**УДК 621.742.4**

# СТАТИСТИЧНИЙ ПРОГНОЗ РЕСУРСУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ З ПОЗИЦІЙ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ

**В. О. Артемов,** канд. техн. наук
*Одеський державний аграрний університет*

*Запропонована методика оцінки довговічності з урахуванням впливу дефектів зварювання на процес виникнення і розвитку втомних тріщин на базі теорії механіки руйнування.*

**Ключові слова:** довговічність, дефекти, зварювання, металоконструкція, механіка руйнування.

**Вступ.** Рівень технології зварювання дозволяє забезпечити високу якість зварних з'єднань елементів і складових частин машин. Проте повну бездефектність протяжних і багатошарових зварних швів в конструкціях машин масового випуску здійснити дуже складно, що підтверджують дані контролю зварних з'єднань різних конструкцій [1]. Крім того, виконання вимог повної бездефектності призводить до необгрунтованого дорожчання виробів і зниження їх довговічності за рахунок порушень структури зварних з'єднань і внесення додаткових концентраторів напруги при виправленні браку. Досвід випробувань і експлуатації зварних металоконструкцій несучих систем тракторів і причепів показує, що дефекти зварювання є однією з причин розсіювання довговічності [2]. Непровари, пори, підрізи, гарячі і холодні тріщини можуть самі по собі бути вогнищами зародження тріщин втоми і впливають на процес розвитку таких тріщин, які займають значну долю (від 50 до 90%) ресурсу конструкції від початку експлуатації до граничного стану. Прогнозування довговічності металоконструкцій на основі використання в розрахунках даних про розвиток тріщин за результатами стендових і полігонних випробувань прототипів металоконструкцій [3] формально відбиває процеси втомного руйнування і вимагає великого об'єму інформації. У останні час інтенсивно розробляються методи оцінки довговічності з позицій механіки руйнування [4]. В якості основного параметра, що характеризує розвиток тріщини, використовують коефіцієнт інтенсивності напруги К, що відбиває спільний вплив на напружений стан у вершини тріщини, прикладених навантажень і довжини тріщини. Труднощі застосування коефіцієнта К, в розрахунках полягає в необхідності обліку основних чинників, що визначають швидкість процесу руйнування : виду напруженого стану, рівня швидкості процесу руйнування, виду напруженого стану, рівня напруженості, геометричних параметрів тріщин, конфігурації металоконструкцій, впливу довкілля.

**Мета досліджень:** вивчення впливу дефектів зварювання на процес розвитку втомних тріщин на прикладі рами трактора ДТ-75М.

**Результати досліджень.** Завдання оцінки довговічності на стадії руйнування з урахуванням початкових дефектів вирішується різними шляхами. Один з них полягає в приведенні дефекту будь-якої форми до еквівалентної тріщини заданого розміру і подальшому розрахунку довговічності з позицій механіки руйнування [1]. Таке рішення зважаючи на математичні труднощі можливо лише для зразків і елементів конструкцій простої форми і для певних умов навантаження. Інший підхід заснований на статистичній оцінці довговічності зразків з штучно виконаними дефектами за результатами випробувань на втому. Для великогабаритних конструкцій такий підхід скрутний зважаючи на складність виготовлення штучних дефектів і високої вартості випробувань. В зв'язку з цим представляє безперечний інтерес оцінка впливу дефектів на довговічність на основі методів неруйнівного контролю, основна перевага яких полягає в можливості попередньої оцінки розмірів початкових дефектів зразка, підготовленого до випробувань на втому, і подальшого вивчення можливого розвитку цих дефектів. Одним з перспективних методів в цьому відношенні видається ультразвуковий (УЗК) [5]. Таким чином, для натурних металоконструкцій тракторів і причепів можливий шлях рішення поставленої задачі полягає в попередньому виявленні дефектів і оцінці їх розмірів методами ультразвукової дефектоскопії, вивченні кінетики розвитку втомних тріщин в процесі випробувань, обробці результатів обстеження і випробувань на втому і визначенні тісноти кореляційного зв'язку між розмірами і координатами дефектів і параметрами, які характеризують процес руйнування. У рамі трактора, вибраній в якості об'єкту дослідження, добре вивчений розвиток втомних тріщин в з'єднанні задній брус-лонжерон — задній кронштейн (мал. 1), яке обмежує ресурс об'єкту в цілому.

