

ПРИСКОРЕНА ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРУ УТОМИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИПРОБУВАНЬ КОНСТРУКЦІЙ

В. О. Артемов, канд. техн. наук, **С. В. Конев**, канд. техн. наук

Одеський аграрний державний університет

Узагальнені статистичні дані з випробувань на витривалість та прискорена оцінка характеристик опору втоми ходової системи трактора Т-4А.

Ключові слова: трактор, завантаженість, елементи ходової системи, випробування, межа витривалості, тріщини.

Вступ. Необхідною умовою створення у найкоротший термін конструкцій машин з потрібним ресурсом і мінімальною металоємністю є проведення комплексу досліджень які складаються з експериментальних і розрахункових етапів. З накопичуванням даних по опірності конструкцій руйнуванню збільшується достовірність розрахункових методів оцінки довговічності.

Проблема. Досвід випробувань на довговічність натурних конструкцій показує, що для них характерне руйнування у дві стадії (народжування і розвиток тріщин). Але співвідношення цих стадій залежить від багатьох факторів, тому розрахункова оцінка довговічності потребує подальшого вдосконалення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На стадії народжування, до появи видимих тріщин, довговічність розраховується по відомій формулі лінійного накопичування руйнувань втоми:

$$R = \frac{A \cdot n}{\sum_{j=b}^d \frac{n_j}{N(\sigma_j)}} \quad (1)$$

де A – емпірична константа; n – продовжність (час, довжина, кількість перепон, тощо) досліді при тензометруванні; n_j – кількість амплітуд σ_j за час досліді; b і d – розряди, в яких знаходяться відповідно найменша σ_{\min} і найбільша σ_{\max} амплітуди напруг; $N(\sigma)$ – аналітична залежність циклічної довговічності від амплітуди напруг (крива довговічності).

Довговічність на i -их режимах розраховується по формулі:

$$R = \frac{1}{\frac{t_1}{R_1} + \frac{t_2}{R_2} + \dots + \frac{t_i}{R_i}} \quad (2)$$

де t_i – доля часу використання машини на даному режимі від загального часу його роботи; R_i – довговічність деталі, яка розрахована по формулі (1).

Досвід розрахунків довговічності по формулах (1) і (2) доводить [1], що розподіл величини накопиченого руйнування $\Sigma n_j/N_j$ задовільно описується логарифмічно нормальним законом і ймовірність похибки розрахунку більш ніж удвічі становить 0,1. У той же час для стадії граничного стану розрахункова довговічність може відрізнятись від дослідної у кілька разів. Це пояснюється складними закономірностями розвитку втомних тріщин у конструкціях. Вказані формули дають задовільний збіг розрахункових і експериментальних величин довговічності, знайдених для стадії граничного стану, якщо криві втоми в логарифмічних координатах для двох стадій паралельні [2].

Мета досліджень: вдосконалення розрахункової оцінки характеристик опору втоми і довговічності конструкцій по результатам випробувань при програмному навантаженні.

Результати досліджень. В залежності від аналітичного виразу $N(\sigma)$ формула (1) приймає різні вирази. Найбільш поширені статеchna $N \cdot \sigma^m = N_\sigma \cdot (\sigma_R)^m$ і показова $N = N_\sigma \cdot 10^{-\mu(\sigma - \sigma_R)}$ залежності, які після логарифмування приймають вигляд:

- статеchna:
$$\lg N = \lg N_\sigma - m \cdot (\lg \sigma - \lg \sigma_R)$$

- показова:
$$\lg N = \lg N_\sigma - \mu \cdot (\sigma - \sigma_R)$$

Ці рівняння можна описати єдиним лінійним рівнянням вигляду:

$$y = y_\sigma + b \cdot (x - x_R), \quad (3)$$

де $y = \lg N$; $y_\sigma = \lg N_\sigma$; $b = -m$; $x = \lg \sigma$; $x_R = \lg \sigma_R$; для статеchnій і $b = -\mu$; $x = \sigma$; $x = \sigma_R$; для показової залежностей; N_σ – базова кількість циклів, при якій крива втоми (3) має точку переходу від похилої до горизонтальної ділянки; σ_R – межа витривалості відповідна N_σ .

