

УДК 620.191.33:620.193

© П.В. Попович, к.т.н.

Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ РАМ РОЗКИДАЧІВ ДОБРІВ З ВРАХУВАННЯМ УМОВ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Розроблена методика для визначення ресурсу балкових елементів металоконструкцій рам розкидачів добрив за дії циклічного згину і корозійно агресивних середовищ. Довговічність балкових елементів металоконструкцій рам розкидачів добрив представлена як сума періодів зародження і докритичного росту корозійно-втомних тріщин. На основі раніше отриманих автором результатів записані математичні моделі для визначення періодів зародження і докритичного росту в металевих матеріалах корозійно втомних макротріщин. За корозійно агресивні середовища тут прийняті розчини добрив.

ЕЛЕМЕНТИ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ РАМ РОЗКИДАЧІВ ДОБРІВ, ДОБРІВА, КОРОЗІЙНО АГРЕСИВНЕ СЕРЕДОВИЩЕ, ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС БАЛКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ.

Постановка проблеми. Під час робочого циклу металоконструкції сільськогосподарських машин піддаються негативному впливу атмосфери, ґрунту, отрутохімікатів, органічних і мінеральних добрив. Так, на машини для захисту рослин і для внесення рідких добрив впливає рідинна й атмосферна корозія. Ґрунтообробна техніка піддається абразивному і корозійному зношуванню. Машинно-тракторний парк піддається, з одного боку, механічному зношуванню у період використання, з іншого - корозійному руйнуванню під дією природних чинників (дощу, сонця, вітру і т. д.) та корозії у неробочий період. Особливо уражаються металеві частини сільськогосподарських машин, що піддаються корозії, швидкість якої збільшується при зіткненні з ґрунтом, рослинністю, отрутохімікатами, добривами, а також при порушенні лакофарбового шару. Через корозійне руйнування відбувається до 33% відмов сільськогосподарських машин. Міцність вуглецевих сталей, сірого чавуну знижується на 40-55%, знос сполучених деталей збільшується удвічі-четверо. Щорічно сільське господарство країни несе величезний матеріальний збиток від недотримання правил зберігання і порушення антикорозійного

захисту. Для прогнозування виходу з ладу сільськогосподарських машин важливе значення має розробка методів прогнозування їх залишкового ресурсу з врахуванням дії на них експлуатаційних навантажень і корозійно агресивних середовищ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. *Основи методики визначення ресурсу типових тонкостінних балкових елементів металоконструкцій сільськогосподарських машин.* Сільськогосподарські машини працюють в умовах змінних в часі навантажень і корозійно агресивних середовищ. В результаті цього проходить втомне руйнування їх основних несучих елементів. Таке втомне руйнування відноситься до найбільш поширених видів сповільненого руйнування. На початковій стадії процесу руйнування майже завжди спостерігається поступове виникнення і накопичення мікро дефектів. Якщо розміри цих дефектів співставимі з характерними розмірами мікроструктури (наприклад, величиною зерна), то така стадія називається стадією зародження тріщини або інкубаційним періодом. Закінчується він локалізацією процесу розсіяного руйнування з виникненням ростучої макротріщини. Часто основну частину часу довговічності матеріалу займає не зародження мікротріщин, а наступний період повільного квазістатичного зростання тріщини від початкового до критичного розміру. Кінцевою стадією динамічного росту тріщини є повне руйнування, часто – це катастрофа, якої і потрібно уникнути.

Діаграма втоми. Основним базисним документом, що дає уяву про опір втомному руйнуванню досліджуваного матеріалу у виробі чи у зразку, служить діаграма втоми (чи крива Велера) [1]. Її будують на основі використання 8 – 10 і більше зразків, досліджених при різних напруженнях σ з дотриманням ідентичності частоти, форми циклу і коефіцієнта асиметрії циклу R . Діаграма втоми носить зазвичай специфічний асимптотичний характер з виходом її нижньої частини на рівень напружень σ_R , при якому деталь чи зразок не руйнується (рис.1).

