

О.Ю. ЄРЬОМЕНКО, канд. техн. наук, доц., С.О. ВОЛКОВ, д-р філос. наук, ст. викл.
Криворізький національний університет
О.О. ДЕМЧЕНКО, фахівець, С.О. ДЕМЧЕНКО, нач. тех. відділу
ПП «Стіл Сервіс»

ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ МЕТАЛЕВОЇ ПІДКРАНОВОЇ БАЛКИ НА СТАДІЇ ЗРОСТАННЯ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ

Мета. Проаналізувати існуючі експериментальні дані та методи розрахунку підкранових балок з втомними тріщинами. На основі аналізу запропонувати рекомендації щодо оцінки залишкового ресурсу таких конструкцій на стадії розвитку втомної тріщини з врахуванням особливостей умов експлуатації та конструктивних особливостей.

Методи дослідження. У роботі використано низку методів дослідження, включаючи аналіз і синтез літературних джерел, формулювання концепцій та їх перевірку за допомогою розрахунків, відповідно до цілей дослідження, порівняння результатів з фактичними даними стану конструкцій.

Наукова новизна. Обґрунтування положень з розробки методики розрахунку залишкового ресурсу металевих підкранових балок на стадії зростання втомних тріщин з урахуванням рівня напружень, геометричних характеристик, довжини і ширини розкриття тріщини, властивостей сталі.

Практична значимість. Наявність тріщин в елементах конструкції металевих підкранових балок призводить до неможливості використання останніх без проведення відновлювальних робіт та знижує експлуатаційну безпеку будівлі загалом. Ремонт чи заміна підкранових балок пов'язаний з зупинкою технологічного процесу та значними економічними втратами. Наведена методика оцінки залишкового ресурсу підкранових балок дозволяє виконати експертизу та оцінку їх технічного стану з можливістю обґрунтування періоду працездатного стану конструкцій до виконання ремонту або заміни. Точне визначення залишкового ресурсу значно зменшить та оптимізує витрати від зупинення виробництва. Рекомендації з розрахунку можуть бути використані для розробки оптимальних рішень під час ремонту або заміни конструкцій.

Результати. Наведено статистику пошкоджень, які виникають в конструкції металевих підкранових балок та аналіз типового розвитку втомних тріщин. Виконано огляд існуючих методик розрахунку конструкцій на втомну довговічність. З'ясовано, що визначення залишкового ресурсу умовно зводиться до визначення періоду експлуатації рівному періоду зростання тріщини до довжини, що не перевищує $1/4$ довжини відсіку. Порівняльний аналіз між швидкістю зростання втомної тріщини, визначеної розрахунком з фактичною швидкістю зростання втомних тріщин в експлуатованих конструкціях вказує на прийнятну точність. Розбіжність результатів знаходиться в межах 14%.

Ключові слова: втомна тріщина, підкранова балка, залишковий ресурс, період зростання.

doi: 10.31721/2306-5451-2024-1-58-148-153

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. В процесі експлуатації металевих підкранових балок, в зонах, схильних до найбільших циклічних впливів, утворюються втомні тріщини. Практика обстежень показує, що втомні тріщини, як правило, виявляють значно пізніше часу їх утворення. У період між їх виникненням та виявленням конструкції експлуатуються у звичайному режимі.

При виявленні втомних тріщин встановлено, що тільки частина їх знаходиться в активній фазі росту, але при цьому наявність тріщин не супроводжується моментальним руйнуванням конструкції. Для виконання ремонту або заміни конструкції після виявлення втомних тріщин потрібно додатковий час, що витрачається на проектування, виготовлення, перенесення мереж та виконання монтажу. На виконання всіх необхідних операцій із заміни або ремонту конструкцій, враховуючи їх габарити може піти не один рік. Тривала зупинка технологічних операцій у цеху може призвести до зупинення функціонування підприємства в цілому та витрат, що набагато перевищують вартість будівельно-монтажних робіт на ремонт або заміну конструкцій. Для будь-якого підприємства цей варіант є неприйнятним і змушує йти на невиправданий ризик подальшої експлуатації або виконання ремонтів конструкцій із встановленням накладок, що тимчасово запобігає розвитку дефектів, але виключає можливість подальшого ремонту при повторному утворенні тріщин у зварювальних швах підсилення.

Вирішенням означеної проблеми є визначення залишкового ресурсу конструкції на стадії зростання втомної тріщини – це дозволить оптимізувати час зупинки технологічних операцій і визначити час працездатного стану для виконання всіх необхідних робіт, пов'язаних із заміною або ремонтом пошкодженої конструкції або її елемента.

