

ОЦІНКА ГРАНИЧНОГО СТАНУ БОКОВИН ТРАКТОРІВ НА ОСНОВІ ДВОХПАРАМЕТРИЧНОГО ПІДХОДУ ПРИ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ

Тензометрування ходової частини промислового трактора Т-330, за розтинання та переміщення ним мерзлого ґрунту в умовах Півночі, дозволило визначити найбільш небезпечно напружену зону А, що розташована на боковині ходової частини. Виявлена зона характеризується головними напруженнями σ_A , які за розвитку або розміщення в зоні тріщини (тріщиноподібного дефекту) локалізують її і за даної кінематичної схеми навантаження утворюють осередок руйнування боковини трактора. Довговічність ходової частини визначається довговічністю її боковини оскільки вона являється найслабшою ланкою. Приведені формули визначення довговічності за поширення нано- (“атом за атомом”, що називають накопиченням пошкоджень), мікро- та макротріщин. Надана достовірна оцінка граничного стану боковини тракторів, яка за кліматичних температур описується граничною кривою. Критичні характеристики тріщиностійкості, що розташовані на кривій визначають умови надійної роботи ходової частини трактора.

Вступ. Одними з основних задач механіки матеріалів є задачі достовірної оцінки граничного стану елемента з тріщиною, знаходження характеристик тріщиностійкості, що описують початок і кінець типів руйнування, визначення довговічності елемента та швидкості поширення тріщини в ньому за плинності процесу руйнування в часі з урахуванням впливу в широкому діапазоні дії чинників X, X^* (за наявності і відсутності явища закриття тріщини) та локального опору матеріалу.

Для рішення зазначених проблем використаємо дані робіт [1-5]. Зауважимо при цьому, що, згідно з [1], руйнування матеріалу елемента протікає на нано- (ріст нанотріщини – “атом за атомом”, що називають “накопичення пошкоджень”), мікро- (ріст мікротріщини менше від розміру зерна полікристалічного матеріалу) та макрорівнях (ріст макротріщини: коротка – внутрішня, поверхнева; довга – наскрізна).

Механічний метод поточного розкриття вістря тріщини [2,3] дозволяє виявляти та одночасно вимірювати тріщину довжиною $C_X \approx 10$ мкм. Однак він не надає можливості вивчати закономірності поширення нанотріщини (менша 10^{-6} м). Проте з його допомогою в залежності від розміру зерна можна достовірно виявляти початок росту мікротріщини (тобто кінець росту нанотріщини) та закономірності поширення мікро- й макротріщин.

В роботі [4] довговічність поширення мікротріщини $N_{-1, fmc}$ визначається наступним чином:

$$N_{-1, fmc} = N_0 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{-1, fmc}} \right)^{ctg \alpha}, \quad (1)$$

при рості нанотріщини довговічність $N_{-1, nmc}$ має вигляд:

$$N_{-1, fnc} = N_0 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{-1, fnc}} \right)^{ctg \alpha}. \quad (2)$$

Координати N_0, σ_0 довільної точки на кривих росту нано- і мікротріщин та кут їх нахилу α відповідно визначаються з допомогою методів однієї і двох точок.

Довговічність на обмеження лінійної механіки руйнування при поширенні короткої тріщини (внутрішня, поверхнева) $N_{LFM}^{emb, sub}$ записується як

$$N_{LFM}^{emb, sub} = \frac{\Delta c_X^{emb, sub}}{(dc/dN)_{th, X}^{emb, sub}}. \quad (3)$$

Приріст $\Delta c_X^{emb,sub}$ короткої тріщини визначається розміром зерна полікристалічного матеріалу.

Необхідно відзначити, що промислові трактори працюють на золотодобувних копальнях Півночі в екстремальних умовах при впливі різних чинників. Такими чинниками є низькі кліматичні температури та навантаження при розтинанні і переміщенні трактором мерзлого ґрунту. Тензометрування ходової частини трактора потрібно проводити в умовах близьких до експлуатаційних.

Раніше [5] автором запропоновано двохпараметричний підхід до розрахунку на міцність елемента з тріщиною (на відміну від двохкритеріального підходу [6-8] застосовуються характеристики матеріалу, а не коефіцієнти запасу міцності), що дозволяє з допомогою методу тензометрування (або скінченних елементів [9,10]) знайти найбільш небезпечно напружену зону, а за граничною кривою – надати достовірну оцінку граничного стану боковини (лонжерона) з тріщиною.