Вказане максимальне напруження σ_R , що відповідає заданій базі випробувань, називають межею витривалості. При симетричному циклі навантаження межу витривалості звичайно позначають σ_{-1} (індекс від значення коефіцієнта асиметрії $R = -1$). Діаграми втоми найчастіше будують в координатах $\sigma - \lg N$ і значно частіше в координатах $\sigma - N$ чи $\lg \sigma - \lg N$.



Рис. 1 - Стадії процесу втоми: I – зміцнення, розміцнення; II – зародження тріщини; III – поширення тріщини

Внаслідок циклічного навантаження у металі накопичується пошкодженість, яка проявляється по-різному у різних діапазонах прикладених напружень, що відповідають області мало- і багато циклової втоми. Процес втоми ділиться на три стадії [1-3]:

1. протікання у металі процесів зміцнення, а також розміцнення, які можуть мати різні закономірності залежно від природи металу та умов навантаження;
2. утворення тріщин у невеликих при поверхневих об'ємах металу, що супроводжується виникненням концентраторів напружень в цих об'ємах;
3. поширення тріщин (тріщини), що закінчується повним руйнуванням зразка чи виробу.

Схематичне представлення інтервалів довговічності, що відповідають вказаним стадіям, подано на рис. 1. У зв'язку з тим, що механіка руйнування вивчає переважно третю стадію втоми, у літературі [4] також зустрічається поділ процесу втоми на дві стадії: зародження тріщини (їй відповідає кількість циклів N_s і поширення її N_d). Відносна тривалість стадії поширення тріщини N_d у повній довговічності виробу N_p може змінюватись в широких межах (від 5 до 95%) і залежить від природи і структури матеріалу, відносного рівня прикладених навантажень, характеру напруженого стану (в тому числі вихідної концентрації напружень), активності робочого середовища та інших факторів. Оскільки зародження втомної тріщини визначається накопиченням мікро пластичної деформації, стадія утворення тріщини у більшості металів і сплавів із середньою і високою пластичністю

контролюється рівнем виникаючих при навантаженні дотичних напружень.

Таким чином, інтенсивне утворення втомної мікро тріщини спостерігається в глибині площин ковзання у напрямі максимальних дотичних напружень. У свою чергу, поширення утвореної магістральної тріщини пов'язане з переорієнтацією площини декогозії у площину максимальних нормальних напружень. На цій властивості базується один з методів розділення стадії ініціювання і поширення втомної тріщини.

Мікротріщини втоми, що спочатку виникли у смугах ковзання, продовжують свій розвиток у межах цих смуг у напрямку дії максимальних дотичних напружень. При одновісному навантаженні розтягом-стиском цей напрям відповідає площинам, розміщеним під кутом 45° до бокової поверхні зразка. Співпадіння площини поширення тріщини з напрямом дії максимальних дотичних напружень пояснюється тим, що в кожному окремому зерні полікристалу є достатня кількість потенціальних систем активного ковзання, що дозволяє задіяти площини, які найсприятливіше орієнтовані для реалізації зсуву. У зв'язку з таким характером розвитку пошкоджуваності початковий ріст тріщин можна назвати кристалографічним.

На поверхні гладкого зразка при циклічному навантаженні виникає значна кількість мікротріщин, однак більшість із них припиняє свій ріст, досягнувши довжини, що не перевищує десяти мікрометрів. Деякі мікро тріщини продовжують свій розвиток, об'єднуючись між собою, а також за рахунок поглиблення у площині дії початкових екструзій та інтрузій. Із ростом довжини відбувається переорієнтація зсувової тріщини у площину дії максимальних напружень розтягу. Таким чином, закінчується I стадія кристалографічного поширення тріщини, яка звичайно не перевищує десятих частин міліметра. Стадія субкритичного поширення тріщини (II стадія), що протікає за схемою нормального відриву, закінчується при досягненні тріщиною критичної довжини, що відповідає спонтанному короткочасному руйнуванню (долому) всього зразка. Зсувова тріщина, що розвивається на I стадії втоми, називається тріщиною Форсайта [2], по імені дослідника, котрий систематично вивчав початкову стадію втомної пошкоджуваності. Перехід від I до II стадії руйнування пов'язаний зі зміною траєкторії тріщини, його оцінка металографічними чи іншими доступними способами є утруднена, у зв'язку із цим розподілити періоди зародження і поширення тріщини при втомі металів дуже складно. На даний час це принципове питання не вирішене.