Для побудови кривій втоми (3) проводимо випробування партії зразків на 4 ... 6 рівнях напруг. Обробку результатів випробувань на утому с ціллю визначення параметрів рівняння (3) проводимо методом найменших квадратів. Регресійну пряму для ймовірності P отримаємо у вигляді:

$$y_p = a + b \cdot (x - \bar{x}) + U_p \cdot S, \quad (4)$$

де a , b , x – статистично незалежні параметри [4], U_p – квантиль нормального розподілу, S – середнє квадратичне відхилення результатів випробувань від регресійної прямої (3). Із зіставлення формул (3) і (4) витікають очевидні рівності для визначення параметрів m , σ_R , і N_σ .

$$\mu = -b$$

$$m = -b$$

$$\lg N_\sigma + \mu \cdot \sigma_R = a - b \cdot \bar{\sigma} + U_p \cdot S \quad (5)$$

$$\lg N_\sigma + m \cdot \lg \sigma_R = a - b \cdot \bar{x} + U_p \cdot S$$

Для підвищення точності розрахунків параметри кривих втоми уточнюємо по результатам стендових випробувань натурних конструкцій при програмному

багатоступінчастому, або з блоком, побудованому на основі розподілу амплітуд напруг заміряних в експлуатації. Уточнення розрахункових формул проводимо з використанням допущення о визначальному впливі якості виготовлення матеріалів і конструкцій. Це відповідає припущенню [3] о наявності для кожного виробу індивідуальної кривої утоми. Представимо результати випробувань у вигляді варіаційного ряду

$$N_1 < N_2 < \dots < N_j < \dots < N_k,$$

де N_j – довговічність до граничного стану, k – кількість зразків.

Межу довговічності визначаємо з урахуванням узагальнених залежностей [5].

$$m = 0,027\sigma_R + 3,561 = \alpha\sigma_R + \beta$$

$$C = 0,997(m+1)lg\sigma_R + 5,103 = g(m+1)lg\sigma_R + \gamma$$

за формулою:

$$\sigma_{Rj} = \exp \frac{\ln[N_j \sum_{i=1}^n H(\sigma_i - 0,5\sigma_R) P_i \exp[(\alpha\sigma_R + \beta)m\sigma_R - \gamma \ln 10]]}{g(\alpha\sigma_R + \beta + 1)}. \quad (6)$$

Якщо усі індивідуальні криві утоми мають однакові кутові коефіцієнти, то межа довговічності визначається за формулою:

- для статичного рівняння кривої утоми

$$\sigma_{Rj} = \exp \frac{N_j N_\sigma \sum_{i=1}^{m_j} H(\sigma_i - 0,5\sigma_R) P_i \sigma_i^m}{m} \quad (7)$$

- для показового рівняння кривої утоми

$$\sigma_{Rj} = \frac{lge}{\mu} \left(\ln \left(\frac{N_j}{N_\sigma} \sum_{i=1}^n H(\sigma_i - 0,5\sigma_R) P_i \exp \frac{\mu\sigma_i}{lge} \right) \right). \quad (8)$$

У цих формулах $H(\sigma - 0,5\sigma_R)$ – функція Хевісайда, яка задовольняє умовам

$$H(\sigma - 0,5\sigma_R) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \sigma \geq 0,5\sigma_R \\ 0, & \text{якщо } \sigma < 0,5\sigma_R, \end{cases}$$

P_i , σ_i - частість і амплітуда напружень на i -тій ступені; m_j - число ступенів навантажування j – го зразка.

У результаті розрахунку одержуємо варіаційний ряд індивідуальних величин меж витривалості σ_{R1} , σ_{R2} , ..., σ_{Rk} для якого визначаємо функцію розподілу. Відомо, що розподіл меж витривалості задовільно описується як нормальним, так і логарифмічним нормальним законом. Тому значення меж витривалості для ймовірності P запишемо у вигляді:

- для нормального розподілу

$$\sigma_{RP} = \bar{\sigma}_R + U_P S_{\sigma_R}, \quad (9)$$

- для логарифмічного нормального розподілу

$$\sigma_{RP} = \exp[\ln 10(\overline{lg}\sigma_R + U_P S_{lg}\sigma_R)], \quad (10)$$

де $\bar{\sigma}_R$, S_{σ_R} , $\overline{lg}\sigma_R$, $S_{lg}\sigma_R$ – середні арифметичні та середні квадратичні відхилення меж витривалості і їх логарифмів.