Аналіз досліджень і публікацій. Накопичений досвід експлуатації металевих підкранових конструкцій дозволяє встановити, що основним типом їх ушкодження від діючого навантаження є втомні тріщини, які зазвичай виникають [1]–[5]:

- у верхній зоні стінки біля ребер жорсткості та опорних ребер (рис. 1);
- у верхніх поясних зварних швах (рис. 1);
- в опорних ребрах в зоні закінчення відливних планок;
- у відливних планках кріплення конструкцій;
- у зварних швах кріплення накладок підсилення стінок (в разі раніше проведених робіт з ремонту чи підсилення).

При цьому [1]–[5]:

- зростання кількості нових тріщин у стінках та поясних швах з часом збільшується;
- розміри тріщин, що розвиваються, в стінках і поясних швах також зростають швидше;

близько 70% ремонтних накладок (у верхній зоні стінок балок) мають тріщини в зварних швах кріплення накладок, які з'явилися вже в перший рік експлуатації. Тріщини у відливних планках виникають знову після заміни планок (близько 40% нових планок мають тріщини). В опорних ребрах, у місці закінчення відливних планок, тріщини після заварки з'являються знову по ремонтному шву або поруч із ним.

У процесі вивчення витривалості підкранових балок виявлено [5]–[7], що причинами появи втомних тріщин у стінках балок є позацентрово-прикладене змінне навантаження та дефекти виготовлення. Напруження стискання в стінці, з боку ексцентриситету, викликають пластичні деформації, водночас пояси працюють у пружній стадії.

При зміні напрямку дії навантаження, в результаті пружного відпору поясу, в стінці з'являються розтягуючі зусилля, які і є причиною утворення поздовжніх тріщин. Основна причина зниження витривалості балок – локальні напруження, що збільшують амплітуди коливань зсувів при малозмінних напруженнях від загального згину та зрізу в балці [5]–[7].

При вивченні впливу зварювальних напружень на втомний опір підкранових балок встановлено, що тріщини утворюються в зоні дефекту, який є концентратором напружень. Зробивши порівняння результатів випробувань зварних та прокатних двотаврових балок встановлено, що втомні пошкодження балок взаємопов'язані наявністю зварного шва і залежать від рівня навантаження балок.

Більшість методик розрахунку конструкцій на втомну довговічність засновані на лінійних та нелінійних гіпотезах накопичення втомних ушкоджень.

Лінійна гіпотеза полягає в тому, що пошкодження, викликане даним циклом напружень, не залежить від стану матеріалу в даний момент і від попередньої історії навантаження, а просто додається до пошкоджень, викликаних попередніми циклами. Передбачається, що руйнування при змінних амплітудах настане, коли сума відносних пошкоджень по всіх рівнях блоку навантаження досягне одиниці [8]

$$\sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (1)$$

$$N_i = \frac{\sigma_{-1}^m N_0}{\sigma_{-1ai}^m}, \quad (2)$$

де r - кількість рівнів амплітуд у блоці навантаження; n_i - число циклів повторення амплітуд i -го рівня σ_{-1ai}^m ; N_i - число циклів до появи втомного руйнування при дії змінного напруження з амплітудою a_i ; σ_{-1}^m - амплітуда i -го рівня в блоці навантаження; N_0 - число циклів навантаження, що відповідає перелому кривої втоми; σ_{-1ai}^m - межа витривалості елемента при знакозмінному симетричному циклі.

У нелінійних гіпотезах враховується вплив історії навантаження конструкції.

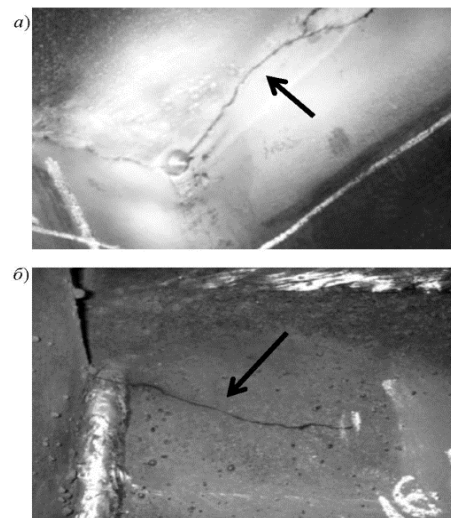


Рис. 1. Втомні тріщини підкранових балок: *а* - в місці приєднання верхнього поясу до стінки; *б* - в місці розташування ребра жорсткості