Основні етапи корозійно-втомного руйнування конструкцій. Корозійне середовище як додатковий фактор при втомі металів звичайно значно зменшує опір появи початкових тріщин. Одні автори скорочення етапу зародження тріщини пояснюють електрохімічною гетерогенністю матеріалу в активних в площинах ковзання, що призводить до утворення піттингів (останні самі по собі можуть бути як вихідними дефектами, так і додатковими концентраторами напружень). Інші автори пов'язують пришвидшення зародження тріщин з розміщенням захисних плівок на поверхні металу. Такі плівки утворюються у зв'язку із витримкою зразка в корозійному середовищі, однак вони піддаються руйнуванню у лініях інтенсивного ковзання. Виникає гальванопара з малою анодною ділянкою в зоні руйнування плівки і значною катодною, якою служить суцільний оксидний шар на поверхні зразка. Таким чином, пришвидшується локальне розчинення металу в смугах ковзання, період зародження N_3 суттєво скорочується. Основні несучі елементи металоконструкцій сільськогосподарських машин є в більшості випадків тонкостінні стержневі елементи і в основному піддані дії згину змінними в часі навантаженнями. Ресурс металоконструкції визначається ресурсом найслабшої ланки, тобто одним із найбільш навантажених її елементів. Згідно сучасної теорії втоми (механіки сповільненого руйнування елементів конструкцій при змінних навантаженнях [1, 4-10]) ресурс елемента конструкції N_p при змінних навантаженнях визначається так

$$N_p = N_3 + N_d. \quad (1)$$

де N_3 - період зародження втомної тріщини; N_d - період її докритичного росту.

Це означає, що втомне руйнування елемента конструкції проходить дві стадії: зародження втомної тріщини і її до критичний ріст. Тому з точки зору стадійності втомного руйнування існує три способи розрахунку ресурсу елемента конструкції:

1) ресурс елемента конструкції N_p визначається в основному періодом зародження тріщини N_3 і тільки незначна доля його займає її ріст, при цьому

$$N_p \approx N_3;$$

2) в елементі конструкції є невелика тріщина і його ресурс визначається в основному періодом її докритичного росту, тобто

$$N_p \approx N_d;$$

3) період зародження тріщини N_3 і період її докритичного росту N_d займають спів мірні долі довговічності елемента конструкції і тому його ресурс N_p буде визначатися співвідношенням (1).

Визначення періоду зародження тріщини. Відносне значення періоду N_3 зародження тріщини до повної довговічності N_p елемента конструкції може змінюватися в широких межах (від 5 до 95%) в залежності від природи і структури матеріалу, відносно рівня прикладених напружень, характеру напруженого стану, активності зовнішніх середовищ і інших факторів [1, 4, 5, 7].

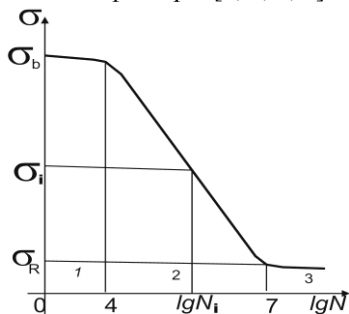


Рис. 2 - Діаграма втоми матеріалів (діаграма Велера) : 1- ділянка мало циклової втоми; 2- ділянка обмеженої довговічності; 3 – ділянка за границею втоми