Метою роботи є надання достовірної оцінки граничного стану боковини ходової частини трактора, визначення її довговічності та швидкості поширення тріщини в ній при плинності процесу руйнування в часі з урахуванням впливу на нього різних чинників та локального опору руйнування матеріалу.

Кінетика руйнування боковини трактора при дії екстремальних експлуатаційних чинників. Дослідження й аналіз закономірностей руйнування конструкційного матеріалу боковини трактора проводили при випробуваннях зразків згідно з методами [2,3,11,12]. Використовували зразки: прямокутний компактний з крайовою тріщиною [11] для визначення кінетики росту довгої тріщини та “локалізований” прямокутний типу III [12] для виявлення початку (кінця нанотріщини) і кінця мікротріщини та вивчення закономірностей поширення короткої тріщини [4]. Досліджували сталі D9H і Ст.30Л-1. Їх хімічний склад, механічні властивості приведені в [13], а розмір зерна та процентне співвідношення перліту й фериту – [4].

Швидкості поширення короткої $(dc/dN)_{X^*}^{emb,sub}$ та довгої $(da/dN)_{X^*}$ тріщин (макротріщини V_{MC,X^*}) з урахуванням впливу чинників X^* за відсутності закриття тріщини (відзначених вище екстремальних умовах) визначаються наступним чином:

$$V_{MC,X^*} = (dc/dN)_{X^*}^{emb,sub} + (da/dN)_{X^*} =$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} C_2 (\Delta K_{th,X^*} \cdot \Delta K_{fc,X^*})^{n_2/2} + \\ - \left(\sqrt{\Delta K_{th,X^*} \cdot \Delta K_{fc,X^*}} - \Delta K_{X^*}^{emb,sub} \right)^{q_{2,1}} \text{ якщо } \Delta K_{th,X^*}^{emb,sub} \leq \Delta K_{X^*}^{emb,sub} \leq \Delta K_{th,X^*}; \\ - \left(\sqrt{\Delta K_{th,X^*} \cdot \Delta K_{fc,X^*}} - \Delta K_{X^*} \right)^{q_{2,1}} \text{ якщо } \Delta K_{th,X^*} \leq \Delta K_{X^*} \leq \Delta K_{1-2,X^*}; \\ + \left(\Delta K_{X^*} - \sqrt{\Delta K_{th,X^*} \cdot \Delta K_{fc,X^*}} \right)^{q_{2,III}} \text{ якщо } \Delta K_{2-3,X^*} \leq \Delta K_{X^*} \leq \Delta K_{fc,X^*}; \\ C_2 (\Delta K_{X^*})^{n_2} \text{ якщо } \Delta K_{1-2,X^*} \leq \Delta K_{X^*} \leq \Delta K_{2-3,X^*}. \end{array} \right. \quad (4)$$

Дані [1-5] та аналіз довговічностей: при рості нанотріщини $N_{-I,nmc}$, поширення мікротріщини $N_{-I,fmt}$, на обмеження лінійної механіки руйнування за росту короткої тріщини $N_{LFM}^{emb,sub}$, при поширенні макротріщини N_{MC,X^*} дозволяють записати довговічність N_{X^*} матеріалу боковини трактора в діапазоні дії чинників X^* при відсутності закриття вістря тріщини у вигляді

