

## УДК 621.867:620.17:620.193

Л. К. ПОЛІЩУК<sup>1\*</sup>, Р. Д. ІСКОВИЧ-ЛОТОЦЬКИЙ<sup>2</sup>, О. О. КОВАЛЬ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Металорізальні верстати та обладнання автоматизованих виробництв», Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21021, тел. +38 (0432) 59 85 23, ел. пошта leo.polishchuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-5916-2413

<sup>2</sup>Каф. «Металорізальні верстати та обладнання автоматизованих виробництв», Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21021, тел. +38 (0432) 59 85 23, ел. пошта islord@vntu.edu.ua, ORCID 0000-0003-3920-3019

<sup>3</sup>Каф. «Металорізальні верстати та обладнання автоматизованих виробництв», Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21021, тел. +38 (0432) 59 85 23, ел. пошта kovaloleg@outlook.com, ORCID 0000-0003-2668-0545

## ЗМІНА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА КОРОЗІЙНЕ РОЗТРІСКУВАННЯ ПІД НАПРУЖЕННЯМ МАТЕРІАЛУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ СТІЛИ БУРТОУКЛАДНИКА

**Мета.** Робота спрямована на дослідження впливу умов і тривалості експлуатації металоконструкцій стріли буртоукладника на механічні властивості матеріалу та його корозійне розтріскування під напруженням. Необхідним при цьому є підвищення точності аналізу ресурсу стрілових металоконструкцій підйомно-транспортувальних машин. **Методика.** Зразки для проведення експериментальних досліджень виготовляли із елементів стріли тривало експлуатованого буртоукладника, в яких виникали найбільші робочі напруження. Місця виникнення найбільших зусиль в елементах стрілових конструкцій визначали на її 3D моделі в процесі аналізу отриманих карт напружень методом скінченних елементів. Експериментальні дослідження проводили на установці УВП-6, на якій визначали характеристики міцності й пластичності зразків двох типів шляхом їх розтягу зі швидкістю деформації  $10^{-5} \text{ с}^{-1}$  та  $10^{-6} \text{ с}^{-1}$  на повітрі та в середовищі синтетичного дощу. Металографічні дослідження проводили на сканувальному електронному мікроскопі. **Результати.** Експериментально встановлено, що після довготривалої експлуатації стріли буртоукладника матеріал її найбільш навантажених елементів зазнав змін щодо характеристик міцності та пластичності. За сумісної дії корозійного середовища та найбільших навантажень на поверхні матеріалу з'являються виразки, точкові дефекти, які є концентраторами локальних механічних напружень, що знижує ресурс елементів конструкції стріли. **Наукова новизна.** 1) вперше встановлені закономірності зміни механічних властивостей тривало експлуатованої металоконструкції стріли буртоукладника, виготовленої з матеріалу Ст. 3; 2) одержала подальший розвиток методологія оцінки залишкового ресурсу тривало експлуатованої стрілової металоконструкції підйомально-транспортувальної машини за рахунок врахування сумісної дії вібраційних і динамічних навантажень та корозійного середовища. **Практична значимість.** Визначення залишкового ресурсу тривало експлуатованих стрілових металоконструкцій підйомально-транспортувальних машин необхідно проводити з урахуванням деградації механічних властивостей матеріалу, а також динамічного характеру їх навантаження. Одержані закономірності щодо зміни механічних властивостей та корозійного розтріскування під навантаженням матеріалу стріли посприяють підвищенню точності оцінки недовговічності залишкового ресурсу несучих металоконструкцій.

**Ключові слова:** стріла буртоукладника; робочі напруження; корозійне середовище; зміна механічних властивостей; пошкодження поверхні матеріалу; залишковий ресурс

### Вступ

Сучасні потокові технологічні та автоматизовані лінії, які широко застосовуються в машинобудуванні, автомобілебудуванні, гірничій, вугільній, будівельній, харчовій промисловості, сільському господарстві тощо, потребують застосування підйомально-транспортних машин та механізмів різних типів, що забезпечують

безперервність, ритмічність та високу продуктивність виробничих процесів. Підйомально-транспортне обладнання відіграє все важливішу роль у технологічних процесах і стає одним із найважливіших чинників, що визначають досконалість та ефективність виробництв.

На багатьох виробництвах застосовуються комплекси підйомально-транспортних машин

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

неперервної дії, що складаються з кількох видів обладнання різного функціонального призначення. Такі комплекси є найбільш ефективними засобами механізації технологічних процесів відкритого видобування корисних копалин, переробних виробництв тощо і використовуються, зокрема, для виконання транспортно-розвантажувальних робіт і складування буряків на цукрових заводах. Спільним для цих комплексів є наявність підйально-транспортного обладнання, оснащеного стріловими конструкціями, які утримуються під заданим кутом за допомогою відтяжок, закріплених на вантових опорах. На стрілових конструкціях улаштовують стрічкові конвеєри, які здійснюють транспортування вантажів.

Ефективність роботи комплексу тим вища, чим більша продуктивність, радіус і висота дії машини, що відвантажує продукцію у відвали чи бурти. Так, довжина стріли деяких відвалоутворювачів фірми «PRODECO» (Чехія) сягає 200 м, «Tenova TAKRAF» (Німеччина) – 195 м, заводу «Азовмаш» – 190 м, «Фамак» (Польща) – 150 м, а швидкість стрічки конвеєра становить 7–9 м/с. Вантажопотоки, що надходять на стрічку конвеєра, характеризуються великою нерівномірністю і носять, як правило, випадковий характер. Коефіцієнт нерівномірності вантажопотоків може досягати значень 1,97–2,02 [10]. Зазначені режими транспортування є характерними, зокрема для конвеєра комплексу БУМ-65М2В3-К. Нерівномірність завантаження конвеєрів, а також невірноваженість обертових ланок трансмісійних ліній комплексу зумовлюють виникнення змінних навантажень, що нерідко збуджують інтенсивні механічні коливання елементів механічної системи і створюють умови для втомного руйнування деталей і вузлів. На рис. 1 наведена осцилограма вібрацій платформи оператора цього комплексу, що зареєстровані за допомогою вібрографа ВР-1 [8].

З рис. 1 видно, що максимальна амплітуда коливань платформи сягає 3,8 мм, основна частота коливань становить близько 7 Гц, друга гармоніка має частоту близько 40 Гц.