Для бездефектних елементів конструкцій при їх одновісному розтязі або згині основним базовим документом для визначення періоду зародження втомної тріщини служить діаграма втоми матеріалів або крива Велера (Рис. 2) [1, 4, 5, 7]. Діаграму втоми матеріалів, як правило [4, 7, 8, 10], будують із заданою для досліджуваного елемента конструкції частотою, середовищем, формою циклу і коефіцієнтом його асиметрії R в координатах $\sigma \sim \lg N$, де величина напружень σ змінюється в межах $\sigma_b \geq \sigma \geq \sigma_R$, тут σ_b - границя міцності матеріалу; σ_R - максимальне значення напружень (границя втоми матеріалу), при якому досліджуваний зразок витримає задане число навантажень, що називається базою випробувань. Величина σ_R визначається при заданій асиметрії циклу R . Якщо цикл навантаження симетричний ($R = -1$), то границя втоми позначається σ_{-1} . Для багатьох матеріалів база випробувань приймається 10^7 циклів.

Діаграму втомни, що зображена на рис. 2, можна розділити на три частини: 1 – область мало циклової втомни, де кількість циклів навантаження змінюється в межах $0 \leq N \leq 10^4$; 2 – область обмеженої довговічності, де кількість циклів навантаження змінюється в межах $10^4 \leq N \leq 10^7$; 3 – область за границею втомни $N \geq 10^7$.

Як впливає з аналізу експлуатаційних параметрів роботи елементів металоконструкцій сільськогосподарських машин [11], навантаження більшості з них знаходиться в межах обмеженої довговічності. Тому розрахунок періоду зародження тріщини для таких елементів будемо провадити, виходячи із залежностей $\sigma \sim \lg N$ для області обмеженої довговічності. На основі результатів робіт [4, 7, 8, 10] можна зробити висновок, що ця залежність буде приблизно лінійна і аналітично її можна представити так

$$\frac{\sigma_0}{\sigma} = \lg \frac{N}{N_0}. \quad (2)$$

Тут σ_0, N_0 - характеристики втомного руйнування матеріалів в межах області обмеженої довговічності ($10^4 \leq N \leq 10^7$), які визначаються на основі експериментальних досліджень. Тоді період зародження втомної тріщини N_3 в елементі конструкції, в якому зовнішнє навантаження викликає амплітуду змінних в часі напружень σ_i , буде визначатися на основі (2) (див. також рис. 2) наступним чином

$$N_3 = N_0 10^{\sigma^{-1}\sigma_0}. \quad (3)$$

Таким чином, для визначення періоду $N = N_3$ зародження корозійної макротріщини в елементі конструкції необхідно з експерименту визначити характеристики σ_0, N_0 області обмеженої довговічності діаграми Веллера. Методика таких експериментальних досліджень в умовах дії корозійно агресивних середовищ і знайдені з її допомогою відповідні значення характеристик для матеріалів металоконструкцій рам розкидачів мінеральних добрив представлені в роботі [12].

Визначення періоду докритичного росту корозійно втомної тріщини. Розглянемо тонкостінний балковий елемент конструкції, в якому зародилася макротріщина початкової довжини l_0 і який підданий зовнішнім циклічним навантаженням, що викликають напружено-деформований стан симетричний відносно площини розміщення тріщини. Вважається також, що в тріщину попадає

корозійно агресивне середовище, яке разом з циклічними навантаженнями викликає поширення корозійно-втомної тріщини. Задача полягає у визначенні періоду докритичного росту корозійно-втомної тріщини $N = N_D$, що зародилася в такому елементі конструкції. Для розв'язку такої задачі скористаємося теорією, яка розвинута в роботі [13]. При цьому вважається, як це показано в [12] експериментальними дослідженнями на сталях рам розкидачів добрив, що кінетична діаграма поширення корозійно втомної тріщини має ділянку плато при нижньому пороговому значенні. Тоді визначення періоду $N = N_D$ докритичного росту корозійно втомної тріщини зведемо до наступної математичної задачі [13]

$$V = V_c, K_{sc} < K_{I_{max}} \leq K_{li}; \quad (4)$$

$$\frac{dl}{dN} = \beta_1(1-R)^4 (K_{I_{max}}^4 - K_{th_{max}}^4)(K_{fc}^2 - K_{I_{max}}^2)^{-1}, K_{li} < K_{I_{max}} < K_{fc},$$