$$\begin{aligned}
 N_{X^*} &= N_0 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{-1, fmc}} \right)^{ctg\alpha} + \frac{\Delta c^{emb, sub}}{X^*} + \frac{(dc/dN)^{emb, sub}}{th, X^*} + \\
 &+ \frac{\int_{a_{th, X^*}^{emb, sub}}^{a_{th, X^*}^a} \frac{da_{X^*}}{C_2 \cdot \left(\Delta K_{th, X^*} \cdot \Delta K_{fc, X^*} \right)^{\frac{n_2}{2}} - \left(\sqrt{\Delta K_{th, X^*} \cdot \Delta K_{fc, X^*}} - \frac{\Delta P^{emb, sub} \cdot \sqrt{\lambda}}{H \cdot \sqrt{b}} \cdot Y \right)^{q_{2, I}}} + \\
 &+ \frac{\int_{a_{th, X^*}^a}{a_{1-2, X^*}^a} \frac{da_{X^*}}{C_2 \cdot \left(\Delta K_{th, X^*} \cdot \Delta K_{fc, X^*} \right)^{\frac{n_2}{2}} - \left(\sqrt{\Delta K_{th, X^*} \cdot \Delta K_{fc, X^*}} - \frac{\Delta P_{X^*} \cdot \sqrt{\lambda}}{t \cdot \sqrt{b}} \cdot Y \right)^{q_{2, I}}} + \\
 &+ \frac{1}{C_2} \cdot \frac{\int_{a_{1-2, X^*}^a}{a_{2-3, X^*}^a} \frac{da_{X^*}}{\left(\frac{\Delta P_{X^*} \cdot \sqrt{\lambda}}{t \cdot \sqrt{b}} \cdot Y \right)^{n_2}} + \\
 &+ \frac{\int_{a_{2-3, X^*}^a}{a_{fc, X^*}^a} \frac{da_{X^*}}{C_2 \cdot \left(\Delta K_{th, X^*} \cdot \Delta K_{fc, X^*} \right)^{\frac{n_2}{2}} + \left(\frac{\Delta P_{X^*} \cdot \sqrt{\lambda}}{t \cdot \sqrt{b}} \cdot Y - \sqrt{\Delta K_{th, X^*} \cdot \Delta K_{fc, X^*}} \right)^{q_{2, III}}}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Геометричний фактор Y залежить від довжини макротріщини a_{X^*} і визначається для різних типів зразків. В роботі [4] визначена довговічність елемента за наявності закриття вістря тріщини в широкому діапазоні дії чинників X .

Тензометрування ходової частини промислового трактора Т-330. Виконане науково-виробничим об'єднанням НАТІ (Челябінськ, Росія) тензометрування ходової частини трактора Т-330 (рис.1) дозволило знайти її найбільш небезпечно напружену зону "А", що розміщена на боковині трактора. Тензометрування ходової частини трактора проводили в умовах, близьких до експлуатаційних. Обробка даних її навантаженості, тобто визначення структури, схематизація, оцінка характеристик проводилися згідно з [14,15].

Експлуатація трактора Т-330 в умовах Півночі показала, що тріщина, яка розвивається в зоні "А" і локалізується [1] головними напруженнями σ_A , є осередком руйнування боковини ходової частини трактора. Тріщини, що розвиваються сповільнено в зонах "Б, С", є нелокалізованими і впливають на поширення локалізованої тріщини. Зародження та поширення локалізованої тріщини в зоні "А" визначають довговічність (5) боковини трактора.