Вихід з ладу будь-якого агрегату викликає простоювання всього комплексу, що призводить до значних втрат на виробництві. За таких умов важливого значення набувають

питання довговічності і надійності машин, що входять у технологічний комплекс.

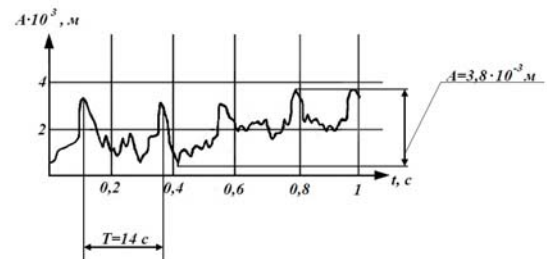


Рис. 1. Осцилограма вібрацій платформи оператора комплексу БУМ-65М2В3-К

Fig. 1. Oscillogram of vibration of operator's platform of the BUM-65M2B3-K complex

Розв'язання цієї проблеми за рахунок збільшення запасу міцності призводить до зростання початкової вартості машини, а отримувані при цьому масо-інерційні параметри стають необґрунтовано завищеними. Слід зазначити, що в деяких випадках збільшення маси вузлів і уявне, на перший погляд, збільшення міцності призводить не до підвищення надійності машини, а до її зниження. Так, збільшення площі поперечного перерізу каната відтяжки стріли великої довжини може призвести до того, що напруження згину в місцях його защемлення через великі амплітуди поперечних коливань за умови резонансу виявляться настільки суттєвими, що, незважаючи на зниження напружень розтягу, еквівалентні втомні напруження не зменшаться, а, навпаки, збільшаться [7].

Більшість агрегатів, з яких складаються комплекси, є коштовними підйально-транспортними машинами, тому економічно доцільною є їх тривала експлуатація на виробництвах (30–50 і більше років). За свідченнями експлуатаційників, після тривалої роботи буртоукладальної машини деякі деталі та вузли укладального конвеєра і стрілової конструкції виходять з ладу, а в місцях шарнірного з'єднання вант зі стрілою на поверхнях несінних ланок з'являються тріщини. Для підвищення міцності ці місця підсилюються шляхом наварювання пластин на пошкоджені поверхні.

У сучасних інженерних розрахунках детально не враховується вплив умов і тривалості експлуатації конструкції на механічні властиво-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

сті матеріалу, проте у низці наукових праць автори стверджують, що з часом у виробничих умовах механічні властивості матеріалів деградують [1, 4, 15, 13]. Крім того, небезпечними є процеси корозійного розтріскування металоконструкцій під напруженням. Незважаючи на те, що середня швидкість корозії є незначною, локальні ураження матеріалу є доволі небезпечними і становлять одну з основних причин руйнування несівних елементів металоконструкцій.

Тому для оцінювання технічного стану тривалоексплуатованих металоконструкцій та прогнозування їх залишкового ресурсу необхідно поряд з параметрами циклічних динамічних навантажень враховувати можливу деградацію механічних властивостей сталей, а також корозійне розтріскування матеріалу під напруженням. Це дасть змогу підвищити точність визначення залишкового ресурсу та одержати належну достовірність техніко-економічних розрахунків в інженерній практиці.

### Мета

Метою роботи є дослідження умов і тривалості експлуатації металоконструкції стріли буртоукладника на механічні властивості матеріалу та його корозійне розтріскування під напруженням для підвищення точності аналізу залишкового ресурсу стрілових металоконструкцій підіймально-транспортних машин.

### Методика

Як відомо [2, 6, 9, 14], деградація матеріалів найбільшою мірою проявляється в елементах конструкцій з максимальними напруженнями. Тому для виявлення найбільш навантажених елементів стріли виконано аналіз напружено-деформованого стану несівної конструкції методом скінченних елементів. Із найбільш навантажених елементів конструкції виготовили зразки для виконання експериментальних досліджень.

Аналіз напружено-деформованого стану виконали із застосуванням обчислювального комплексу APM Structure 3D пакету APM Win Machine.

Досліджували складові елементи металоконструкції стріли, у яких напруження досягають свого екстремуму: ВР – вертикально розміщена в перерізі полицка кутника поперечного стрижня

верхнього пояса стріли з найменшим діючим напруженням, ГР – горизонтально розміщена полицка кутника цього ж стрижня; ВН – вертикально розміщена в перерізі полицка кутника стрижня 1 верхнього пояса стріли з найбільшим діючим напруженням, ГН – горизонтально розміщена полицка цього ж стрижня.

Характеристики міцності та пластичності визначали на циліндричних зразках типу 1 і 2 (рис. 2) шляхом розтягу зі швидкістю деформації  $10^{-5} \text{ с}^{-1}$  та  $10^{-6} \text{ с}^{-1}$  на установці УВП-6 (рис. 3).

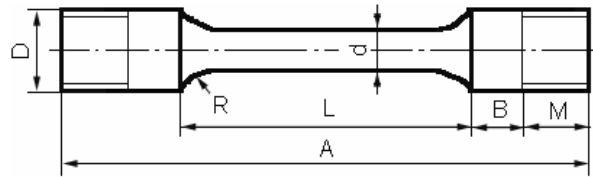


Рис. 2. Зразок для випробувань матеріалів на довготривалу корозійну міцність

Fig. 2. Sample for materials testing for long-term corrosion strength

Зразок типу 1 має такі розміри:  $A = 80 \text{ мм}$ ;  $L = 40 \text{ мм}$ ;  $d = 4 \text{ мм}$ ;  $D = 6 \text{ мм}$ ;  $M = 10 \text{ мм}$ , а зразок типу 2 відрізняється лише розмірами  $d = 3 \text{ мм}$  і  $D = 4 \text{ мм}$ . Випробування виконували на повітрі та в середовищі синтетичного дощу з метою створення умов, наближених до експлуатаційних. Кислотний дощ утворюється, здебільшого, в результаті реакції між водою і такими забруднюючими речовинами, як діоксид сірки ( $\text{SO}_2$ ) і різні оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ). Аналіз атмосферних опадів у промислових регіонах України, в яких експлуатуються буртоукладники, виявив, що рН такого дощу може досягати 4,4, а його усереднений хімічний склад є таким:  $\text{H}_2\text{SO}_4 - 3,19$ ;  $\text{Na}_2\text{SO}_4 - 3,2$ ;  $\text{HNO}_3 - 1,58$ ;  $\text{NaNO}_3 - 2,12$ ;  $\text{NaCl} - 8,48$  [11, 16]. Металографічні дослідження виконано на сканувальному електронному мікроскопі EVO-40XVP (фірма Carl Zeiss).