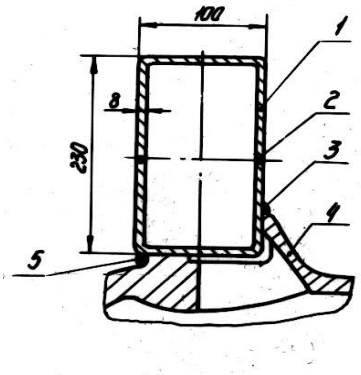


**Рис.1.** Поперечній розтин лонжерона в зоні заднього брусу рами.
1 – стінка лонжерона, 2 – зварий шов лонжерона, 3 – зовнішній зварний шов приварки лонжерона до заднього брусу рами і кронштейну, 4 – задній брус рами, 5 – внутрішній зварний шов приварки лонжерона до заднього брусу рами.

В роботі [2] відмічається наявність технологічних дефектів в цьому з'єднанні практично в усіх зразках різних років випуску і разом з цим стрибкоподібність росту втомних тріщин, обумовлена у тому числі початковими дефектами. Упродовж останніх років конструкція і технологія цього з'єднання залишалися незмінними, що дає можливість об'єднати випробувані рами в одну статистичну вибірку. Характеристики дефектів зварювання були отримані при обстеженні 28 рам по рекомендаціях роботи [6]. Тарировочна залежність (амплітуда сигналу — розмір дефекту) знімалася на зразку рами, випробуваної на стенді блоковим навантаженням до появи в з'єднанні задній брус — лонжерон — задній кронштейн видимої тріщини завдовжки не менше 300 мм [2]. З правого боку

видима зовні тріщина не досягла заднього кронштейна, у зв'язку з чим ця сторона вибрана для тарировочних вимірів за схемою рис. 2. Розподіл величини сигналу по координаті зварного шва (у роботі [2] відзначається, що початок руйнування локалізовано на ділянці косого шва наставки нижньої полиці лонжерону, який береться за початок координат) і фактична глибина тріщини приведені в таблиці. Контроль проводився ехо-методом трьох, чотирьох— і п'ятикратно відбитим променем.

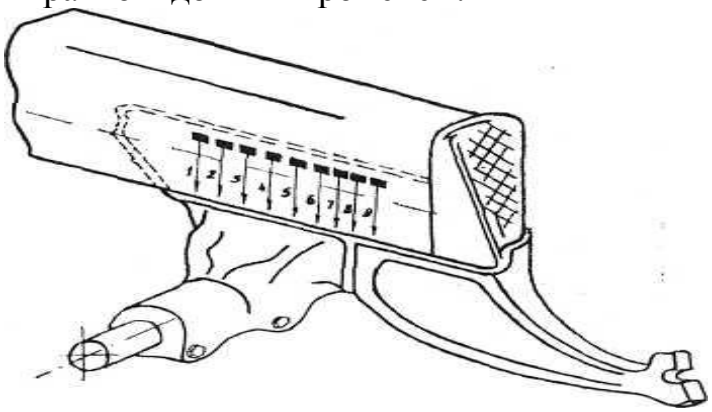

**Рис. 2.** Схема проведення тарировочних замірів.

В зоні 7-9 — го вимірів (рис. 2) тріщина візуально вже не виявлялася, а в зоні 1-го виміру виявлений підріз завдовжки 15 мм. В зоні 1-5 — го вимірів тріщина добре видно зовні. Фактична глибина тріщини визначалася розрізанням в кожному перерізі, де проводився вимір. Орієнтація площини руйнування в різних перерізах має відхилення від площини перпендикулярної поверхні лонжерона на 10 — 15°. Як видно з таблиці, контроль п'ятикратно відбитим променем найправильніше виявляє зміну глибини тріщини по координаті. Деякі відхилення амплітуди сигналу від середнього значення при контролі ділянки, зайнятої наскрізною тріщиною, викликані різною орієнтацією площин руйнування проконтрольованих ділянок, а в зоні першого виміру - наявністю підрізу.