із заданими початковою і кінцевою умовами

$$N = 0, l(0) = l_0; N = N_D, l(N_D) = l_*, K_I(l_*) = K_{fc}. \quad (5)$$

де $K_{I_{max}}$ - максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень за цикл; $K_{fc}, K_{th_{max}}$ - його відповідно верхнє і нижнє порогові значення на кінетичних діаграмах поширення втомної тріщини; $R = K_{I_{min}} / K_{I_{max}}$ асиметрія циклу навантаження; V_c - постійне значення швидкості припорогового поширення корозійно втомної тріщини до перетину з діаграмою втомного поширення тріщини при певному значенні коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{I_{max}} = K_{li}$ [13]; β_1 - характеристика корозійно втомного руйнування матеріалу, яка знаходиться експериментально.

Таким чином, якщо експериментально знайдені характеристики $V_c, \beta_1, K_{fc}, K_{th_{max}}, K_{li}$, то період $N = N_D$ докритичного росту корозійно-втомної тріщини в досліджуваному елементі знаходиться при розв'язуванні математичної задачі (4), (5).

Мета дослідження - створення і застосування методики до розрахунку довговічності типових елементів металоконструкцій рам розкидачів мінеральних і органічних добрив.

Результати досліджень. Визначення довговічності профіля за дії циклічного навантаження і корозійно агресивного середовища. В металоконструкціях рам сільськогосподарських машин часто використовуються стержневі елементи, поперечний переріз яких є профіль. Максимальні розтягуючі напруження в поперечному перерізі

такого елемента при його згині можна обчислити на основі відомої формули згину балок [14]

$$\sigma = \frac{M}{W_x}, \quad (6)$$

де M - величина згинаючого моменту, W_x - момент опору поперечного перерізу при згині.

Тому такий елемент будемо розглядати як балку, поперечний переріз якої профіль і яка згинається циклічно моментом M (рис. 3). Геометричні параметри січення балки зображені на рис. 3. Задача полягає у визначенні довговічності даної балки, тобто $N = N_p$.

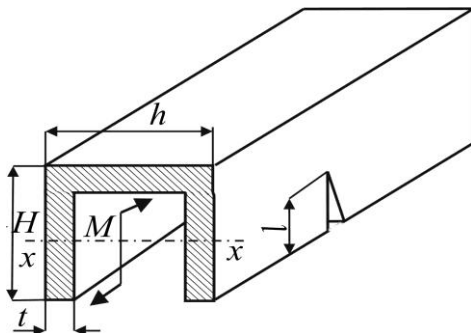


Рис. 3 - Схема циклічного згинання тонкостінного профіля

Розв'язок задачі здійснюємо на основі формули (1), тобто представляємо у вигляді суми періодів зародження втомної тріщини N_3 і її докритичного росту N_d .

Величину N_3 знаходимо на основі формул (3) і (6). В результаті цього отримаємо

$$N_3 = N_0 10^{M^{-1} W_x \sigma_0}. \quad (7)$$

Тут момент W_x опору поперечного перерізу балки при згині визначається на основі результатів роботи [14] так

$$\begin{cases} W_x = \frac{J_x}{y_1^1}, y_1^1 = \frac{ht + 2H^2 - 2t^2}{2h + 4H - 4t}, y_1^1 = H - y_1, \\ J_x = 0,08[ht^3 + 2t(H-t)^3] + ht(y_1 - 0,5t)^2 + 2t(H-t)[0,5(H-t) + t - y_1]. \end{cases} \quad (8)$$

Знайдемо тепер період докритичного росту втомної тріщини, яка зародилася. Скористаємося для цього математичною моделлю (4), (5). В результаті цього, проінтегрувавши диференціальне рівняння (4)