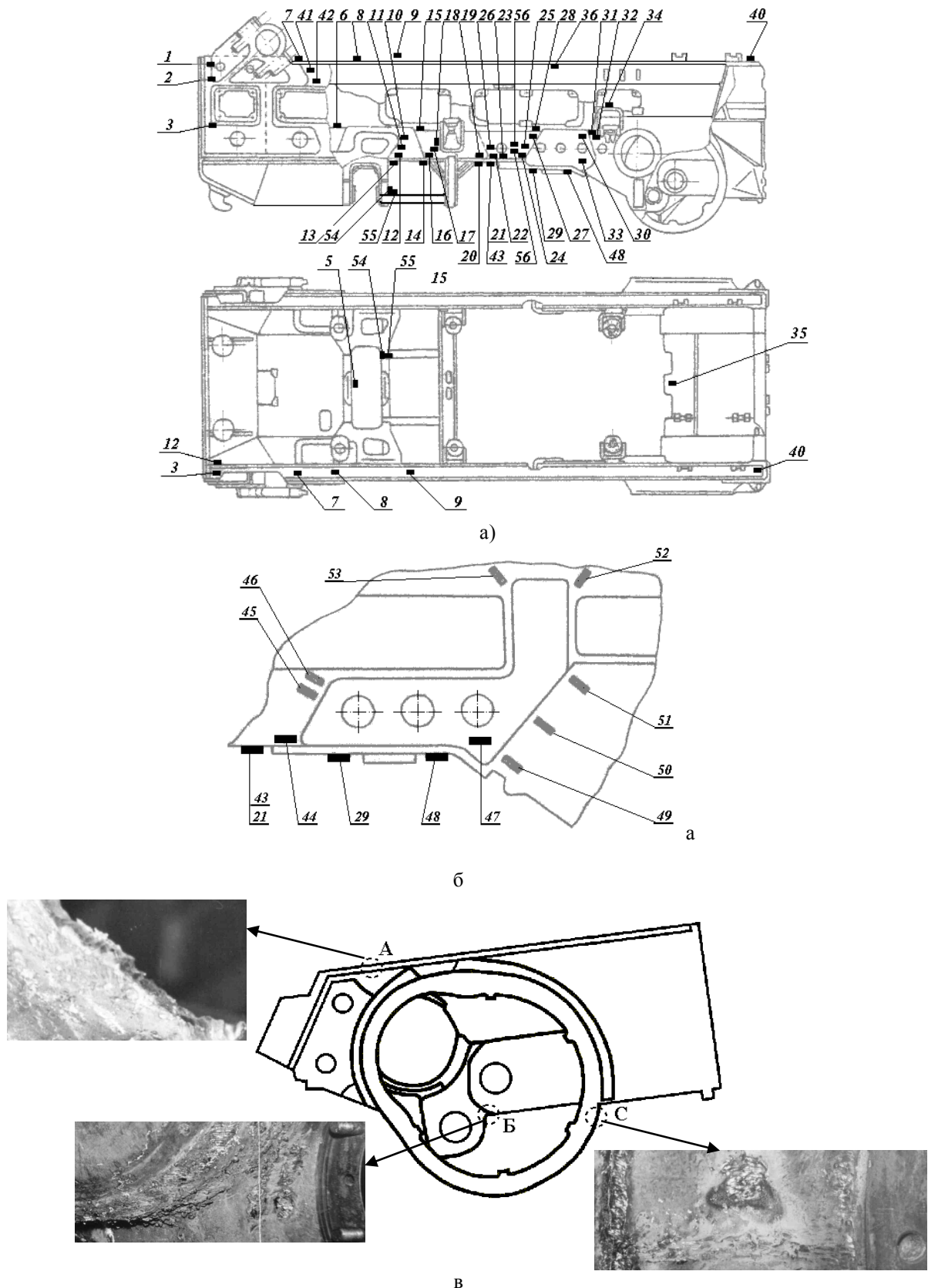


Рис. 1. Тензометрування ходової частини промислового трактора Т-330 (а,б) та зруйнування її боковини (в)

Оцінка граничного стану боковин ходової частини промислових тракторів Т-330 і "Катерпілер". На граничних кривих (рис.2), при однакових низьких температурах, критичні характеристики тріщиностійкості $\Delta K_{fc,T^*}$ матеріалів боковин

тракторів мало відрізняються між собою (для сталі D9H $\Delta K_{fc, T^*=293K} = 70,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $\Delta K_{fc, T^*=213K} = 52,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; для сталі Ст.30Л-1 $\Delta K_{fc, T^*=293K} = 65,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $\Delta K_{fc, T^*=213K} = 51,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$). Граничні криві (залежність $\Delta K_X - \Delta P_X$, штрихові лінії) фіксують зруйнування боковин тракторів при різних чинниках та низьких температурах. Проте типи й процес руйнування за плинності часу описують: двохпараметричний підхід [5] в ефективних координатах $\Delta K_{eff} - \Delta P_X$ (суцільна лінія) і кінетика поширення тріщини [16,17] в координатах $\lg da/dN - \lg \Delta K_{eff}, \lg \Delta K$, що отримана з допомогою методу поточного розкриття вістря тріщини [2,3]. Вони і пояснюють основну причину низької довговічності боковини трактора Т-330. Для сталі Ст.30Л-1 квазікрихке руйнування настає при $T = 248K$ і ефективній характеристиці тріщиностійкості $\Delta K_{eff, T_1}^{f.inv} = 17,4 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, а сталі D9H – $T = 193K$ та $\Delta K_{eff, T_1}^{f.inv} = 21,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ (рис. 2). При кліматичних температурах $T = 213K$ наявність залишкових стискуючих напружень вздовж берегів тріщини, що стримують її ріст, має місце для сталі Ст.30Л-1 до $\Delta K_{fcl} = 15,4 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, а сталі D9H – $\Delta K_{fcl} = 30,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Таким чином, за роботи тракторів Т-330 і "Катерпілер" в умовах широкого діапазону дії низьких кліматичних температур та навантаження при розтинанні і переміщенні мерзлого ґрунту (головні напруження σ_A) тріщина в боковині першого поширюється квазікрихко (в'язко до $T = 248K$) при наявності залишкових стискуючих напружень вздовж її берегів до ефективного розмаху КІН $\Delta K_{fcl} = 15,4 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ і їх відсутності до $\Delta K_{fc} = 51,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, а другого поширюється в'язко при наявності залишкових стискуючих напружень до $\Delta K_{fcl} = 30,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ і відсутності до $\Delta K_{fc} = 52,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ (на прикладі граничної $T = 213K$).