При невеликій кількості випробуваних зразків отримати рівняння кривій втоми у вигляді (3) і рівняння (8), (9) з прийнятною точністю скрутно. У цьому випадку розрахунок довговічності проводимо з використанням рівнянь (1) і (4) за формулою:

$$R_P = \frac{A \cdot n \cdot \exp[(a - b\bar{x} + U_P S) \ln 10]}{\sum_{j=b}^k n_j \cdot \exp(-b \cdot \ln 10 \cdot x_j)}.$$

Якщо позначити ресурс, який вираховується за медіанної кривої втоми ($U_P = 0$), через R_{cp} , то можливо записати, що $R_P = R_{cp} \cdot \exp(U_P \cdot S \cdot \ln 10) =$

$$= R_{cp} \cdot \exp\left(U_P \cdot S_y \sqrt{\frac{(n-1)(1-r^2)}{n-2}} \cdot \ln 10\right). \quad (11)$$

При достатній кількості зразків, що дозволяє достовірно визначати межу витривалості за формулами (9) або (10) довговічність визначаємо, використовуючи рівняння (1), (3) і (5) за формулами:

- для статечного рівняння кривої втоми

$$R(P) = R_{cp} (1 + U_P V_{\sigma_R})^m \quad (12)$$

- для показового рівняння кривої втоми

$$R(P) = R_{cp} \cdot \exp(\mu \cdot \ln 10 \cdot U_P S_{\sigma_R})^m \quad (13)$$

Для перевірки розглянутого підходу проведено експерименти щодо визначення характеристик опору втомі рам гусеничної візки трактора Т-4А. Було випробувано 42 рами з чотирма різними конструктивними змінами вузлів [2]. Рами гусеничних візків трактора Т-4А (рис. 1) мають складну сварно-литу конструкцію, що складається з двох лонжеронів гнутих профілів прямокутного перерізу 160x80x7 (великого 1 і малого 2), виготовлених із сталі 09Г2 і з'єднаних між собою поперечними трубчастими і литими зв'язками 3. До малого лонжерону приварений литий розкіс 4 з привареним кулаком 5 під роз'ємний підшипник. До верхніх полиць лонжеронів приварені напрямні планка, пластини, кронштейни і накладки, що створюють підвищену концентрацію напружень і знижують втомну міцність. Обстеження тракторів Т-4А в експлуатації показали, що довговічність рам візків першого варіанту недостатня. У рамах першого варіанту основним елементом, що лімітують довговічність рами був великий лонжерон, який руйнувався в зоні шва приварки заднього кінця направляючої планки механізму натягу гусениць до його верхній полиці (рис. 1, 1А). За критерій граничного стану приймалася довжина тріщини, яка перевищує 25% периметру перетину. Тензометричні дослідження показали високу навантаженість цього вузла. Основними видами деформацій були вигин у вертикальній площині і кручення щодо поздовжньої осі рами з співвідношеннями амплітуд дотичних і нормальних напруг для великого лонжерона 1:4, для малого - 1: 2,5 (тобто рама переважно деформується у

вертикальній площині). Середнє значення коефіцієнта асиметрії циклу $K = 0,2$. Для отримання втомних характеристик вузла 1А проводилися стендові випробування на втому при декількох фіксованих значеннях навантаження. Після доопрацювання вузла А, що полягає у продовженні направляючої планки до задньої накладки кріплення підшипника ведучої зірочки, додатково, з метою підвищення жорсткості великого лонжерона, до його зовнішньої стінки була приварена накладка. Для цієї рами (варіант 2) також проводився аналогічний комплекс досліджень. Результати досліджень показали, що напруженість у вузлі А (2А) знизилася більш ніж на 20 % , а довговічність зросла в 2,5 рази і досягла нормативних значень.