Як вихідний матеріал використано елемент конструкції ВР стріли, у якому практично не виникали напруження.

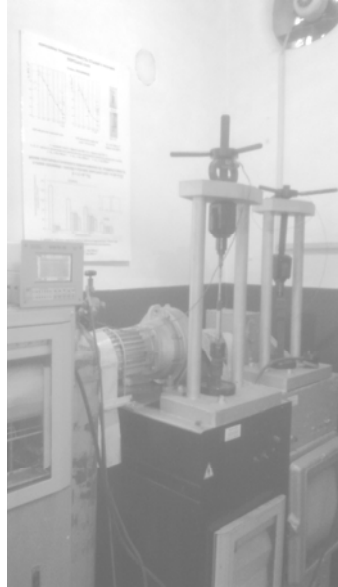
### Результати

Розглянуто результати досліджень впливу тривалої експлуатації (близько 30 років на Барському цукровому заводі, Вінницька обл.) буртоукладника БУМ-65М2Б3-К на зміну механіч-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

них властивостей матеріалу (характеристики міцності та пластичності) і на корозійне розтріскування під напруженням матеріалу стріли, виготовленої із профільної сталі Ст. 3.

*a – a*



*б – б*

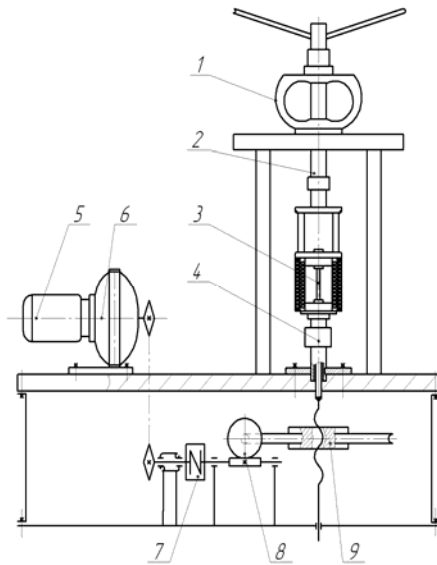


Рис. 3. Загальний вигляд (*a*) та кінематична схема (*б*) установки УВП-6:

1 – динамометр; 2 – тяга верхня; 3 – зразок; 4 – тяга нижня; 5 – мотор-редуктор; 6 – ланцюгова передача; 7 – муфта; 8 – черв'ячна передача; 9 – черв'ячно-гвинтова передача

Fig. 3. General view (*a*) and kinematic scheme (*б*) of plant UVP-6:

1 – dynamometer; 2 – upper traction; 3 – sample; 4 – lower traction; 5 – motor-reducer; 6 – chain gear; 7 – coupling; 8 – worm gear; 9 – worm-screw gear

На рис. 4 зображена розроблена 3D модель стріли укладального конвеєра, яка складається з верхнього 1 та нижнього 2 поясів, скріплених поперечними стійками 3 та відкосами 4. Верхній та нижній пояси виготовлені з рівнополичного кутника *L50-5*, а стійки та відкоси – з кутника *L32-3* (ДСТУ 2251-93 (ГОСТ 8509-93)), які утворюють стрижневу систему стріли. Стріла кріпиться до буртоукладника за допомогою шарнірного з'єднання 5, а до пілона – за допомогою відтяжок шарнірами 6 і таким чином встановлюється під кутом  $16^\circ$  до горизонту.

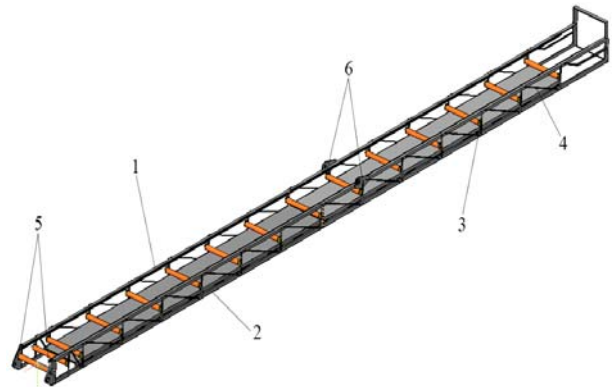


Рис. 4. 3D модель стріли укладального конвеєра

Fig. 4. 3D model of an arrow of placing conveyor

В процесі виконання статичного розрахунку отримуємо карти напружень деформованого стану конструкції (рис. 5), за допомогою яких встановлюємо числові значення напружень у стрижнях. Розглядали три випадки навантаження конвеєра: номінальне, рівномірно розподілене по стрічці (рис. 5, *a*); збільшене у півтора разу щодо номінального (рис. 5, *б*); збільшене у 2 рази щодо номінального (рис. 5, *в*).

Встановлено, що найбільші значення напружень виникають у стрілі в місці кріплення відтяжок до шарнірів 6.

На рис. 6 зображено вісім основних стрижневих елементів конструкції.

Максимальні значення напружень у стрижнях наведені у табл. 1.

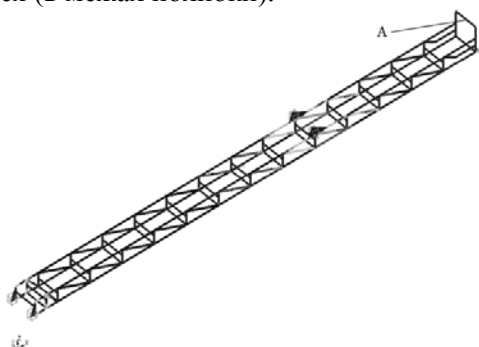
Найменші (близькі до нуля) напруження виникають у поперечному стрижні (точка *A*, рис. 5, *a*) відвантажувальної частини стріли, а найбільші – у стрижні 1 (точка *B*, рис. 6) верхнього пояса 1 (див. рис. 4).