По відношенню до підкранових балок методика оцінки довговічності ґрунтується на лінійному накопиченні ушкоджень у верхній зоні стінки, які визначаються в залежності від локальних напружень і напружень загального згину балки [9]

$$\Pi_i = \frac{n_i}{N_i}, \quad (3)$$

$$N_i = (0.64 - \sqrt{0.28a_i - 0.2064}) / (0.14 \cdot 10^6), \quad (4)$$

Оцінку ресурсу циклічно навантажених підкранових балок в роботі [4] запропоновано визначати з урахуванням технологічних факторів і ранжування прольотів за характеристиками навантажень. Остання характеристика полягає в оцінці технологічних факторів, які визначають умови експлуатації конструкцій на розрахунковій технологічній ділянці прольоту. Запас по ресурсу та довговічності експлуатованих балок оцінюється за формулою

$$T = \frac{\delta_v - 2V_M}{2\delta_v} + \sqrt{\frac{2V_M - \delta_v}{2\delta_v} + \frac{2N_3}{\delta_v f_M}}, \text{ при } \delta_v \neq 0, \quad (5)$$

де δ_v - зростання обсягу виробництва у процесі експлуатації; V_M - обсяг продукції на розрахунковій ділянці прольоту:

$$N_3 = N_v - N, \quad (6)$$

$$N_v = N_G \cdot 10^{\frac{G_{\text{пр}} - G}{B}} = 10^7 \cdot 10^{\frac{480 - G}{785.31}}, \quad (7)$$

$$N = k \sum_{i=1}^{T_g} V_{M.i} \sum^M \left[\left(\frac{U_j}{Q_j} \right)_{\text{раб}} + \left(\frac{U_j}{Q_j} \omega_0 \right)_{\text{раб}} \right], \quad (8)$$

де N - накопичена блоками кількість циклів; σ - приведені напруження за IV-ою теорією міцності; f_m - частота підйомів вантажу; інші складові - параметри, що враховують умови експлуатації та особливості конструкції.

Визначення довговічності верхньої зони двотаврової підкранової балки за умови наявності у ній тріщини виконано у дослідницькій роботі [10]. Для прогнозування зростання максимальної довжини тріщини використовуються такі формули

$$\ell_{\max} = 1524 + 587.5 \left(\frac{T-14}{6} \right) + 321R + 121 \left(\frac{P-375}{75} \right) - 89(N-3) + 98.5 \left(\frac{e-10}{5} \right) - 111 \left(\frac{j-915}{555} \right) + 89 \left(\frac{U-15}{8} \right), \quad (9)$$

$$\ell_{\max} = 2\ell_g, \quad (10)$$

де T - час експлуатації підкранових балок; P , N , e , J , U - параметри, що враховують умови експлуатації та особливості конструкції; ℓ_g - гранично допустима напівдовжина втомної тріщини

$$\ell_g = \frac{\sqrt{\eta^2 + 4\xi K_{2-3} - \eta}}{4\xi^2}, \quad (11)$$

$$\xi = Q \sqrt{\left(\frac{1}{j_1 + j_2} - \frac{1}{j} \right) \frac{2}{t_w}}, \quad (12)$$

$$\eta = \frac{F}{3\lambda t_w} + \frac{10.3M_t}{t_w^2 (j_{\Sigma pf} + 365.7)}, \quad (13)$$

$$K_{2-3} = A \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{K_{th} K_{fc}}{A^2}} \right], \quad (14)$$

$$A = 0.5(K_{th} + K_{fc}) - (K_{fc} - K_{th}) - \frac{1.65}{3n}, \quad (15)$$

$$j_{\Sigma pf} = \frac{j_f G}{D}, \quad (16)$$

де F - розрахунковий зосереджений тиск від котка крану; M_t - місцевий крутний момент, прикладений до верхнього пояса балки; $j_{\Sigma pf}$ - відносний безрозмірний момент інерції верхнього пояса та рейки при вільному крученні.