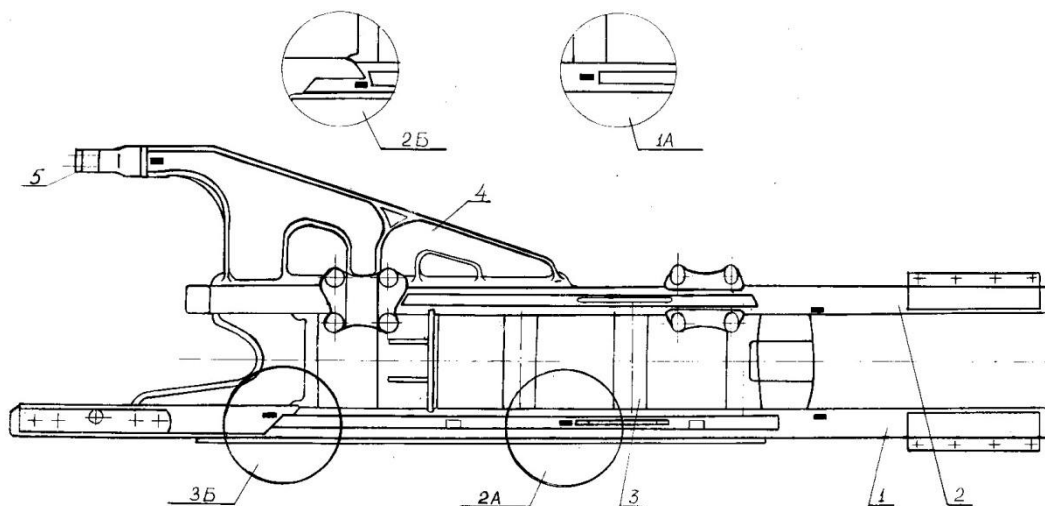


Рис. 1. Загальний вигляд рами гусеничної візки трактора Т-4А і схеми варіантів вузлів (1А, 2А, 2Б, 3Б).

Однак довговічність рам в цілому виявилася недостатньою и стала лімітуватися міцністю втому зварного з'єднання направляючої планки з задньою накладкою – вузол Б (2Б) за наявності зазору між планкою і накладкою. З метою усунення цього недоліку в спробній рамі (варіант 3) задня накладка і направляюча планка з'єднані виступом без зазору і місто з'єднання проварено по периметру (вузол 3Б). Для рам третього варіанту полігонні випробування не проводилися, тому з метою підвищення точності оцінки довговічності, крім тензометричних досліджень і стендових випробувань при фіксованих значеннях напруг, проводилися програмні стендові випробування рам другого варіанту для вузла 2Б. Параметри програм навантажування наведені в таблицях 1 і 2. Так, як результати випробувань при регулярному навантаженні 29 рам показали, що криві втому (рис. 2) для стадій появи видимої тріщини довжиною 10 мм і граничного стану (довжина тріщини 100 мм) паралельні, то гіпотезу лінійного підсумовування втомних пошкоджень можна використовувати і для стадії граничного стану [2]. За результатами випробувань з постійної і змінної амплітудами напруг за формулами (6) ... (8) обчислені величини меж витривалості. Результати обчислень згруповані по вузлах і методах випробувань і наведені на рис. 3.

Таблиця 1. **Параметри ступінчастого режиму навантаження (Локати).**

Вузол	Начальна напруга, МПА	Кількість циклів на ступені	Приріст напруги між ступенями
2Б	40	40000	6
3Б	45	40000	6