За результатами досліджень механічних характеристик зі швидкістю деформації  $10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ,

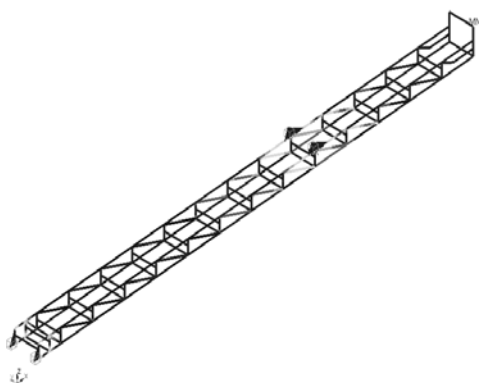
МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

які наведені в табл. 2, виявлено, що в елементі конструкції ГР в обох випробувальних середовищах, порівняно з вихідним матеріалом елемента конструкції ВР (рис. 7 а, б), відбувається незначне зниження характеристик міцності та пластичності, яке прослідковується за характеристикою  $\delta$ . Характеристика  $\psi$  практично не змінилася (в межах похибки).

а – а



б – б



в – в

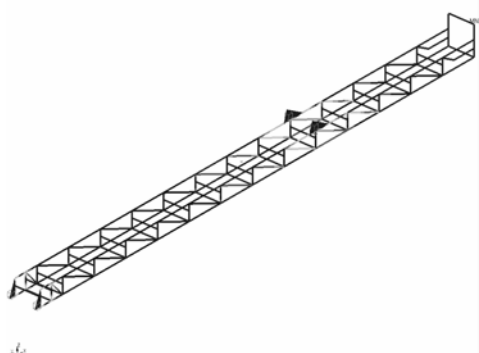


Рис. 5. Напружений стан стріли конвеєра: а – номінальне навантаження вантажем вагою 10 кН; б – навантаження вантажем вагою 15 кН; в – навантаження вантажем вагою 20 кН

Fig. 5. Stressed state of an arrow of conveyor: а – nominal load, weight of 10 kN; б – load, weight of 15 kN; в – load, weight of 20 kN

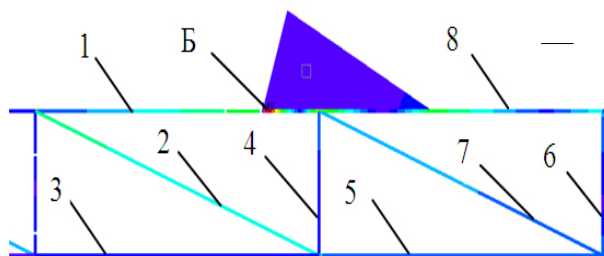


Рис. 6. Зони найбільших напружень в стрижнях конструкції

Fig. 6. Areas of greatest stress in the bars of construction

Для елементів конструкції ВН та ГН спостерігається незначне зростання міцнісних характеристик та зниження характеристик пластичності як у повітрі, так і середовищі синтетичного дощу порівняно з вихідним матеріалом, що свідчить про окрихнення експлуатованого матеріалу. Причому, показники  $\delta$  змінюються в більшій мірі ніж показники  $\psi$ . Найнижчі характеристики пластичності в елементах ГН: показники  $\delta$  та  $\psi$  знизилися відповідно на 51,6 % і 7,42 % у повітрі та на 53,6 % і 8,65 % у розчині синтетичного дощу порівняно з вихідним матеріалом.

Таблиця 1

Максимальні напруження у перерізах стрижнів















Table 1

The maximum stress in cross sections of rods


Номер стрижня	Максимальне значення напруження, МПа	Розподіл напружень по поперечному перерізу
Навантаження вантажем вагою 10 кН		
1	119,5	
2	33,57	
3	10,85	
4	9,486	

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Продовження табл. 1

Номер стрижня	Максимальне значення напруження, МПа	Розподіл напружень по поперечному перерізу
Навантаження вантажем вагою 10 кН		
5	21,73	
6	9,134	
7	25,26	
8	41,69	
Навантаження вантажем вагою 15 кН		
1	255,9	
2	87,15	
3	23,02	
4	40,42	
5	48,77	
6	40,64	
7	59,51	
8	97,72	
Навантаження вантажем вагою 20 кН		
1	322,7	
2	92,02	

Закінчення табл. 1

Номер стрижня	Максимальне значення напруження, МПа	Розподіл напружень по поперечному перерізу
Навантаження вантажем вагою 20 кН		
3	28,24	
4	43,08	
5	59,67	
6	61,74	
7	68,11	
8	122	

Таблиця 2

Механічні властивості сталі Ст. 3

Table 2

Mechanical properties of steel St. 3

Сталь, елемент конструкції	Середовище	$\delta$	$\psi$	$\sigma_b$	$\sigma_0, 2$	V деф.
		%	%	М Па	М Па	мм/с
Ст. 3, ВР	повітря	25,15	66,94	420	252	$10^{-5}$
	синт. дощ	22,13	65,55	406	248	$10^{-5}$
Ст. 3, ГР	повітря	18,79	68,24	408	250	$10^{-5}$
	синт. дощ	16,92	66,00	386	242	$10^{-5}$
Ст. 3, ВН	повітря	18,92	64,01	440	298	$10^{-5}$
	синт. дощ	14,48	62,19	417	284	$10^{-5}$

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Закінчення табл. 2

Сталь, елемент конструкції	Середовище	$\delta$	$\psi$	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$V_{\text{деф.}}$
		%	%	М Па	М Па	мм/с
Ст. 3, ГН	повітря	12, 17	61, 97	45 7	35 6	$10^{-5}$
	синт. дощ	10, 27	59, 88	45 0	30 2	$10^{-5}$
Ст. 3, ВР	повітря	22, 16	65, 24	42 0	24 6	$10^{-6}$
	синт. дощ	16, 58	62, 18	39 4	24 2	$10^{-6}$
Ст. 3, ГР	повітря	18, 24	63, 12	40 6	24 0	$10^{-6}$
	синт. дощ	15, 93	61, 56	37 4	24 8	$10^{-6}$
Ст. 3, ВН	повітря	15, 50	59, 05	41 0	29 2	$10^{-6}$
	синт. дощ	12, 25	52, 00	40 8	28 7	$10^{-6}$
Ст3, ГН	повітря	10, 86	62, 04	46 2	33 6	$10^{-6}$
	синт. дощ	7,9 2	52, 00	46 0	32 0	$10^{-6}$