Точність наведених та інших відомих методик розрахунку конструкцій на втомну довговічність залежить від точності визначення складових напружено-деформованого стану, діючих навантажень і технологічних впливів, властивостей сталей конструкцій. При цьому для методик визначення ресурсу зі втомними тріщинами важливим є виявлення причин появи втомних ушкоджень та характеру їх розвитку. Наведені методики розрахунку – емпіричні, а тому умови роботи конкретної конструкції можуть суттєво вплинути на результати розрахунку. В зв'язку з цим, для визначення параметрів залишкового ресурсів з урахуванням основних факторів бажано виконання тривимірної розрахункової схеми максимально наближеної за своїми характерис-

тиками до досліджуваної конструкції [11], [12]. Також потрібні дослідження зовнішніх факторів, що впливають на напружено-деформований стан.

Постановка задачі. Виконати аналіз існуючих експериментальних даних та методик розрахунку конструкцій підкранових балок з втомними тріщинами [2], [4], [6], [7]. На підставі аналізу запропонувати рекомендації щодо оцінки залишкового ресурсу таких конструкцій на стадії росту втомної тріщини.

Викладення матеріалу та результати. Розрахунок залишкового ресурсу підкранових балок на стадії зростання втомної тріщини проводиться після визначення кількісних характеристик втомної тріщини в зоні сполучення стінки з верхньою полицею і визначення напружено-деформованого стану в цій зоні.

Основними кількісними характеристиками тріщини є [4], [7]:

довжина тріщини;

розкриття тріщини;

розташування тріщини у відсіку прольоту підкранової балки.

Визначення напружено-деформованого стану в зоні сполучення стінки з верхньою полицею поясу підкранової балки за методиками будівельної механіки, є трудомістким процесом. В зв'язки з цим для розрахунку доцільно використовувати розрахункові комплекси в яких реалізовано визначення максимальних нормальних напружень за першою теорією міцності [2], [6]:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}. \quad (17)$$

Основною складовою максимальних нормальних напружень в зоні сполучення стінки з верхньою полкою, є вертикальне нормальне напруження від тиску колеса крану. Від точності визначення максимальних нормальних напружень в цій зоні залежить точність визначення залишкового ресурсу. Визначення напружень у програмно-розрахунковому комплексі дозволяє врахувати вплив місцевих концентрації напружень за довжиною відсіку та конструкції в цілому. Також такий розрахунок дозволить врахувати вплив на напружений стан недосконалостей монтажу конструкції, осадки фундаментів та температурних деформацій.

Період зростання тріщини до умовної довжини $\ell_{\text{гран}} = 0.25\ell_{\text{відс}}$, набуває наступного вигляду [4]

$$T_{\text{тр}} = \frac{\Delta N_{\text{тр}}}{\omega}, \quad (18)$$

$$T_{\text{тр}} = \frac{(\ell_{\text{гран}} - \ell_0)}{c(\Delta K_{\text{кін}}^{\text{еф}})^n \omega} = \frac{(0.25\ell_{\text{відс}} - \ell_0)}{c(\Delta K_{\text{кін}}^{\text{еф}})^n \omega}, \quad (19)$$

де ω - частота навантаження; $\Delta N_{\text{тр}}$ - кількість циклів навантаження, необхідних для розвитку тріщини до умовної граничної довжини $\ell_{\text{гран}}$.

Кількість циклів навантаження $\Delta N_{\text{тр}}$ визначається залежно від $K_{\text{кін}}^{\text{еф}}$.

Для зручності функція графіка визначення $K_{\text{кін}}^{\text{еф}}$ може бути представлена у вигляді аналітичної формули

$$\Delta K_{\text{кін}}^{\text{еф}} = 542.6 \cdot \ell^{-0.481}, \quad (20)$$

де $\ell = \ell_{\text{гран}} - \ell_0$ - відстань, яка дорівнює різниці між граничною довжиною тріщини та початковою довжиною тріщини.

Остаточно формула визначення $\Delta N_{\text{тр}}$ з урахуванням всіх необхідних корегуючих коефіцієнтів наступна [4]

$$\Delta N_{\text{тр}} = \frac{\ell_{\text{гран}} - \ell_0}{c(\Delta K_{\text{кін}}^{\text{еф}} K_{\sigma} K_t)^n}, \quad (21)$$

Параметри C , n визначають за довідниками механіки руйнування. Запропонований алгоритм розрахунку було співставлено з замірами періодичності зростання тріщин в конструкціях під час експлуатації [3], [4], [6], [7].