Таблиця 1. **Тарировочні заміри на рамі трактора**

| Кількість обмежень при проведенні УЗК | Амплітуда сигналу, дБ | | | | | | | | | Коефіцієнт кореляції з фактичною глибиною тріщини |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | № заміру | | | | | | | | | |
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | |
| 3 | 20 | 17 | 16 | 20 | 19 | 16 | 17 | 9 | 0 | 0,88 |
| 4 | 17 | 17 | 19 | 16 | 18 | 18 | 16 | 16 | 1 | 0,82 |
| 5 | 21 | 17 | 18 | 17 | 16 | 16 | 14 | 11 | 0 | 0,92 |
| Фактична глибина тріщини, мм | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 7,5 | 7,0 | 6,0 | 4,0 | 2,3 | 0 | |

На рис. 3 приведені гістограми розподілу довжин дефектних ділянок і координат середин цих ділянок за результатами УЗК. Як видно з рис. 3,

довжини дефектних ділянок можуть бути апроксимовані експоненціальним законом розподілу або розподілом Вейбулла, що узгоджується з даними роботи [5]. Емпіричний розподіл координат середин дефектних ділянок може бути апроксимований нормальним законом. В останньому випадку відповідність емпіричного розподілу теоретичному перевірено за допомогою критерію згоди $\omega^2$ і не суперечить гіпотезі про нормальність для рівня значущості $a > 0{,}5$. Вибіркове середнє координат і вибіркова дисперсія склали відповідно $б$ ==194,32 мм і $s$ = 96,48 мм.

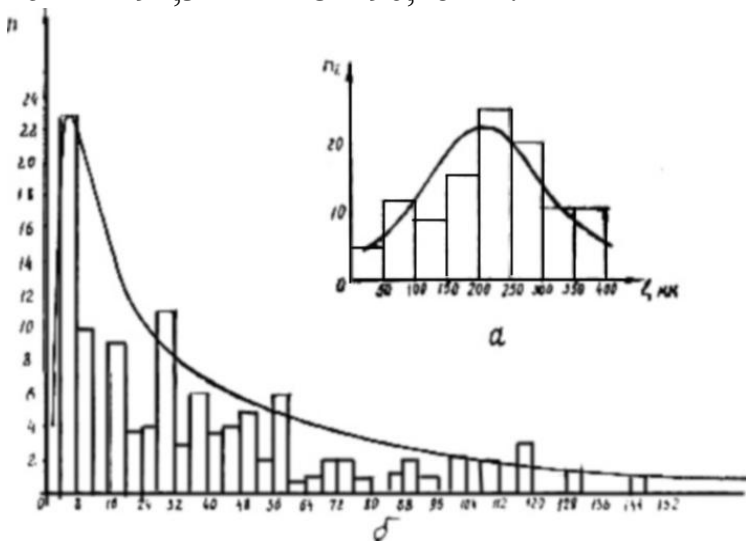

**Рис. 3.** Гістограми розподілу довжин дефектних ділянок -*а* , і координат середин дефектних ділянок — *б*.

Дані про розвиток втомних тріщин в описуваному з'єднанні отримані при випробуванні рам на стенді при постійній амплітуді напруги циклу в зоні косого шва наставки, блоковим і зростаючим (випробування по методу Локати) навантаженням [2]. При описі отриманих залежностей росту тріщин в роботі [2] відзначалася стрибкоподібність процесу втомного руйнування, викликаного як наявністю залишкової напруги і дефектів зварювання по координаті шва, так і погрішностями експерименту. У рамках моделі, що описує процес руйнування, проведемо аналіз цих відхилень зміни швидкості зростання втомної тріщини в припущенні, що основний вклад в них вносять дефекти, що виявляються неруйнівним контролем. У роботі [7] розвиток тріщин в цьому зварному з'єднанні описується з позицій механіки руйнування :

$$dl/dN = C(\Delta K)^n, \qquad (1)$$

де $l$ — поточна довжина тріщини; $N$ — кількість циклів вантаження; $\Delta K$ — розмах коефіцієнта інтенсивності напруги, причому

$$\Delta K = F(l)\sigma\sqrt{\pi l}, \qquad (2)$$

де $\sigma$ — амплітуда напруги циклу; $F(l)$ - коефіцієнт, що характеризує геометрію об'єкту і умови навантаження.

