

doi.org/10.29295/2311-7257-2021-105-3-115-122
УДК 624.012

Яровий С.М.

*Харківський національний університет будівництва і архітектури
(вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна; e-mail: psp.nauka@gmail.com, orcid.org/0000-0003-2886-9456)*

Ярова О.В.

*Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського (ХАІ)
(вул. Чкалова, 17, Харків, 61070; Україна; e-mail: helga.yarovaya@gmail.com,
orcid.org/0000-0003-2886-9456)*

ДОВГОВІЧНОСТЬ МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ТРУБ ЗА КРИТЕРІЯМИ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ

За час усього життєвого циклу металеві димові та вентиляційні труби піддаються значним силовим і вітровим впливам, а також дії агресивних високотемпературних газів зовні і всередині труби. Розглянуто визначення довговічності металевих та вентиляційних труб за критеріями механіки руйнування на основі підходів фізики і механохімії металів. За характеристиками тріщиностійкості можливо здійснювати оцінювання залишкового ресурсу труб з виявленими під час діагностики пошкодженнями. Обробляючи результати малоциклових випробувань зразків, отримуємо основні відомості про властивості металу, про умови і характеристики випробувань, розміри тріщин, розміри пластичної зони до і в процесі випробувань. За результатами випробувань зразків будується діаграма циклічної тріщиностійкості і значення швидкості поширення тріщини. Діаграми циклічної тріщиностійкості апроксимуються і встановлюються параметри кривої малоциклової тріщиностійкості. Отримані формули визначення довговічності металевих труб при циклічному навантаженні шляхом інтегрування кінетичного рівняння малоциклової пошкоджуваності металу.

Ключові слова: димові та вентиляційні труби, довговічність, тріщиностійкість, циклічне навантаження, пошкодження металу.

На експлуатаційній довговічності металевих димових і вентиляційних труб за весь час життєвого циклу впливають значні силові і вітрові навантаження, а також дії агресивних високотемпературних газів зовні і всередині труби [1, 6-9, 13, 14].



Рис. 1. Загальні види вільно встановлених металевих димових труб.

Температурні впливи і циклічні навантаження можуть призводити до появи тріщин у металевих стовбурах димових труб. Корозійний вплив атмосфери і димових газів значно прискорюють швидкість розвитку тріщин. Розгляньмо розвиток тріщин при оцінці характеристик статичної і циклічної довговічності в металі димових труб [3-5].

При статичному навантаженні як кількісна міра опору розвитку тріщин приймається границя тріщиностійкості I_c за ГОСТ 25 506-85 і її відносне значення $\alpha_{тр}$. Для визначення

характеристик статичної тріщиностійкості випробовуються плоскі зразки, вирізані з труб, з відношенням поперечного перерізу $b/t > 1,0$. Поздовжня вісь зразка має бути перпендикулярній осі труб. За допомогою холодного згинання зразки випрямляються і на них фрезою наносять надрізи. Втомні тріщини у зразках створюються циклічним навантаженням. Дійсна довжина тріщини встановлюється за зломом зразка.

Механічні властивості металу визначаються за ГОСТ 1497-84 шляхом випробувань до руйнування гладких зразків, вирізаних з того самого металу, що і зразки з тріщинами. За результатами випробувань визначаємо тимчасовий опір $\sigma_u^{(t)}$, границю плинності $\sigma_y^{(t)}$, відносне повне звуження $\psi_k^{(t)}$, рівномірне звуження $\psi_e^{(t)}$ та ін. Криві деформаційного зміцнення при заданій температурі t для сталей, з яких виготовляються труби, можна апроксимувати функцією $\sigma_i = E\bar{\epsilon}_i^{m^t}$. Коефіцієнт деформаційного зміцнення m визначаємо за значенням рівномірного звуження $\psi_e^{(t)}$:

$$m^t = \ln[1/(1 - \psi_e)] . \quad (1)$$

Номинальне руйнівне напруження визначається за значенням максимального руйнівного навантаження P_c :

$$\sigma_c^{(t)} = \frac{P_c^{(t)}}{bt} . \quad (2)$$

Границя тріщиностійкості I_c при відносній глибині тріщини $\eta = 0,5$ і знайденому значенні σ_c дорівнюватиме:

$$I_c^{(0,5)} = 0,5\sigma_c\sqrt{h} . \quad (3)$$

Якщо відносна глибина тріщини η ($\eta = h/t$) значно відрізняється від величини 0,5, границя тріщиностійкості I_c коригується з використанням формули

$$I_c^{(t)} = 0,5\sigma_c\sqrt{h} \cdot \phi(\eta) , \quad (4)$$

де $\phi(\eta) = 1,99 - 0,4\eta + 18,7\eta^2 - 38,48\eta^3 + 53,85\eta^4$.