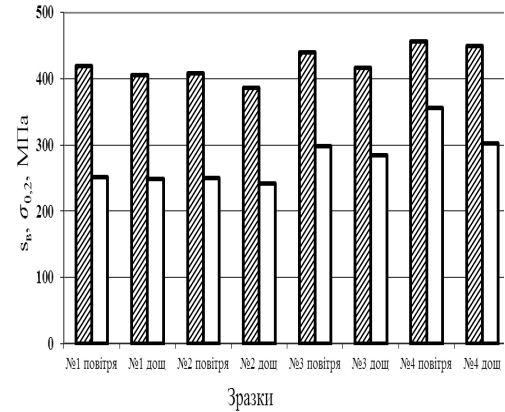
Для елемента конструкції ВН характеристики пластичності на повітрі знизилися:  $\delta$  – на 25 %;  $\psi$  – на 4,4 %; у розчині синтетичного дощу на 35 % та на 5 % відповідно (порівняно з вихідним матеріалом). Отже, у корозійному середовищі крихкість досліджуваних матеріалів зростає. Зазначимо, що крихким матеріалам властива низька тріщиностійкість. Поява в результаті експлуатації дефектів типу тріщин або інших гострокінцевих концентраторів напружень може спричинити підвищений ризик руйнування [11, 12, 16].

Випробування у розчині синтетичного дощу виявили, що навіть за швидкості деформації ( $10^{-5} \text{ c}^{-1}$ ) на поверхні зразка утворюються виразки (рис. 8, а, б) та точкові дефекти, що можна пояснити електрохімічною неоднорідністю деформованої поверхні, яка спричиняє виникнення локальних пошкоджень за електрохімічним механізмом. В результаті довготривалої дії корозійного середовища та напружень розміри пошкоджень зростають. Це є негативним чин-

doi 10.15802/stp2015/42176

ником, оскільки такі пошкодження можна розглядати як ефективні концентратори механічних напружень, від яких можливе зародження тріщиноподібних дефектів.

а – а



б – б

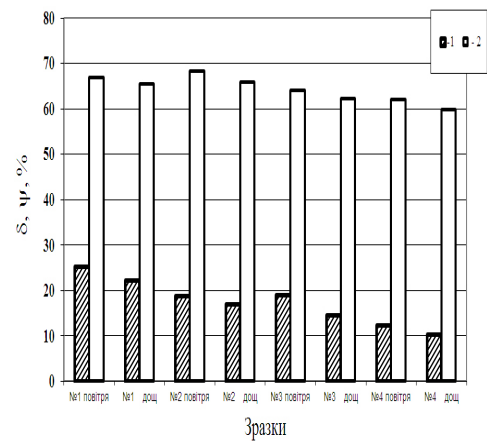


Рис. 7. Міцність (а) та пластичність (б) елементів конструкції за деформації  $10^{-5} \text{ c}^{-1}$  на повітрі та в розчині синтетичного дощу

Fig. 7. Durability (a) and ductility (b) of elements of construction for strain  $10^{-5} \text{ mm/s}$  in air and in a solution of synthetic rain

На поверхні зразка елемента конструкції ГН, випробуваного в розчині синтетичного дощу, спостерігається утворення сітки поверхневих тріщин різного розміру та орієнтації, що також є підтвердженням окрихчення матеріалу (рис. 8, в).

За однакових умов випробувань у середовищі синтетичного дощу в матеріалі елемента конструкції ГН з найбільш навантаженої частини стріли розміри пошкоджень є більшими, ніж у зразку елемента конструкції ВР вихідного матеріалу з найменш навантаженої частини стріли (рис. 9).

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

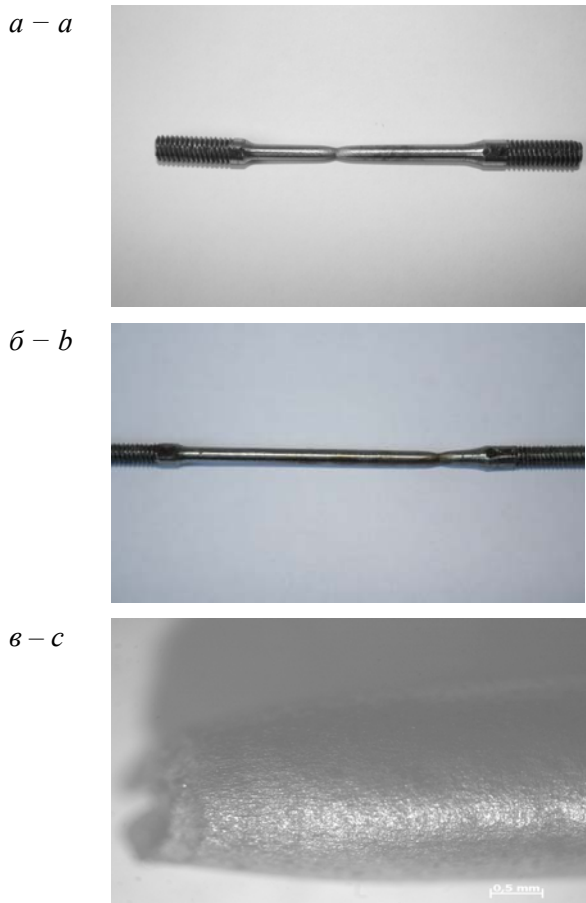


Рис. 8. Зразки після випробувань у середовищі синтетичного дощу:  
*a* – зразок елемента конструкції ВР; *b* – зразок елемента конструкції ГН; *c* – зразок елемента конструкції ГН (збільшено)

Fig. 8. Samples after testing in environment of synthetic rain:

*a* – sample of the design elements VR; *b* – sample of the design elements HN, *c* – sample of design elements HN (increased)

За випробувань з меншою швидкістю деформації ( $10^{-6} \text{ c}^{-1}$ ) спостерігаються такі ж тенденції, як і під час випробувань за деформації  $10^{-5} \text{ c}^{-1}$ : незначне зниження характеристик міцності та пластичності для елемента конструкції ГР та незначне зростання характеристик міцності та зниження характеристик пластичності для елементів конструкції ГН і ВН порівняно з вихідним матеріалом. Так, для елемента конструкції ГН значення  $\delta$  та  $\psi$  знижуються відповідно на 51 % і на 5 % у повітрі та на 52,2 % і на 6,4 % у розчині синтетичного дощу порівняно з вихідним матеріалом.