за початкових і кінцевих умов (5), для визначення періоду докритичного росту втомної тріщини N_D отримаємо формулу

$$N_D = \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{1}{\beta_1 (1-R)^4} \int_{l_i}^{l_0} \frac{K_{fc}^2 - K_{lmax}^2}{K_{lmax}^4 - K_{th}^4} dl. \quad (9)$$

Тут довжина тріщини l_i визначається із рівняння

$$K_I(l_i) = K_{fi}. \quad (10)$$

Отже, задача звелася до визначення коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{I_{max}}$ для силової схеми навантаження згину балки з тріщиною, що зображена на рис. 3. Цю нову задачу з визначення $K_{I_{max}}$ розв'язуємо з допомогою наступних міркувань. Для багатьох випадків елементів металоконструкцій великі розміри тріщин не допускаються, навіть коли вони не є критичними. Тоді наближене визначення коефіцієнта інтенсивності напружень K_I може бути більш спрощене і зведене до наступного. Нехай тонкостінний елемент металоконструкції з поверхневою тріщиною довжини l_0 навантажений так, що напружено-деформований стан в ньому симетричний відносно лінії розміщення тріщини. Одним із граничних станів для даного випадку при визначенні величини K_I буде півплощина з поверхневою тріщиною [5, 8]

$$K_I = 1,12\sigma\sqrt{\pi l_0}. \quad (11)$$

Враховуючи це, представимо КІН для тріщини у вигляді

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi l_0} (1,12 + F(\varepsilon)), \quad (12)$$

де $\varepsilon = l_0 / D$; D - периметр поперечного перерізу розглядуваного елемента конструкції по лінії розміщення тріщини; σ - аналогічно попередньому, максимальне значення номінального напруження у місці розміщення тріщини; $F(\varepsilon)$ - деяка безрозмірна функція, причому $F(\varepsilon) \rightarrow 0$ при $\varepsilon \rightarrow 0$. В кожному конкретному випадку функція $F(\varepsilon)$ визначається по різному в залежності від специфіки елемента конструкції і наявній в ньому тріщині.

Для визначення K_I в профілі з боковою тріщиною скористаємося інтерполяційною формулою (12), вважаючи, що K_I для нашого випадку буде приблизно такий, як і у випадку згину моментом M смуги з поверхневою тріщиною довжини l_0 такої ж товщини t і моментом опору поперечного перерізу W_x . Представляючи функцію

$F(\varepsilon)$ поліномом по степеням ε ($\varepsilon = l_0 / H$) і прирівнюючи (12) до відповідного розв'язку [15, 16] чистого згину смуги з поверхневою тріщиною l_0 при $\varepsilon \approx 0,5$, знайдемо наступну формулу для наближеного визначення величини K_I ,

$$K_I = \sigma \sqrt{H \pi \varepsilon} [1,12 + F(\varepsilon)], \quad (13)$$

де $\sigma = \frac{M}{W_x}$, $F(\varepsilon) = 0,52\sqrt{\varepsilon} (1 + 6,42\varepsilon^2 - 6,53\varepsilon^3 + 5,86\varepsilon^4)$.

Підставляючи (13) в (9), для визначення періоду докритичного росту тріщини N_d отримаємо наступну формулу

$$N_d = \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{K_{fC}^2 H}{\beta_1 K_{th}^4 (1-R)^4} \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad (14)$$

де $\varepsilon_* = \frac{l_*}{h}$, $\varepsilon_i = \frac{l_i}{h}$, $f_1(\varepsilon) = \frac{\pi \varepsilon \sigma^2 H}{K_{fC}^2} [1,12 + F(\varepsilon)]^2$,

$$f_2(\varepsilon) = \frac{\pi^2 \varepsilon^2 \sigma^4 H^2}{K_{th}^4} [1,12 + F(\varepsilon)]^4.$$

Отримані таким чином співвідношення (1), (7) і (14) дають можливість представити ресурс N_p досліджуваної балки в такому вигляді

$$N_p = N_0 10^{M^{-1} W_x \sigma_0} + \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{K_{fC}^2 H}{\beta_1 K_{th}^4 (1-R)^4} \int_{\varepsilon_i}^{0,5} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon. \quad (15)$$