Середнє руйнівне напруження в нетто-перерізі зразка при $\eta = 0,5$ дорівнює $\sigma_{co} = 2\sigma_c$. Якщо відносна глибина тріщини η відрізняється від 0,5, то величина σ_{co} коригується за формулою

$$\sigma_{co}^{(t)} = \frac{\sigma_c^{(t)}}{1-\eta} . \quad (5)$$

Чутливість сталі до гострого концентратора напружень, тобто ступінь зниження руйнівних напружень через тріщину у зразку, визначається за формулою:

$$\alpha_{mp}^{(t)} = \frac{I_c}{I_{CH}} = \frac{\sigma_{CO}}{\sigma_B} . \quad (6)$$

Тоді формула значення границі тріщиностійкості матиме вигляд:

$$I_{c*}^{(0,5)} = \sigma_c(1 - \eta)\sqrt{h}\phi(\eta)\phi_{\sigma_B}^T . \quad (7)$$

При цьому напруження в нетто-перерізі досягають тимчасового опору металу ($\sigma_{CO}^{(t)} = \sigma_B^{(t)}$) і $\alpha_{TP}^{(t)} = 1,0$. Зі зменшенням значення α_{TP} чутливість металу до тріщиноподібних дефектів зростає і знижується опір розвитку тріщини.

Чутливість сталі до гострого концентратора α_{TP} і границя тріщинстійкості $I_c^{(t)}$ пов'язані залежністю:

$$I_c^{(t)} = \alpha_{TP}^{(t)} \sigma_B^{(t)} (1 - \eta) \sqrt{h} \phi(\eta) \phi_\sigma^T. \quad (8)$$

Криві статичної $I_c(\eta)$ і $\alpha_{TP}(\eta)$ визначаються за знайденими значеннями $I_c^{(0,5)}$ і $\alpha_{TP}^{(0,5)}$ за формулами:

$$I_c^{(t)} = 0,4 \cdot I_c^{(0,5)} = \frac{\alpha_{TP}}{\sigma_{TP}^{(0,5)}} (1 - \eta) \phi(\eta); \quad (9)$$

$$\alpha_{TP}^{(t)} = 1 - 4\eta(1 - \eta) \left(1 - \alpha_{TP}^{(0,5)}\right). \quad (10)$$

За знайденими значеннями I_c визначаємо критичні коефіцієнти інтенсивності пружно-пластичних напружень і деформацій за такими формулами:

$$K_{c\sigma}^* = \left(\frac{I_c^{(t)}}{\sigma_T^{(t)}}\right)^{\frac{2m^{(t)}}{1+m^{(t)}}}, \quad K_{c\varepsilon}^* = \left(\frac{I_c^{(t)}}{\sigma_T}\right)^{\frac{2m}{1+m}}, \quad (11)$$

при $\sigma_{co} > \sigma_m$;

$$K_{c\sigma}^* = \left(\frac{I_c^{(t)}}{\sigma_T^{(t)}}\right)^{\frac{2m^{(t)}}{1+m^{(t)}}} (\sigma_{co}/\sigma_T)^{\frac{1-m^{(t)}}{1+m^{(t)}}}, \quad (12)$$

$$K_{c\varepsilon}^* = \left(\frac{I_c}{\sigma_T}\right)^{\frac{2m}{1+m}} \cdot (\sigma_{co}/\sigma_T)^{\frac{1-m^{(t)}}{m^{(t)}(1+m^{(t)})}}. \quad (13)$$

Таким чином, за характеристиками тріщиностійкості можливо здійснювати оцінювання залишкового ресурсу труб з виявленими під час діагностики пошкодженнями.