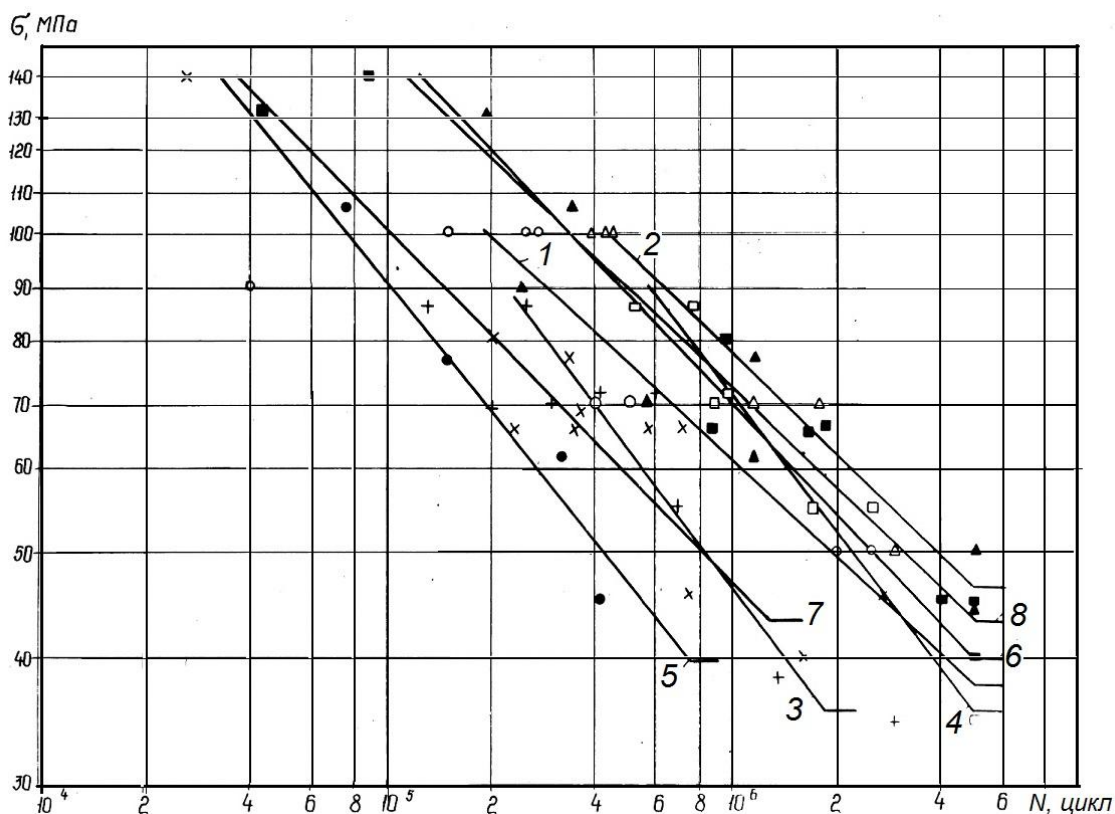
За результатами випробувань з постійної і змінної амплітудами напруг за формулами (6) ... (8) обчислені величини меж витривалості. Результати обчислень згруповані по вузлах і методах випробувань і наведені на рис. 3.

Таблиця 2. **Режими блочного програмного навантаження рам гусеничної теліжки трактора Т-4А.**

Номер ступені i	Перший варіант програм для вузлів 3Б и 2Б			Другий варіант програм для вузла 3Б		
	σ_i	σ_i / σ_{\max}	$n_i / n_{\text{сум}}$	σ_i	σ_i / σ_{\max}	$n_i / n_{\text{сум}}$
1	26	0,194	0,055	22	0,190	0,055
2	50	0,373	0,235	43	0,371	0,235
3	74	0,552	0,177	64	0,552	0,177
4	98	0,731	0,039	85	0,733	0,039
5	122	0,910	0,067	106	0,914	0,0067
6	134	1,000	0,031	116	1,000	0,0031
7	110	0,821	0,0142	95	0,819	0,0142
8	86	0,642	0,094	75	0,647	0,094
9	62	0,463	0,241	54	0,466	0,241
10	38	0,284	0,135	33	0,284	0,135