Рівняння (1) справедливе в діапазоні швидкостей довжин тріщин $10^{-9} < v < 10^{-6}$ м/цикл, характерних для тракторних конструкцій. Як відзначається в роботі [7], емпіричні коефіцієнти $C$ і $n$ рівняння (1) не

являються константами, а мають розкид, обумовлений стохастичною природою руйнування. Там же отримані закони розподілу параметрів *C* і *n* для описуваної вибірки, причому коефіцієнт *F* (*l*) дорівнює одиниці, а параметр *C* — постійним для кожної рами по всій довжині зварного шва. Вплив дефектів на швидкість розвитку тріщин врахований завданням $\overline{C}$ параметра *C* змінним уздовж координати шва. Вважаємо, що параметр *n* у виразі (1) враховує зміну швидкості зростання тріщини при зміні умов навантаження. Тоді інші чинники, не залежні від зміни амплітуди напруги циклу, враховані в параметрі *C*. В цьому випадку середнє значення параметра характеризує середній рівень якості шва, а ділянки із $C \succ \overline{C}$ і $C \prec \overline{C}$ дефектні і виконані якісно відповідно. Виходячи з цього параметр *C* представимо у вигляді ступінчастої функції від координати шва. Такий спосіб обліку впливу дефектів на процес руйнування відповідає припущенню про те, що параметр *C* характеризує зміну швидкості розвитку тріщини на дефектних ділянках [7]. Залежність параметра *C* від координати шукатимемо на основі інтегральної форми рівняння Періса, яка, як показано в роботі [7], зручніша для визначення цього параметра натурної конструкції, чим використання рівняння (1) :

$$(l_{i+1})^{1-n/2} = (l_i)^{1-n/2} + C_i\,(n/2-1)\,\sigma_i^{n}\Delta N_i\,, \qquad (3)$$

де $i = 1, ..., m-1$, $m$ — кількість вимірів довжини тріщини; $l_i$ — значення довжини тріщини у момент часу $N_i$ ; $l_{i+1}$ — значення довжини тріщини в наступний момент $\Delta N_{i+1}$ ; $N_i = N_{i+1}-N_i$ .

Інтеграція рівняння Періса проводиться, як відзначалося вище, за умови постійності параметра *C* і коефіцієнта *F (l)* на ділянці [$li$, $li_{+1}$]. Отже, рівняння (3) справедливе при допущенні, що *C* і *F (l)* залежать від координати шва (довжини тріщини *l* ), але в проміжку між двома послідовними вимірами змінюються мало і залишаються практично постійними (тобто можуть бути задані при розрахунку у вигляді частково-постійної функції). Розрахунок по алгоритму (3), при значенні параметра $n = 4$, відповідає усередненому кутовому коефіцієнту кривої втоми рами. Як показано в роботі [7], між параметрами *C* і *n* описуваної вибірки, існує тісна кореляція, у зв'язку з чим один з параметрів може бути вибраний довільно в межах зміни кутових коефіцієнтів кривих втоми тракторних конструкцій. У разі блокового і зростаючого навантаження $\sigma_i$ і $\Delta N_i$ замінюються на еквівалентні амплітуду і кількість циклів навантаження, що розраховуються по формулі :

$$\sigma_{э}^{m}\Delta N_{э} = \sum_{j=S_1^{i}}^{S_k^{i+1}} \sigma_j^{n}\Delta N_j\,, \qquad (4)$$

де $S_1^{i}$; $S_k^{i+1}$ - номера першою і останньою ступенів блоків навантаження відповідно на інтервалі [$N_i$ ; $N_{i+1}$ ]; $\sigma_j$ *і* $N_j$ — амплітуди напруги ступенів блоків і кількості циклів навантаження, які їм відповідають .