Наведемо розрахунок залишкового ресурсу труби з виявленою тріщиною глибиною h_0 (рис. 2).

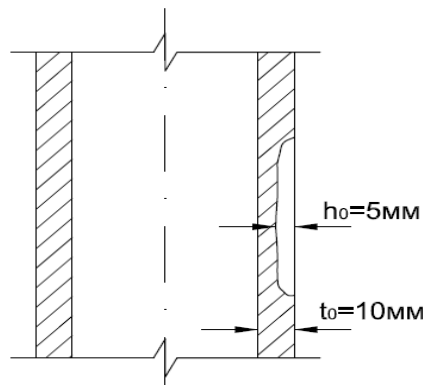


Рис. 2. Переріз стовбура металевої димової труби з тріщиною

Установлена швидкість атмосферної корозії складає $v_0 = 0,1$ мм/рік. Тріщина знаходиться в полі температурних напружень $\Delta T > 1$. У вершині тріщини $\alpha_\sigma \rightarrow \infty$, тоді $\sigma_i = \sigma_u^{(T)} = \psi_{\sigma_u}^T$.

Швидкість зростання пошкоджень у трубах і вежах зумовлена дією зовнішніх навантажень і повзучості, і може бути встановлена на основі рівнянь теорії пластичності і повзучості за такою аналітичною залежністю:

$$\left(\frac{dH}{dt}\right)_\varepsilon = 0,5 \cdot \delta_0 \cdot \exp(0,5 \cdot \varepsilon_i) \cdot A \cdot \varepsilon_i^m, \quad (14)$$

де δ_0 – початкова товщина стінок труб; A і m – константи, що визначають процеси деформаційного зміцнення і розміцнення металу від дії високих температур; ε_i – інтенсивність деформацій.

Швидкість зростання пошкоджень у результаті хімічної корозії представлена в лінійній залежності від інтенсивності напружень σ_i і деформації ε_i :

$$\left(\frac{dH}{dt}\right)_k = v_0[(1 + k_\sigma \cdot \sigma_i)(1 + k_\varepsilon \cdot \varepsilon_i)], \quad (15)$$

де v_0 – швидкість корозії ненапруженого металу; k_ε і k_σ – механохімічні параметри.

На основі рівнянь (14, 15) отримаємо формулу для розрахунку часу до утворення наскрізної тріщини:

$$\tau_p = \frac{(t_0 - h_0)}{v_0} / (1 + k_\sigma \cdot \psi_{\sigma\sigma}^T \cdot \sigma_u)(1 + k_\varepsilon \cdot \psi_\varepsilon^T), \quad (16)$$

де ψ_ε^T – рівномірне звуження зразка на розтяг.

Під час випробування металу встановлено, що $\sigma_B^T = 500$ МПа, а $\psi_{\sigma\sigma}^T = 0,2$. Підставляючи ці значення у формулу

$$\sigma_{\max} \leq \alpha R_v v_v, \quad (17)$$

де R_v – розрахунковий опір втомі металу; α – коефіцієнт, що враховує кількість циклів навантажень n , отримуємо $\tau_p = 12,5$ років.

Відповідно до інших навантажень довговічність τ_p може виявитися значно нижче. Але урахування механічного ефекту завищує значення τ_p у чотири рази.

Запропонуймо метод оцінювання швидкості корозійного руйнування і залишкового ресурсу елементів конструкцій на основі підходів фізики і механохімії металів.

Теоретична міцність металів приблизно дорівнює: $\sigma_{теор} = 0,1E$. Між тим, міцність у полікристалічному металі складає від $0,001E$ до $0,01E$, що нижче $\sigma_{теор}$ на один – два порядки. Відмінність пояснюється наявністю в полікристалічному металі дефектів – дислокацій, пор та ін. Ці дефекти виникають через різні особливості його кристалізації і фізичної природи. Полікристал металу являє собою з'єднані по-різному орієнтовані зерна фериту і перліту з різними розмірами і фізико-механічними властивостями. Границі зерен (цементит) мають особливі властивості, що відрізняються від властивостей зерен. Границі зерен і є джерелом утворення мікропластичних дефектів. Механічні характеристики металу σ_y , σ_u , ψ і δ відображають відповідні усереднені показники міцності і пластичності зразка, за якими судять про якість усього металу. При цьому необхідність вивчення складних процесів взаємодії різних зерен відпадає. Хімічна реакція на межі дотику металу і навколишнього середовища визначається станом поверхні, тобто напруженим станом в області мікропластичних дефектів. Наявність мікроскопічних дефектів і стан поверхні металу визначають структурну чутливість корозійно-механічних характеристик сталей.