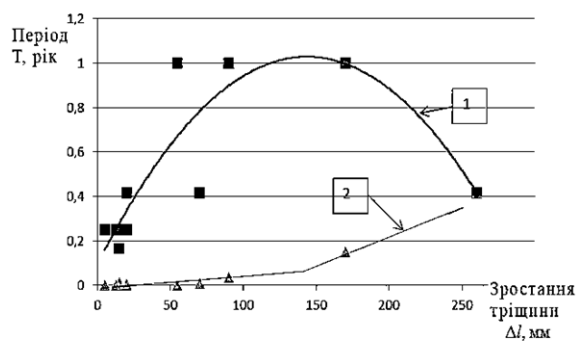


Рис. 2. Порівняльний графік фактичних (крива 1) та аналітичних значень (крива 2) періоду зростання втомної тріщини підкранової балки

Розбіжність результатів фактичних та аналітичних значень періоду зростання тріщин має збіжність після збільшення довжини тріщини (Δl) понад 200 мм (рис. 2). За графіком видно, що швидкість зростання тріщини до довжини 200 мм в аналітичному розрахунку вища, ніж фактично заміряна при моніторингу [4]. Ця властивість забезпечує запас у визначенні періоду експлуатації конструкції з втомною тріщиною аналітичним методом за формулою (19). Аналіз залежностей наведених на рис. 2 вказує на те, що похибка розрахунку не перевищує 14%.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Розглянуто методику, яка дозволяє визначити залишковий ресурс підкранової балки на стадії зростання втомної тріщини з урахуванням таких факторів, як [2], [4], [6], [7]: особливості конструктивного рішення; параметри тріщини та місця її розташування; властивостей сталі; рівня навантаження.

Визначення залишкового ресурсу умовно зводиться до визначення періоду експлуатації рівному періоду зростання тріщини до довжини, що не перевищує $1/4$ довжини відсіку. Визначення залишкового ресурсу безпечної експлуатації конструкцій після утворення втомної тріщини дозволяє визначити період працездатного стану, необхідного для підсилення або заміни конструкцій з мінімальною зупинкою технологічного процесу в цеху, де вони експлуатуються.

Список літератури

1. Романов, О.Н. Механика разрушения и прочность материалов: справ.пособие в 4 т. Т.4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О.Н. Романов, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин. – Киев: Наук думка, 1990. – 679 с.
2. Benjamin V. Fell, Ph.D., P.E. and Amit M. Kanvinde, Ph.D. Recent Fracture and Fatigue Research in Steel Structures// STRUCTURE magazine. 2009, no. 2, pp.14-17.
3. Шульга, С.Н. Трещиностойкость подкранового-подстропильных ферм. Предотвращение аварий зданий и сооружений: монография [Электронный ресурс] / С.Н. Шульга; под общ.ред. К.И. Ерёмкина. – 2014.
4. Ерёмин, К.И. Остаточный ресурс циклически нагруженных металлоконструкций с трещиноподобными дефектами: дис. д-ра техн. наук: 05.23.01/ Ерёмин Константин Иванович. 1996. – 418 с.
5. Pinto J. M. A., Pujol J. C. F., Cimini C. A. Probabilistic cumulative damage model to estimate fatigue life// Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2013, Vol. 37, pp. 85-94.
6. Нашёкин, М.В. Действительная работа стальных неразрезных циклически нагруженных балок: дис. канд. техн. наук: 05.23.01/ Нашёкин Максим Валерьевич, 2001. – 166 с.
7. Zhang J., HeX.D., SuoB., Du S.Y. Elastic-plastic finite element analysis of the effect of compressive loading on crack tip parameters and its impact on fatigue crack propagation rate. Engineering fracture mechanics, 2008. - Vol. 75. — №18.-P. 5217-5228.
8. Zhang J., HeX.D., Du S.Y. Analysis of the effect of compressive stresses on fatigue crack propagation rate // International journal of fatigue, 2007. — Vol. 29. -№9-11.-P. 1751-1756.
9. Борисенко, Ю.С. Об оценке долговечности при проектировании подкрановых конструкций / Ю.С. Борисенко, В.И. Дворецкий // Металлические конструкции и испытания сооружений., 1987. - С. 18-23.
10. Сердюк, В.В. Прогнозирование повреждаемости верхней зоны стенки эксплуатируемых сварных подкрановых балок интенсивной нагруженности: дис. канд. техн. наук: 05.23.01/ Сердюк Вячеслав Викторович., 2005. – 181 с.
11. Сабуров, В.Ф. Моделирование напряженно-деформированного состояния опорной зоны стальных подкрановых балок / В.Ф. Сабуров, И.А. Кадатский // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2008.–№ 2, Т. 04, С. 105
12. Трошенко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении / В.Т. Трошенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.

Рукопис подано до редакції 27.03.24