Розрахункові залежності параметра $C_i$ від координати зменшуються з ростом тріщини. Наявний тренд обумовлений особливостями навантаження об'єкту, а саме тим, що змінюється значення амплітуд розтягуючої напруги уздовж

координати шва і, як наслідок, тим, що функція *F (l)* цього об'єкту випробувань не являється константою. Для того, щоб знайти залежність *C* від *l* представимо співвідношення (1) у виді:

$$l_{i+1} - l_i = A\, l_i^{-\delta}\, \sigma^n, \qquad (5)$$

або після логарифмування:

$$y_i = u^T x_i, \qquad i = 1, ..., m, \qquad (6)$$

де введені такі позначення:

$$y_i = ln\,(\, l_{i+1} - l_i\,), \quad x_i = (\, ln\,(\sigma^n \Delta N_i), - ln l_i\,)^T, \quad u = (\, lnA, \delta\,)^T$$

Т — знак транспонування.

Вектор невідомих параметрів *u* знайдемо з системи рівнянь (6) методом найменших квадратів:

$$\hat{u}_i = \hat{u}_{i-1} + \frac{G_{i-1} x_i}{1 + x_i^T G_{i-1} x_i}(y_i - x_i^T \hat{u}_{i-1})$$
$$G_i = G_{i-1} + \frac{G_{i-1} x_i x_i^T G_{i-1}}{1 + x_i^T G_{i-1} x_i}, \qquad (7)$$

де $\hat{u}_i$ — оцінка *i* на і -му кроці; $G_i$ — матриця посилення, а початкові значення $u_0$ і $G_0$ задаються з апріорних міркувань. Рекурентна форма методу найменших квадратів (7) більш прийнятніша в порівнянні з традиційним підходом, оскільки при поганій обумовленості матриці $G_i$, алгоритм (7) дає меншу погрішність обчислень *u*. За результатами розрахунку вибрані рами з високим коефіцієнтом множинної кореляції і з цієї вибірки отримано середнє значення

$\overline{\delta} = 0{,}04, \qquad \overline{A} = 7{,}04 \cdot 10^{-2}.$

З урахуванням проведених розрахунків рівняння (1) для $n = 4$ матиме вигляд:

$$dl/dN = C^*(\sigma\, l^{0{,}04})^4, \qquad (8)$$

де $C^* = \pi^2 7{,}04 \cdot 10^{-2} C$.

З рівняння (8) видно, що швидкість розвитку тріщини слабо залежить від її довжини: має місце практично лінійна залежність між логарифмом швидкості розвитку тріщини і логарифмом амплітуди діючої напруги, що не суперечить феноменологічній моделі роботи [2]. На рис. 4 приведена типова залежність параметра *C* від довжини втомної тріщини для однієї з рам, отримана з рівняння (8). При цьому відхилення параметра *C* від середнього рівня зв'язуємо, як вказувалося вище, з якістю зварного з'єднання. Аналіз таких залежностей для усієї вибірки дозволяє зробити висновок про те, що найчастіше відхилення параметра *C* від середнього значення зустрічаються в діапазоні довжин тріщин 120-280 мм, тобто в середній частині зовнішнього зварного шва лонжерон — задній брус — задній кронштейн. Для перевірки припущень про нерівномірність розподілу амплітуд розтягуючої напруги уздовж координати шва і встановлення характеру цього розподілу проведено тензометрування досліджуваної ділянки при випробуванні рами з постійною амплітудою напруги циклу в зоні косого шва наставки. Схема наклейки датчиків приведена на рис. 5.