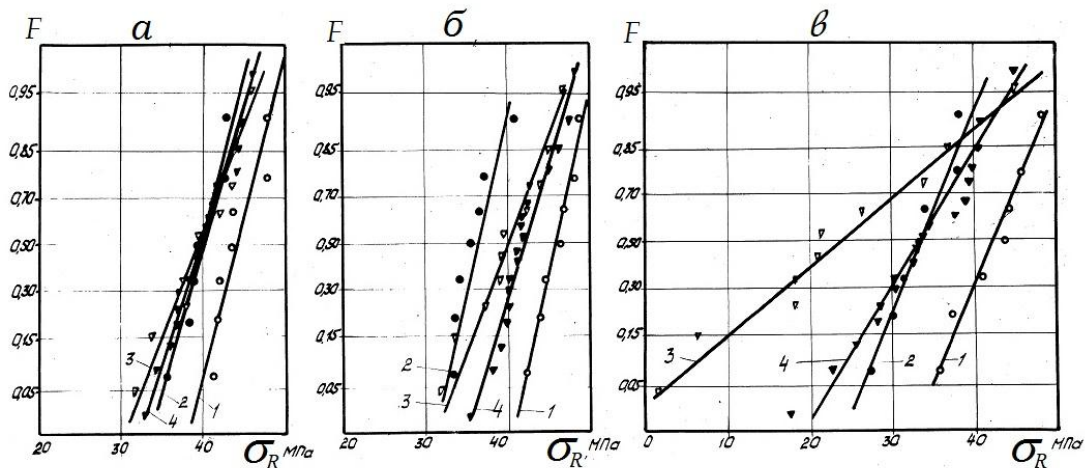
Аналіз результатів розрахунків показує, що розкид індивідуальних значень меж витривалості (відношення максимального значення до мінімального) коливається у вузькому діапазоні при обчисленні по формулах (6), (7) і змінюється від 1,041 до 1,446 і від 1,030 до 1,450 відповідно. У разі застосування формули (8) розкид для всіх вузлів дещо більше від 1,110 до 1,980 за винятком вузла 2Б при постійній амплітуді напружень (32,847). Відношення середнього значення по всіх режимах навантажування змінюється в ще більш вузьких межах від 0,995 до 1,072 і від 0,963 до 1,051 для (6) і (7) і дещо більше від 0,872 до 1,227 для (8). З рис. 3 видно також, що краща візуальна згода емпіричних і теоретичних розподілів спостерігається при обчисленнях меж витривалості за формулою (7). Перевірка згоди емпіричних розподілів з теоретичним законом за статистичними критеріями не проводилася через невеликий обсяг даних.

Висновки. Порівнюючи значення меж витривалості, отримані при різних методах випробувань (з постійною амплітудою; з блоковим вантаженням, моделюючим розподіл амплітуд напруг випадкових процесів експлуатаційного навантаження; з багатоступеневим вантаженням по Локаті), можна зробити висновок, що використання одного і того ж підходу - лінійного підсумовування втомних пошкоджень для розрахункового визначення меж витривалості дає практично однакові результати.



узел 1А – 1, 2; 2А – 3, 4; 2Б – 5, 6; 3Б – 7, 8;

Рис. 2. Криві втоми вузлів рами гусеничної візки трактора Т-4А - по моменту тріщиноутворення - 1, 3, 5, 7; - за граничним станом - 2, 4, 6, 8



1 – o – вузел 1А, 2 – ● – 2А, 3 – ▽ – 2Б, 4 – ▼ – 3Б

Рис. 3. Розподіл меж витривалості вузлів рами гусеничної теліжки трактора Т-4А, розрахованих: а) по рівнянню (6); б) – (7); в) - (8)

Висновки. Таким чином, можна рекомендувати використання розглянутого підходу для визначення меж витривалості, якщо з результатів раніше проведених випробувань на втому відомо, що m - параметр статичного рівняння кривої втоми лежить у вузькому діапазоні і його величина визначена.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дмитриченко С. С. Опыт расчета усталостной долговечности металлоконструкций тракторов и других машин. – Тракторы и сельхозмашины, 1971, №2, с.7...8.
2. Дмитриченко С. С., Артемов В. А., Батуров З. А. Расчет на усталость при двухстадийном разрушении (на примере рам тележек трактора Т-4А), - Тракторы и сельхозмашины, №8, 1983, с.25...27.
3. Кордонский Х. В., Фридман Я. Ф. Некоторые вопросы вероятностного описания усталостной долговечности (обзор). - Заводская лаборатория, 1976, т.42, №7, с.829..847.
4. Айзаян С. А. Статистическое исследование зависимостей. М., Металлургия, 1968, 228 с.
5. Артемов В. А. Определение предела выносливости изделий по результатам программных испытаний. "Детали машин", Киев. 1977, вып.24, с.75...78.

УСКОРЕННАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ

Артемов В. А., Конев С. В.

Ключевые слова: трактор, загруженность, элементы ходовой системы, испытания, предел выносливости, трещины.

Резюме

Обобщены статистические данные по испытаниям на выносливость и ускоренной оценки характеристик сопротивления усталости ходовой системы трактора Т-4А.

ACCELERATED PERFORMANCE EVALUATION OF RESISTANCE TO FATIGUE TEST RESULTS OF STRUCTURES

Artemov V. A. , Konev S. V.

Keywords: tractor, load, suspension system components, testing, endurance limit, cracks.

Summary

Compilation of statistical data on tests of endurance and accelerated evaluation of the characteristics of the fatigue resistance of the tractor chassis T-4A.