doi 10.15802/stp2015/42176

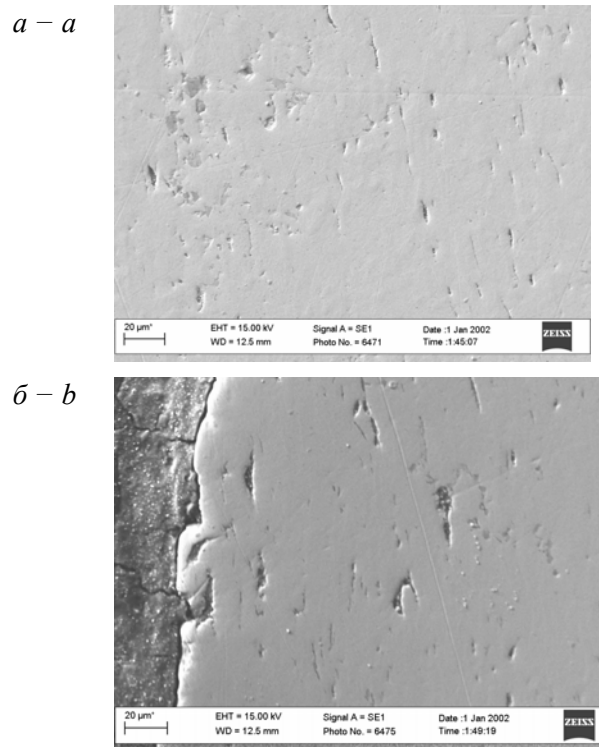


Рис. 9. Пошкодження металу після випробувань у середовищі синтетичного дощу:  
*a* – вихідний матеріал; *b* – зразок елемента конструкції ГН

Fig. 9. Damages of the metal after testing in environment of synthetic rain: *a* – the source material; *b* – sample of the design elements HN

Оскільки зміни характеристик міцності та пластичності за різних швидкостей деформування ( $10^{-6} \text{ c}^{-1}$  та  $10^{-5} \text{ c}^{-1}$ ) практично не відрізняються, то ці швидкості дають можливість визначення максимального впливу середовища на міцність і пластичність.

### Наукова новизна та практична значимість

1. Вперше встановлені закономірності зміни механічних властивостей тривалоексплуатованої металоконструкції стріли буртоукладника, виготовленої з матеріалу Ст. 3.

2. Одержала подальший розвиток методологія оцінки залишкового ресурсу тривалоексплуатованої стрілової металоконструкції підйнятно-транспортної машини за рахунок врахування сумісної дії вібраційних і динамічних навантажень та корозійного середовища.

Визначення залишкового ресурсу тривало-

© Л. К. Поліщук, 2015



## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

експлуатованих стрілових металокопструкцій підйимально-транспортних машин необхідно проводити з урахуванням деградації механічних властивостей матеріалу, а також динамічного характеру їх навантаження. Одержані закономірності щодо зміни механічних властивостей та корозійного розтріскування під навантаженням матеріалу стріли посприяють підвищенню точності оцінки недовговічності залишкового ресурсу несівних металокопструкцій.

**Висновки**

Встановлено, що після довготривалої експлуатації механічні властивості матеріалу складових елементів металокопструкції стріли буртоукладника зазнали змін порівняно з вихідним матеріалом: для елементів копструкції ГН та ВН з найбільшим діючим напруженням спостерігається незначне зростання міцнісних характеристик та зниження характеристик пластичності як у повітрі, так і в середовищі синтетичного дощу, що свідчить про окрихчування експлуатованого матеріалу. Найнижчими характеристики пластичності одержані для елементів копструкції ГН найбільш навантаженої частини стріли.

В елементі копструкції ГР спостерігається незначне зниження характеристик міцності і пластичності.

За сумісної дії корозійного середовища (синтетичний дощ) та прикладених статичних навантажень зростає пошкодження поверхні матеріалу: з'являються виразки та точкові дефекти, які знижують довговічність елементів копструкції, оскільки вони можуть бути концентраторами локальних механічних напружень.

Негативним явищем, з огляду на довговічність та безпеку підйимально-транспортних машин, є поява сітки поверхневих тріщин різного розміру та орієнтації на поверхні зразка елемента копструкції ГН, що підтверджує окрихчення матеріалу копструкції.

Отже, для визначення залишкового ресурсу стрижневих металокопструкцій тривалої експлуатації необхідно враховувати деградацію механічних властивостей матеріалу, а також синергетичний вплив механічних чинників та іонної сили середовища, що значно прискорює корозійні процеси.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Вакуленко, І. О. Дослідження етапів зародження та зростання тріщин при натурному випробуванні на втомленість / І. О. Вакуленко, М. А. Грищенко, О. М. Перков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 21. – С. 266–268.
2. Вакуленко, І. О. Умови розвитку процесів динамічного деформаційного старіння в сталі / І. О. Вакуленко, Ю. Л. Надеждін // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 37. – С. 220–223.
3. Василенко, І. І. Коррозийное растрескивание сталей / І. І. Василенко, Р. К. Мелехов. – Київ : Наук. думка, 1977. – 265 с.
4. Деградація металу під час тривалої експлуатації та її вплив на працездатність лопаток парової турбіни / Г. М. Григоренко, О. Д. Сміян, Л. М. Капітанчук [та ін.] // Цільова комплекс. програма НАН України «Проблема ресурсу і безпеки експлуатації копструкцій, споруд та машин» : зб. наук. ст. – Київ : Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2012. – С. 288–299.
5. Механика разрушения и прочность материалов : справ. пособие : в 4 т. / общ. ред. В. В. Панасюка. – Київ : Наук. думка, 1990. – Т. 4. – 679 с.
6. Ниркова, Л. І. Розроблення методики розрахунку імовірності корозійного розтріскування від напруження ділянки магістрального газопроводу / Л. І. Ниркова, С. О. Осадчук, І. М. Шпільський // Цільова комплекс. програма НАН України «Проблема ресурсу і безпеки експлуатації копструкцій, споруд та машин» : зб. наук. ст. – Київ : Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2012. – С. 328–332.
7. Панкратов, С. А. Динамика машин для открытых горных и земляных работ / С. А. Панкратов. – Москва : Машиностроение, 1967. – 448 с.
8. Поліщук, Л. К. Вмонтовані гідравлічні приводи конвеєрів з гнучким тяговим органом, чутливі до зміни навантаження : монографія / Л. К. Поліщук, О. О. Адлер. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 184 с.
9. Розрахунок залишкової довговічності тривало експлуатованої ділянки магістрального газопроводу / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара, О. Т. Циркульник, Л. І. Ниркова // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – Том 48, № 2. – С. 103–110.
10. Спиваковский, А. О. Теория ленточных конвеєров / А. О. Спиваковский, В. Г. Дмитриев. – Москва : Наука, 1982. – 187 с.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