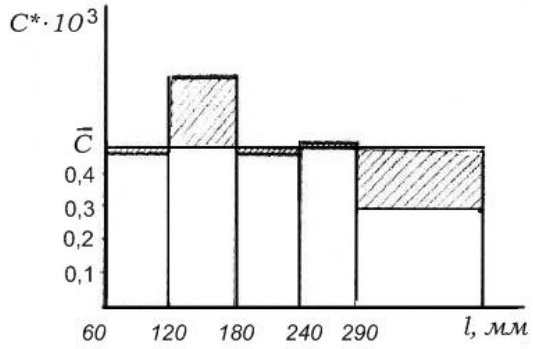


**Рис. 4.** Залежність параметра *C* від координати зварного шва.

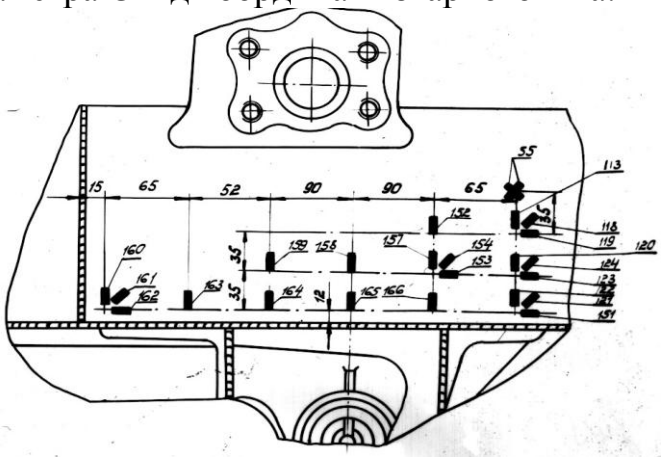


**Рис. 5.** Схема наклейки датчиків.

Виміри показали, що епюра розтягуючої напруги має куполоподібну форму, вершина якого знаходиться над віссю заднього бруса, причому максимальне і мінімальне значення амплітуд розтягуючої напруги відрізняються від амплітуди напруги в зоні косого шва наставки не більше, ніж па 50- 60% відповідно. З урахуванням отриманих даних можна дати якісне пояснення характеру розвитку втомних тріщин в досліджуваному з'єднанні: на ділянці, де амплітуда розтягуючої напруги уздовж координати шва зростає, але менше, ніж відповідна амплітуда в зоні наставки, ріст тріщини відбувається дещо повільніше, ніж по моделі рівняння (1) в припущенні, що $\sigma_a = const$; на ділянці, де $\sigma > \sigma_a$ швидкість зростання тріщини більш висока, ніж за виразом (1) за умови $\sigma_a = const$; нарешті на ділянці, де амплітуда розтягуючої напруги уздовж координати шва зменшується, швидкість зростання тріщини сповільнюється в порівнянні з моделлю формули (1) за умови $\sigma_a = const$. Таким чином, з урахуванням епюри розподілу розтягуючої напруги уздовж координати шва, форма кривої (довжина тріщини— кількість циклів вантаження) має бути s -подібною, що і має місце насправді [2]. Крім того, s –подібна форма кривої за умови стрибкоподібності росту тріщин може бути досить добре описана лінійною моделлю, що знайшло відображення у виводах роботи [2]. Для перевірки припущення про вплив дефектів зварювання на ріст втомних тріщин і визначення характеру цих дефектів проведені випробування двох рам трактора ДТ-75М з постійною амплітудою напруги циклу в зоні косого шва наставки ($\sigma_{a1}$ = 54 МПа, $\sigma_{a2}$ = 44 МПа). Перед випробуваннями проведений УЗК якості чотирьох зварних з'єднань (з

правого і лівого боку рами) задній брус - лонжерон - задній кронштейн. За результатами контролю виявлені і зафіксовані дефектні ділянки. В процесі випробувань контроль за ростом тріщин також проводився ультразвуком за методикою, приведеною в роботі [6], що дозволив зафіксувати початок руйнування в 2 - 3 рази швидше, ніж візуальним способом. Криві (довжина тріщини - кількість циклів вантаження) для випробуваних рам за даними УЗК приведені на мал. 6. Там же відмічені заштрихованою смугою ділянки прискореного розвитку тріщин і дефектні за даними УЗК ділянки (відмічені двічі заштрихованою смугою). Як видно з мал. 6, ділянки прискореного росту тріщин співпадають з дефектними, дещо перекриваючи останні, що підтверджує припущення про вплив дефектів на характер розвитку тріщин.

Для визначення характеру дефектів проведений металознавський аналіз зразка зварного з'єднання рами № 336, в якій візуально з лівого боку втомна тріщина виявлена не була, а за даними УЗК поширилося на 255 мм. Розрізання проводилася по перерізах дефектних (за даними контролю до випробувань) ділянок. Металознавський аналіз показав наявність в усіх розрізаних перерізах дефектів типу холодних тріщин.

