конструктивно-технологични варианти с ниска металоємкост, висока надеждност и гарантирана безопасност на транспортната техника*

Благодаря за вниманието!

dba55@abv.bg