При навантаженні металу необхідно розрізняти номінальні (середні по перерізу) і локальні (орієнтовані по-різному) напруження. Номінальні напруження визначають міцність зразка в цілому, локальні напруження – визначають інтенсивність корозійних процесів.

У локальних зонах на поверхні металу номінальні напруження σ_n і локальні напруження σ_l підсумовуються: $\sigma_{нл} = \sigma_n + \sigma_l$. В цілому по робочому перерізу елемента середні сумарні напруження дорівнюють номінальному напруженню: $(\sigma_{нл})_{ср} = \sigma_n$.

Значення номінальних напружень σ_n і локальних напружень σ_l взаємопов'язані внаслідок того, що зі зростанням навантаження ступінь спотворення кристалічної решітки збільшується зі збільшенням щільності дислокацій. Дослідження мікроструктури сталі показали, що гранична щільність дислокацій деформованої сталі на 5-6 порядків більше, ніж щільність дислокацій відпаленої сталі.

При оцінюванні залишкового ресурсу металеві димові труби в умовах розтріскування, пов'язаного з пластичною деформацією, за рівняннями другою складовою механохімічного процесу можна знехтувати. І тоді час до реалізації наскрізного отвору у трубі через корозійне розтріскування визначаємо за формулою:

$$\tau_p \approx \frac{t_0}{v_0} (1 + 0,1 \cdot E \cdot k_\sigma). \quad (18)$$

Як було відзначено раніше, у низці випадків металеві димові труби працюють в умовах малоциклового навантаження.

Коефіцієнтами і параметрами, що характеризують малоциклову тріщиностійкість, є [4]:
 - K_{th} – пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень (напружень циклу), при якому дефект у вигляді тріщини не розвивається протягом заданого числа циклів N_0 ($N_0 = 1 \div 5 \cdot 10^4$);

- K_{fc} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (значення, при якому відбувається доламування зразка);

- C_σ і n_σ – параметри кривої малоциклової тріщиностійкості М.А. Махутова [5]:

$$v = \frac{dH}{dN} = C_\omega (\Delta K_{1\varepsilon})^{n_\sigma}. \quad (19)$$

Для зразків з тріщинами коефіцієнт інтенсивності пружно-пластичних деформацій $K_{1\varepsilon}$ визначається за формулою:

- при $\sigma_i < \sigma_T$

$$K_{1\varepsilon} = (K_I / \sigma_T)^{2/(1+m)}; \quad (20)$$

при $\sigma_i > \sigma_T$

$$K_{1\varepsilon} = (K_I / \sigma_T)^{2/(1+m)} (\sigma_{co} / \sigma_T)^{(1-m)/(1+m)m}. \quad (21)$$

Характеристики малоциклової тріщиностійкості відповідно до нормативних документів [9] визначаються за результатами випробувань зразків з крайовою тріщиною в умовах м'якого циклічного розтягу по віднульовому пульсуючому циклу. Для труб з малим діаметром допускається визначення параметрів діаграми малоциклової тріщиностійкості за результатами випробувань напівкільцевих зразків з крайовими тріщинами. При цьому коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) визначається за формулою для визначення КІН при згині плоских зразків:

$$K_1 = \frac{\sigma_{MII}}{t\sqrt{b^3}} \sqrt{\eta} (1,93 - 3,07\eta + 14,53\eta^2 - 25,11\eta^3 + 25,8\eta^4), \quad (22)$$

де $M_{II} = P R$ (R – серединний радіус трубчастого перерізу).

Обробляючи результати малоциклових випробувань зразків, отримуємо основні відомості про властивості металу, про умови і характеристики випробувань, розміри тріщин, розміри пластичної зони до і в процесі випробувань. За результатами випробувань зразків будується діаграма циклічної тріщиностійкості в координатах $lgv - lg\Delta K_{1\varepsilon}$, і значення швидкості поширення тріщини і відповідні їм найбільші значення K_{lmax} . Діаграми циклічної тріщиностійкості апроксимуються і встановлюються параметри $C_\sigma^{(t)}$ і $n_\sigma^{(t)}$.