Для того, щоб скористатися формулою (15), необхідно знайти експериментально характеристики матеріалу $N_0, \sigma_0, V_c, K_{th}, K_{fC}, K_{th}, \beta_1$, а також геометричні параметри балки і її навантаження. Окрім цього у формулу (15) входить величина l_0 . Ця величина є досить мала порядку розміру структурного параметру матеріалу [17]. Але для практичного розрахунку, щоб зароджену тріщину вважати макроскопічною і правомірно користуватися формулою (15) можна вибирати величину l_0 не менше двох міліметрів. В такому випадку розрахована величина N_p буде дещо занижена, тобто отримана похибка піде в запас довговічності балки.

Приклад. Розглянемо приклад розрахунку довговічності $N = N_p$ елемента рамних конструкцій розкидачів добрив, тонкостінного коритного профіля із сталі 3 січенням $180 \times 80 \times 5$, який згинається циклічно моментом з амплітудою M за схемою,

представленою на рис. 3. При цьому розглядається два випадки, коли навантаження профіля проходить на повітрі і при дії розчину нітрофоски. В даному випадку розрахунок будемо проводити згідно формули (15). Механічні та втомні характеристики сталі 3, які входять в формулу (15), будемо визначати згідно даних [12]. В результаті цього дані характеристики запишуться так :

при випробуваннях на повітрі

$$N_0 = 1,51 \cdot 10^8 \text{ цикли}, \quad \beta_1 = 4,51 \cdot 10^{-9} (\text{цикл})^{-1} (\text{МПа})^{-2}, \quad K_{fc} = 102 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}},$$

$$\sigma_0 = 120,18 \text{ МПа}, \quad K_{th} = 12,81 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}, \quad R = 0,1;$$

при випробуваннях в розчині нітрофоски

$$\sigma_0 = 95,63 \text{ МПа}, \quad N_0 = 2,34 \cdot 10^8 \text{ цикл}, \quad K_{ti} = 42 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}, \quad V_C = 1,58 \cdot 10^{-6} \text{ м/цикл}.$$

Ці характеристики отримані із аналізу кінетичних діаграм втоми з роботи автора [12] і зображені на рис. 4,5.

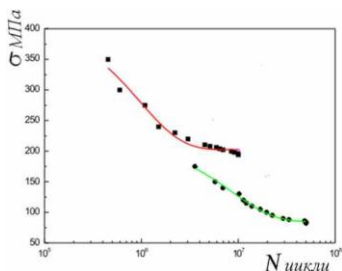


Рис. 4 - Діаграми втоми (криві Веллера) для сталі 3 на повітрі – квадратики і в розчині нітрофоски- кружечки

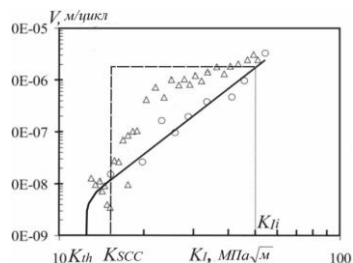


Рис. 5 - Кінетичні діаграми поширення втомних тріщин в сталі 3 на повітрі – кружечки і за дії розчину нітрофоски – трикутники

На основі приведених вище даних формула (15) набуде конкретного вигляду для кожного випадку навантаження профіля на повітрі і в розчині нітрофоски :

на повітрі

$$N_p^{(II)} = 3,31 \cdot 10^{8+111,7/\sigma} + 10^7 \int_{0,025}^{0,28} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad (16)$$

в розчині нітрофоски

$$N_p^{(K)} = 2,34 \cdot 10^{8+95,63/\sigma} + 6,33 \cdot 10^5 (634,7\sigma^{-2} - 0,002) + 10^7 \int_{5867,8\sigma^{-2}}^{0,28} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon. \quad (17)$$

При цьому, величина l_i , яка входить в формули (14), (15), знайдена із рівнянь

$$K_I(\varepsilon_i) = K_{II}, l_i = H\varepsilon_i$$

і визначається наближено для даного випадку так $l_i \approx 634,7\sigma^{-2}$.