11. Хорват, Л. Кислотный дождь / Пер с венг. В. В. Крымского ; Под ред. Ю. Н. Михайловского. – Москва : Стройиздат, 1990. – 80 с.
12. Цыбенко, А. С. Оценка долговечности длительно эксплуатирующихся энергомашиностроительных конструкций на основе расчета напряженно-деформированного состояния / А. С. Цыбенко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 13. – С. 165–167.
13. Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite–pearlite steel / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyulnyk [et al.] // Materials and Corrosion. – 2009. – № 9. – P. 716–725. doi: 10.1002/maco.200805158
14. Environmentally assisted «in-bulk» steel degradation of long term service gas trunkline / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyulnyk [et al.] // Eng. Failure Analysis. – 2010. – Vol. 17. – Iss. 3. – P. 624–632. doi: 10/1016/j.engfailanal.2009.04.007
15. Nykyforchyn, H. M. Abnormal manifestation of high-temperature degradation of the weld metal of low-alloy steel welded joints / H. M. Nykyforchyn, O. Z. Student, A. D. Markov // Materials Science. – 2007. – № 1. – P. 77–84. doi: 10.1007/s11003–007–0008–1.
16. Zin, I. M. Under-film corrosion of epoxy-coated galvanized steel: An EIS and SVET study of the effect of inhibition at defects / I. M. Zin, S. B. Lyon, A. Hussain // Progress in Organic Coatings. – 2005. – № 52 (2). – P. 126–135. doi:10.1016/j.porgcoat.2004.10.006.

Л. К. ПОЛИЩУК<sup>1\*</sup>, Р. Д. ИСКОВИЧ-ЛОТОЦКИЙ<sup>2</sup>, О. А. КОВАЛЬ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Металлорезальные станки и оборудование автоматизированных производств», Винницкий национальный технический университет, Хмельницкое шоссе, 95, Винница, Украина, 21021, тел. + 38 (0432) 59 85 23, эл. почта leo.polishchuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-5916-2413

<sup>2</sup>Каф. «Металлорезальные станки и оборудование автоматизированных производств», Винницкий национальный технический университет, Хмельницкое шоссе, 95, Винница, Украина, 21021, тел. + 38 (0432) 59 85 23, эл. почта islord@vntu.edu.ua, ORCID 0000-0003-3920-3019

<sup>3</sup>Каф. «Металлорезальные станки и оборудование автоматизированных производств», Винницкий национальный технический университет, Хмельницкое шоссе, 95, Винница, Украина, 21021, тел. + 38 (0432) 59 85 23, эл. почта kovaloleg@outlook.com, ORCID 0000-0003-2668-0545

## ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ МАТЕРИАЛА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ СТРЕЛЫ БУРТОУКЛАДЧИКА

**Цель.** Работа направлена на исследование влияния условий и продолжительности эксплуатации металлоконструкций стрелы буртоукладчика на механические свойства материала и его коррозионное растрескивание под напряжением. Необходимым при этом является повышение точности анализа ресурса стреловых металлоконструкций подъемно-транспортных машин. **Методика.** Образцы для проведения экспериментальных исследований изготавливали из элементов стрелы длительно эксплуатируемого буртоукладчика, в которых возникали наибольшие рабочие напряжения. Места возникновения наибольших усилий в элементах стреловых конструкций определяли на ее 3D модели в процессе анализа полученных карт напряжений методом конечных элементов. Экспериментальные исследования проводили на установке УВП-6, на которой определяли характеристики прочности и пластичности образцов двух типов путем их растяжения со скоростью деформации  $10^{-5} \text{ с}^{-1}$  и  $10^{-6} \text{ с}^{-1}$  на воздухе и в среде синтетического дождя. Металлографические исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе. **Результаты.** Экспериментальными исследованиями установлено, что после длительной эксплуатации стрелы буртоукладчика материал ее наиболее нагруженных элементов претерпел изменения в характеристиках прочности и пластичности. При совместном действии коррозионной среды и наибольших нагрузок на поверхности материала появляются изъявления, точечные дефекты, которые являются концентраторами локальных механических напряжений, что снижает ресурс элементов конструкции стрелы. **Научная новизна.** 1. Впервые установлены закономерности изменения механических свойств длительно эксплуатируемой металлоконструкции стрелы буртоукладчика, изготовленной из материала Ст. 3. 2. Получила дальнейшее развитие методология оценки остаточного ресурса длительно-эксплуатируемой стреловой металлоконструкции подъемно-транспортной машины за счет учета совместного действия вибрационных и динамических нагрузок и коррозионной среды. **Практическая значимость.** Определение остаточного ресурса длительно эксплуатируемых стреловых

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

металлоконструкцій підйомно-транспортних машин необхідно проводити з урахуванням деградації механічних властивостей матеріала, а також динамічного характеру їх навантаження. Отримані закономірності по зміні механічних властивостей і корозійного растрескивання під навантаженням матеріала стріли допоможуть підвищенню точності оцінки недовговічності залишкового ресурсу несучих металлоконструкцій.