За формулами, наведеними нижче, визначаємо оцінку малоциклової довговічності:

$$n_\sigma^{(t)} = 1 + m^{(t)}, \quad (23)$$

$$C_\sigma^{(t)} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\varepsilon_{np}}{n_m} \right)^{n_\sigma}, \quad (24)$$

$$K_{\varepsilon np} = \ln \left[\frac{1}{(1-\psi_k)} \right] / \varepsilon_0, \quad (25)$$

де $n_m = \sigma_m / \sigma_0$, а $\varepsilon_{np} = \sigma_0 / E$.

Довговічність труб при циклічному навантаженні визначається інтегруванням кінетичного рівняння малоциклової пошкоджуваності (15):

$$N_{тр} = \int_{h_0}^{h_{кр}} \frac{dh}{f(K_{1\varepsilon})}. \quad (26)$$

Значення $f(K_{1\varepsilon})$ для кожної конкретної моделі встановлюється методом механіки розвитку тріщин.

Рівняння (26) можна представити в такому вигляді:

$$N_{тр} = N_0 \cdot K_n. \quad (27)$$

Значення τ_0 при $K_{1\varepsilon} = K_{1\varepsilon}^0 = const$ визначається за рівнянням

$$N_0 = \frac{h_{кр} - h_0}{C\sigma[K_{1\varepsilon}^0]^{n\sigma}}. \quad (28)$$

Параметр K_n враховує динаміку змінювання $K_{1\varepsilon}$ у процесі випробувань і залежить (для конкретного зразка) від коефіцієнта n_σ і відношення $\frac{h_0}{h_{кр}}$.

Значення коефіцієнта K_n для зразків, у яких КІН описується виразом типу $K_{1\varepsilon} = \sigma_0 \sqrt{Mh}$ (де M – постійна), визначається за формулами:

- при $n \neq 2$

$$K_n = \frac{2 \left[\left(\frac{h_{кр}}{h_0} \right)^{(n+2)} - 1 \right]}{(n+2) \left(\frac{h_{кр}}{h_0} - 1 \right)}; \quad (29)$$

- при $n = 2$

$$K_n = \frac{1}{\left(\frac{h_{кр}}{h_0} - 1 \right) \ln \left(\frac{h_{кр}}{h_0} \right)}; \quad (30)$$

- при $n=4$

$$K_n = h_0/h_{кр}. \quad (31)$$

Оцінка довговічності труби може бути визначена із формули

$$N = \frac{h_0}{h_{кр}} \cdot \tau_c \quad (32)$$

Наведемо розрахунок залишкового ресурсу металеві димові труби №12 компресорної станції «Задніпровська» магістрального газопроводу «Кременчук – Ананьїв – Чернівці – Богородчани», який введений в експлуатацію в 1988 р [11, 12, 15].

Довжина металевих димових труб – 22.00 м, зовнішній діаметр труб – 2210 мм, товщина стінки труби $t_0 = 10$ мм. Димова труба виготовлені зі сталі ВСтЗсп5 ($R_y = 235$ МПа). В стовбурі труби виявлено тріщиною глибиною $h_0 = 5$ мм.

Для розрахунку часу до утворення наскрізної тріщини використаємо формулу (14)

$$\tau_p = \frac{(t_0 - h_0)}{v_0} / (1 + k_\sigma \cdot \psi_{\sigma_\sigma}^T \cdot \sigma_u) (1 + k_\varepsilon \cdot \psi_\varepsilon^T), \quad (33)$$

де ψ_ε^T – рівномірне звуження зразка на розтяг.

Швидкість атмосферної корозії для середньо агресивного середовища складає $v_0 = 0,1$ мм/рік. Тріщина знаходиться в полі температурних напружень $\Delta T > 1$. У вершині тріщини $\alpha_\sigma \rightarrow \infty$, тоді $\sigma_i = \sigma_u^{(T)} = \psi_{\sigma_u}^T$.