На основі формул (16) і (17) на рис. 6 побудовані графічні залежності довговічності $N = N_p$ профіля від максимального значення амплітуди σ напружень в його січченні $N_p^{(I)}$ - при випробуванні на повітрі і $N_p^{(K)}$ - при випробуванні в розчині нітрофоски.

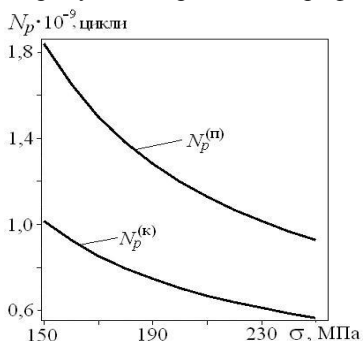


Рис. 6 - Залежність довговічності $N = N_p$ профіля від напружень σ : крива $N_p^{(I)}$ - при випробуваннях на повітрі; крива $N_p^{(K)}$ - при випробуваннях в розчині нітрофоски

Висновки. Сформульовані основні положення методики визначення ресурсу балкових елементів металоконструкцій рам розкидачів добрив за умов їх експлуатації. Застосування даної методики в повному обсязі продемонстровано на прикладі циклічного згину тонкостінного профіля на повітрі і при дії розчину нітрофоски. Показано, що дія мінерального добрива значно зменшує ресурс профіля.

Література

1. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие. – Т.4. (Под общей ред. Панасюка В. В.) – Киев: Наук. думка, 1990. – 680с.
2. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 495с.
3. Романив О. Н., Деев Н. А., Сорокинский И. С. О некоторых особенностях механизма зарождения усталостных трещин в

высокопрочных низкоотпущенных сталях // Физ.-хим. механика материалов. – 1975. – №1. – С. 41–47.

4. Ярема С. Я. Стадийность усталостного разрушения и ее следствия // Физ.-хим. механика материалов. – 1973. – №6. – С. 66–72.

5. Панасюк В. В., Андрейкив О. Є., Партон В. З. Основы механики разрушения.– К.: Наукова думка, 1988.– 488 с.

6. Романив О. Н., Ярема С. Я., Никифорчин Г. Н., Махутов Н. А., Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов.– К.: Наукова думка, 1990.–680 с.

7. Трощенко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при малоцикловом нагружении.– К.: Наукова думка, 1981.–343 с.

8. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения.– М.: Наука, 1974.–640 с.

9. Schijve J.. "Fatigue of materials and structures in the 20th century: state-of-the-art," Materials Science. - 2003. – **39**, №. 3. P 7-27 .

10. Андрейкив А.Е., Дарчук А.И. Усталостное разрушение и долговечность конструкций.- К.: Наук. Думка, 1992.- 184с.

11. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин на прочность и надежность. Под. ред.П.М. Волкова, Тененбаума. М : Машиностроение, 1977. – 310 с.

12. Барна Р.А., Попович П.В. Втомне руйнування вуглецевих сталей у середовищі мінеральних та органічних добрив // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 16–23.

13. Попович П., Хомик Н., Добровольська Л. Залишковий ресурс тонкостінних конструктивних елементів несучих систем сільськогосподарських машин при дії агресивних середовищ // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – 2014. – вип. 146. с. 142-150.

14. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наукова думка, 1988. – 734 с.

15. Stallybrass M.P. A semi-infinite crack perpendicular to the surface of an elastic half-plane // Int. J. Eng. Sci. – 1971.– **9**, № 1. – P. 133–150.

16. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В.В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988. – Т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами/ М.П. Саврук. – 620 с.

17. Панасюк В.В., Остап О.П., Костык Е.М. Зарождение усталостных трещин у концентратора напряжений // Физ.-хим. механ. матер. – 1985. - № 6. – С. 3-10.

Рецензент д.т.н., проф. Т.І. Рибак