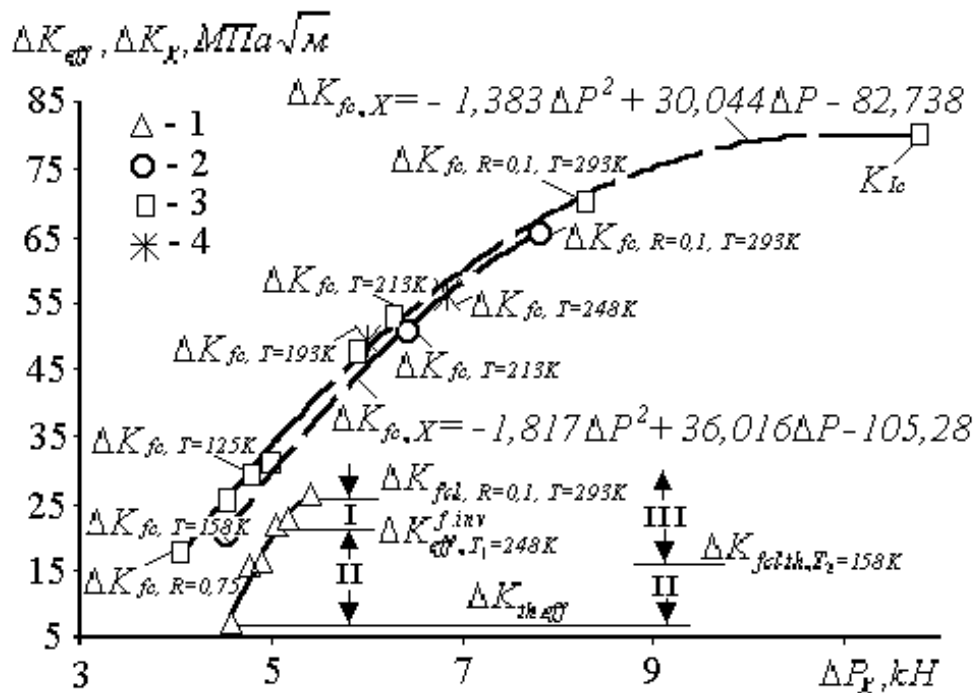


Рис. 2. Залежність ΔK_{eff} (суцільна лінія) і ΔK_X (штрихові лінії) від ΔP_X для сталей Ст.30Л-1 при $T=293K \dots 158K$ і $R=0,1 \dots 0,7$ (1,2) та D9H при $T=623K, 293K \dots 125K, R=0,1 \dots 0,75$ й статичному навантаженні (3):

I – в'язке; II – квазікрихке; III – крихке руйнування.

Початок квазікрихкого зруйнування сталей при низьких температурах (4)

Кінетика руйнування боковини при звичайній дії різних чинників. Швидкість поширення макротріщини $V_{MC,X}$ при наявності закриття тріщини записується:

$$V_{MC,X} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{C_1 \cdot (\Delta K_{th,X} \cdot \Delta K_{fc,X})^{n_2/2}}{\Delta K_{fcl,X}^{n_2-n_1}} + \\ - \left(\sqrt{\Delta K_{th,X} \cdot \Delta K_{fc,X}} - \Delta K_X^{emb,sub} \right)^{q_{2,1}} \text{ якщо } \Delta K_{th,X}^{emb,sub} \leq \Delta K_X^{emb,sub} \leq \Delta K_{th,X}; \\ - \left(\sqrt{\Delta K_{th,X} \cdot \Delta K_{fc,X}} - \Delta K_X \right)^{q_{2,1}} \text{ якщо } \Delta K_{th,X} \leq \Delta K_X \leq \Delta K_{1-2,X}; \\ + \left(\Delta K_X - \sqrt{\Delta K_{th,X} \cdot \Delta K_{fc,X}} \right)^{q_{2,III}} \text{ якщо } \Delta K_{2-3,X} \leq \Delta K_X \leq \Delta K_{fc,X}; \\ \frac{C_1 \cdot \Delta K_X^{n_2}}{\Delta K_{fcl,X}^{n_2-n_1}} \text{ якщо } \Delta K_{1-2,X} \leq \Delta K_X \leq \Delta K_{2-3,X}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Висновок. Надана достовірна оцінка граничного стану боковин ходової частини промислових тракторів Т-330, "Катерпілер" і кінетики поширення тріщини в них та описана довговічність боковин при плинності процесу руйнування в часі з урахуванням впливу на них в широкому діапазоні дії різних чинників.