Для визначення фактичного тимчасового опору металу з тіла труби були вирізані зразки металу. Під час випробування металу встановлено, що $\sigma_B^T = 350$ МПа, а $\psi_{\sigma\epsilon}^T = 0,2$. Підставляючи ці значення у формулу отримуємо $\tau_p = 6,5$ років.

На практиці же, якщо при обстеженні димової труби виявлена тріщини (категорія небезпеки дефекта «А») в стовбурі труби, трубу негайно потрібно підсилити.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. 482 с.
2. Гусенков А.П., Зацаринный В.В., Шнейдерович Р.М. Методика получения характеристик сопротивления малоциклового деформированию и разрушению при измерении поперечных деформаций. Заводская лаборатория. М.: 1971. №4. С. 464-468.
3. Добровольский В.И., Добровольский С.В. Оценка вязкости разрушения модельных элементов с учетом размера трещин. Заводская лаборатория, Диагностика материалов. М.: 2004. №10. С.47-52.
4. Зайнулин Р.С. Определение безопасного срока эксплуатации действующих трубопроводов в условиях коррозионного износа. Прикладная механика механохимического разрушения. 2004. №1. С. 10-15.
5. Махутов Н.А. Усталость металлов в широком диапазоне числа циклов. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. М.: 2004. №4. С.37-41.
6. Ведеников Г.С. и др. Металлические конструкции. М.: Стройиздат, 1998. 758 с.
7. Ханухов Х.М., Симонов И.И., Яровой С.Н. и др. Методика обследования технического состояния промышленных дымовых и вентиляционных труб. Стандарт саморегулирующей организации. СТО СРО ЭТМП 03-16. М.: 2016. 68 с.
8. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2018. Настанова щодо обстеження будівель та споруд для визначення оцінки їх технічного стану. К. ДП «УкрНДНЦ», 2017. 42 с.
9. ДБН В.2.6-163:2010. Стальные конструкции. Нормы проектирования, изготовления и монтажа. К.: Минрегионстрой Украины, 2011. 127с.
10. Шаповал Д.В. Долговечность стволос металлических дымовых труб с трещиноподобными дефектами. Дис. канд. тех наук. Уфа, 2004. 127 с.
11. Яровой С.М. Довговічність та залишковий ресурс металевих димових труб з урахуванням температурного та корозійного впливу. Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2017. Вип. 2(88). С.110-114.
12. Яровой С.М. Урахування залишкових зварювальних напружень при підсиленні димових

REFERENCES:

1. Gordeev V.N., Lantukh-Lyashhenko A.I., Pashinskij V.A., Perel'muter A.V., Pichugin S.F. Nagruzki i vozdejstviya na zdaniya i sooruzheniya. M.: Izdatel'stvo Associazcii stroitel'ny'kh vuzov, 2007. 482 s.
2. Husenkov A.P., Zatsarynniy V.V., Shneiderovych R.M. Metodyka polucheniya kharakterystyk soprotivleniya malotsyklovomu deformyrovaniyu i razrusheniyu pry yzmereniyu poperechnykh deformatsiyi. Zavodskaya laboratoriya. M.: 1971. №4. S. 464-468.
3. Dobrovolskiy V.Y., Dobrovolskiy S.V. Otsenka viazkosty razrusheniya modelnykh elementov s uchetom razmera treshchyn. Zavodskaya laboratoriya, Dyahnostyka materyalov. M.: 2004. №10. S.47-52.
4. Zainulyn R.S. Opredelenye bezopasnoho sroka ekspluatatsyy deistviuishchykh truboprovodov v uslovyakh korrozyonnoho yznosa. Prykladnaia mekhanyka mekhanokhymycheskoho razrushe-nyia. 2004. №1. S. 10-15.
5. Makhutov N.A. Ustalost metallov v shyrokom dyapazone chysla tsyklov. Zavodskaya laboratoriya. Dyahnostyka materyalov. M.: 2004. №4. S.37-41.
6. Vedenikov G.S. i dr. Metallicheskie konstrukcii. M.: Strojizdat, 1998. 758 s.
7. Khanukhov Kh.M., Simonov I.I., Yarovoj S.N. i dr. Metodika obsledovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya promy'shlenny'kh dy'movy'kh i ventilyacziorny'kh trub. Standart samoreguliruyushhej organizaczii. STO SRO E'TMP 03-16. M.: 2016. 68 s.
8. DSTU-N B V.1.2-18:2018. Nastanova shhodo obstezhennya budi'vel' ta sporud dlya viznachennya oczi'nki yikh tekhnichnogo stanu. K. DP «UkrNDNCz», 2017 42 s.
9. DBN V.2.6-163:2010. Stal'ny'e konstrukcii. Normy`proektirovaniya, izgotovleniya i montazha. K.: Minregionstroj Ukrainy`, 2011. 127 s.
10. Shapoval D.V. Dolhovechnost stvolov metallicheskykh dymovykh trub s treshchynopodobny'my defektamy. Dys. kand. tekhn. nauk. Ufa, 2004. 127 s.
11. Iarovoi S.N. Dovhovichnist ta zalyshkovyi resurs metalovykh dymovykh trub z urakhuvanniam temperaturnoho ta koroziiinoho vplyvu. Naukovyi visnyk budivnytstva. Kharkiv: KhNUBA, KhOTV ABU, 2017. Vyp. 2(88). S.110-114.
12. Iarovoi S.N. Urakhuvannia zalyshkovykh zvari-valnykh napruzhen pry pidsylenni dymovykh trub z trishchyno podobny'my defektamy.