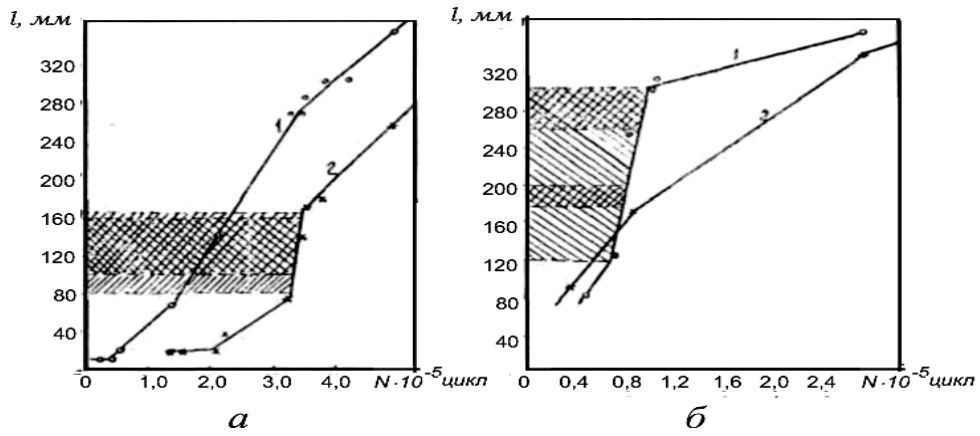


**Рис. 6.** Розвиток втомних тріщин в рамі № 336 — *а*,і в рамі № 339 — *б:* 1 — права сторона рами; 2 — ліва сторона рами.

**Висновки.** Дефекти зварного з'єднання задній брус — лонжерон рами трактора ДТ-75М роблять істотний вплив на розвиток втомних тріщин : швидкість зростання тріщин на дефектних ділянках зростає в порівнянні з бездефектними. При описі розвитку тріщин це може бути враховано завданням параметра *С* рівняння Періса у вигляді частково-постійної функції від координати шва. Емпіричний розподіл координат ділянок зварного шва, визнаних дефектними за результатами УЗК, добре апроксимується нормальним розподілом, а довжин дефектних ділянок — розподілом Вейбулла. Найбільш характерні дефекти в дослідженому з'єднанні — холодні тріщини.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Карзов Г. П., Леонов В. П., Тимофеев Б. Т. Сварные сосуды высокого давления. Прочность и долговечность. — Л.: Машиностроение, 1982, с. 287.
2. Дмитриченко С. С, Панкратов Н. М., Шевченко Л. П., Троян Н. Г. Развитие

трещин в металлоконструкциях тракторов и других машин. — Тракторы и сельхозмашины, 1977, № 4, с. 37—39.
3. Артемов В. А., Расчетная оценка долговечности металоконструкций с трещинами.- Сб. V ювілейної міжнародної науково-технічної конференції "Механізація і енергетика сільского господарства" MOTROL 2005 -Люблін-Одеса, 2005, т. 7, с. 161-165
4. Гиренко В. С., Рабкина М Д., Гиренко С. В. Оценка трещиностойкости металла сварных соединений по результатам стандартных механических испытаний с учетом размеров структурных элементов, - Автоматическая сварка, 2006, №6, с. 20-26
5. Волченко В. Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции. — М.: Металлургия, 1979, с. 88.
6. Перельштейн Л. П. Выбор схем прозвучивания при ультразвуковом контроле наклонными преобразователями, - Дефектоскопия, 1983, №8, с. 16-20.
7. Перельштейн Л. П., Дмитриченко С. С., Округ А. И., Артемов В. А. и др. Статистический прогноз ресурса рамы трактора ДТ-75М с позиций механики разрушения, - В сб. Основные направления экономии и рационального использования металла (Тезисы докладов) Челябинск, 1984.

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ РЕСУРСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ С ПОЗИЦИЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Артемов В. А.

**Ключевые слова:** долговечность, дефекты, сваривание, металлоконструкция, механика разрушения.

Резюме

*Предложена методика оценки долговечности с учетом влияния дефектов сварки на процесс возникновения и развития усталостных трещин на базе теории механики разрушения.*

## STATISTICAL WEATHER RESOURCES OF METAL HOLDINGS MECHANICS DESTRUCTION

Artemov V.A.

**Key words:** durability, defects, mechanics of destruction.

Summary

*The technique of an estimation of durability is offered in view of influence of defects of welding on process of occurrence and development cracks on the basis of the theory of the mechanics of destruction*