Strain measurements in the undercarriage of an industrial tractor T-330 in operation when it crushes and moves frozen ground under climatic conditions of the North have made it possible to determine the most critically stressed zone A located on the tractor side-frame. The zone detected, together with the stresses that characterize it and with the initiation and propagation or the presence of a crack (crack-like defect) therein, which is immediately localized by the stresses, are the source of fracture of the tractor side-frame. The lifetime of the undercarriage is determined by that of the side-frame since the latter is the weakest part. In the paper the lifetime is described separately for the propagation of nano- ("atom-by-atom" referred to as damage accumulation), macro-, and microcracks. A reliable assessment of the ultimate state of the tractor side-frame is given, which is represented by the limiting curve at climatic temperatures. The critical crack growth resistance characteristics on this curve under the above conditions determine the reliability of the tractor undercarriage.

Література

1. Піняк І.С. К оценке кинетики упругопластического роста сквозной усталостной макротрещины в металлах при экстремальных и естественных условиях эксплуатации // Пробл. прочности. - 2004. - №2. - С.130-143.
2. Піняк І.С. Методологія вивчення закономірностей поширення втомної тріщини за критерієм росту – поточним і обмеженим ефективним розмахом КІН // Вибрації в техніці і технологіях. - 2001. - № 5. - С.50-53.
3. Красовський А.Я., Піняк І.С. Метод поточного розкриття вістря тріщини в умовах циклічного навантаження // Пробл. прочности. – 2002. – №4. - С.12-27.
4. Піняк І.С. Оцінка стану елемента з тріщиною на основі двохпараметричного підходу до його розрахунку на міцність в умовах пружно-пластичного руйнування // Праці III Міжнар. конф. "Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій" / Під заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: Фіз.-мех.інст. ім. Г.В. Карпенка НАН України. - 2004. – С.159 - 165.
5. Піняк І.С. Двухпараметрический подход к расчету на прочность конструктивного элемента с трещиной // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2004. – №2. - С.99-105.
6. Milne I., Ainsworth R.A., Dowling A.R., Stevart A.T. Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects // Int. J. Pres. Ves. and Piping. – 1988. – 32. – P.3-104.
7. Milne I., Ainsworth R.A., Dowling A.R., Stevart A.T. Background to and Validation of CEGB Report R/H/R6 – Revision 3. // Ibid. – P.105-196.
8. Miller A.G. Review of Limit Loads of Structures Containing Defects. // Ibid. – P.197-327.
9. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541с.
10. Програмне забезпечення "Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій" (SPACE) / Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності №UA1.017.0084261-02. - 2002.

11. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении. Методические указания. Сер.: Проблемы прочности, долговечности и надежности продукции машиностроения. – М.: МНТК “Надежность машин”, 1993. – 56с.
12. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 34с.
13. Пиняк И.С. Влияние закрытия трещины на определяемые характеристики циклической трещиностойкости сталей // Пробл. прочности. - 1998. - №2. - С.161-171.
14. ГОСТ 23.604-79. Надежность в технике. Статистическая оценка нагруженности машин и механизмов. Методы обработки данных о нагруженности. Общие положения. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 23с.
15. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 29с.
16. Пиняк И.С. Микро- и макроскорость роста усталостной трещины в сталях и сплавах под влиянием закрытия трещины // Пробл. прочности. – 2002. – №1. - С.88-101.
17. Пиняк И.С. Вязкохрупкий переход в хладноломких металлах при многоцикловом нагружении // Пробл.прочности. – №5. - С.53-69.

Одержано 05.05.2004 р.