труб з тріщино подібними дефектами. Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2018. Вип. 3 (93). С.110-114.

13. Udo P. Ветровые нагрузки на высотные сооружения. Mitt. Techn.Univ. Carolo Wilhelmina, Braunschweig. 1995. 30, №1. P. 50-56, 58-64, 68-72.
14. EN 1991-1-4. Eurocode 1: Action on structures – Part 1-4. General actions. Wind action. Brussels: CEN, 2002. 151 p.
15. Yarovoj S., Dorofeev E., Benko V. Extension of the performance of metallic smoke pipes in improving the ecology of regions. Dnipro – Bratislava: SHEE «Pridniprovska State Academi of the Civil Ingeneering and Arhitecture» – Slovak University of Tehnology in Bratislava, 2018. P. 85- 93.

Naukovyi visnyk budivnytstva. Kharkiv: KhNUBA, KhOTV ABU, 2018. Vyp. 3 (93). S.110-114.

13. Udo P. Vetrovye nahruzky na vysotnye sooruzheniya. Mitt. Techn.Univ. Carolo Wilhelmina, Braunschweig. 1995. 30. №1. p. 50-56, 58-64, 68-72.
14. EN 1991-1-4. Eurocode 1: Action on structures – Part 1-4. General actions. Wind action. Brussels: CEN, 2002. 151 p.
15. Yarovoj S., Dorofeev E., Benko V. Extension of the performance of metallic smoke pipes in improving the ecology of regions. Dnipro – Bratislava: SHEE «Pridniprovska State Academi of the Civil Ingeneering and Arhitecture» – Slovak University of Tehnology in Bratislava, 2018. P. 85- 93.

Yaroviy S., Yarova O. DURABILITY OF METAL CHIMNEY AND VENTILATION PIPES ACCORDING TO CRITERIA OF DESTRUCTION MECHANICS. Throughout the life cycle, metal chimneys and ventilation pipes are exposed to significant force and wind influences, as well as the action of aggressive high-temperature gases outside and inside the pipe. Determination of durability of metal and ventilation pipes according to the criteria of fracture mechanics based on the approaches of physics and mechanochemistry of metals is considered. According to the characteristics of crack resistance, it is possible to assess the residual life of pipes with damage detected during diagnosis. Processing the results of few cycle tests of the samples, we obtain basic information about the properties of the metal, the conditions and characteristics of the tests, the size of the cracks, the size of the plastic zone before and during the tests. Based on the test results of the samples, a diagram of the cyclic crack resistance and the value of the crack propagation velocity is constructed. The diagrams of cyclic crack resistance are approximated and the parameters of the curve of low cyclic crack resistance are set. The formulas for determining the durability of metal pipes under cyclic loading by integrating the kinetic equation of low-cycle metal damage are obtained.

Keywords: chimneys and ventilation pipes, durability, crack resistance, cyclic loading, metal damage.