*Ключові слова:* стріла буртоукладчика; робочі напруження; корозійна середовище; зміна механічних властивостей; пошкодження поверхні матеріала; залишковий ресурс

L. K. POLISHCHUK<sup>1\*</sup>, R. D. ISKOVYCH-LOTOTSKYI<sup>2</sup>, O. A. KOVAL<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Metal Cutting Machines and Equipment of Automated Production», Vinnytsia National Technical University, Khmelnytskyi Road, 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021, tel. +38 (0432) 59 85 23, e-mail leo.polishchuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-5916-2413

<sup>2</sup>Dep. «Metal Cutting Machines and Equipment of Automated Production», Vinnytsia National Technical University, Khmelnytskyi Road, 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021, tel. +38 (0432) 59 85 23, e-mail islord@vntu.edu.ua, ORCID 0000-0003-3920-3019

<sup>3</sup>Dep. «Metal Cutting Machines and Equipment of Automated Production», Vinnytsia National Technical University, Khmelnytskyi Road, 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021, tel. +38 (0432) 59 85 23, e-mail kovaloleg@outlook.com, ORCID 0000-0003-2668-0545

## CHANGE IN THE MECHANICAL PROPERTIES AND STRESS CORROSION CRACKING UNDER TENSION OF A CLAMP-FORMING MACHINE ARROW

**Purpose.** The aim is to study the effects of conditions and duration of working of structures arrows of a clamp-forming machine on mechanical properties of the material and its stress corrosion cracking under tension. It is necessary to improve the accuracy of resources analysis of boom metalwares of lifting and transporting machines. **Methodology.** Samples for experimental investigations were made of the elements of arrow continued exploited clamp-forming machine where there were major work stress. Centers of greatest efforts in elements of arrows constructions were determined in its 3D model in the analysis of the stress cards by finite element method. Experimental studies were performed at the facility UVP-6, which determined the characteristics of strength and ductility of samples of two types by means of tensile strain, speed  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  and  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$  in air and in the environment of synthetic rain. Metallographic studies were performed on a scanning electron microscope. **Findings.** Experimental studies found that after long-term operation of arrow of clamp-forming machine material of its most loaded elements changed due to characteristics of strength and ductility. At joint action of corrosion environment and the greatest stress on the surface of the material expressions, point defects are appeared. They are concentrators of local mechanical stress, which reduce the resource construction elements of the arrow. **Originality.** 1. Firstly set patterns of changes in the mechanical properties of continued operated metal construction of arrow of clamp-forming machine made of St. 3; 2. Received further developed methodology for remaining resource estimation continued operated of metal boom lifting and shipping the machine by taking into account joint action vibration and dynamic loads and corrosive environments. **Practical value.** Determination the residual resource of continued operated boom lifting and transporting metal machines should be carried out taking into account the degradation of the mechanical properties of the material as well as the dynamic nature of the load. The obtained regularities on changes of mechanical properties and stress corrosion cracking under tension of an arrow material will contribute to increase evaluation accuracy of fragility of residual resource of load carrying steel structures.

*Keywords:* arrow of clamp-forming machine; work stress; corrosive environment; changes in the mechanical properties; damages to the surface of the material; residual resource

### REFERENCES

1. Vakulenko I.O., Hryshchenko M.A., Perkov O.M. Doslidzhennia etapiv zarodzhennia ta zrostannia trishchyn pry naturnomu vyprobuvanni na vtomlenist [Research of stages of nucleation and growth of cracks at full scale tests on tiredness]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 21, pp. 266-268.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

2. Vakulenko I.O., Nadezhdin Yu.L. Umovy rozvytku protsesiv dynamichnoho deformatsiinoho starinniya v stali [Conditions for development dynamic strain steel ageing]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue. 37, pp. 220-223.
3. Vasilenko I.I., Melekhov R.K. *Korroziynoye rastreskivaniye staley* [Corrosion cracking of steels]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1977. 265 p.
4. Hryhorenko H.M., Smiian O.D., Kapitanchuk L.M., Butkova O.I., Solomiichuk T.H. Dehradatsiia metalu pid chas tryvaloi ekspluatatsii ta yii vplyv na pratsездatnist lopatok parovoi turbiny [The degradation of the metal during prolonged use and its impact on the performance of the turbine blades]. *Tsilova kompleksna prohrama NAN Ukrainy «Problema resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruksii, sporud ta mashyn»* [Targeted Comprehensive Program of NAS of Ukraine «Problem of life and safety of exploitation of structures, facilities and machines»]. Kyiv, 2012, pp. 288-299.
5. Panasyuk V.V. *Mekhanika razrusheniya i prochnost materialov. Tom 4* [Fracture mechanics and strength of materials. In 4 volumes]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1990. Vol. 4. 680 p.
6. Nyrkova L.I., Osadchuk S.O., Shpil'skiy I.M. Rozroblennia metodyky rozrakhunku imovirnosti koroziiinoho roztriskuvannia vid napruzheniia dilianky mahistralnoho hazoprovodu [Development of methods of calculating the probability of stress corrosion cracking section from load of the main gas]. *Tsilova kompleksna prohrama NAN Ukrainy «Problema resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruksii, sporud ta mashyn»* [Targeted Comprehensive Program of NAS of Ukraine «Problem of life and safety of exploitation of structures, facilities and machines»]. Kyiv, 2012, pp. 328-332.
7. Pankratov S.A. *Dinamika mashin dlya otkrytykh gornyykh i zemlyanykh robot* [The dynamics of machine for open pit and earthworks]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1967. 448 p.
8. Polishchuk L.K., Adler O.O. *Vmontovani hidravlichni pryvody konveieriv z hnuchkym tiahovym orhanom, chutlyvi do zminy navantazhennia* [Built hydraulic drives of conveyors with flexible traction body that sensitive to changes in load]. Vinnytsia, VNTU Publ., 2010. 184 p.
9. Andreikiv O.Ye., Hembara O.V., Tsyrunyk O.T., Nyrkova L.I. Rozrakhunok zalyshkovoi dovhovichnosti tryvalo ekspluatovanoi dilianky mahistralnoho hazoprovodu [Calculation of residual durability of continued operated sites of gas pipeline]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov – Physical and Chemical Mechanics of Materials*, 2012, vol. 48 (2), pp. 103-110.
10. Spivakovskiy A.O., Dmitriyev V.G. *Teoriya lentochnykh konveyerov* [Theory of belt conveyors]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 187 p.
11. Khorvat L. *Kislotnyy dozhd* [Acid rain]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990. 80 p.
12. Tsybenko A.S. Otsenka dolgovechnosti dlitelno ekpluatiruyushchikhsya energomashinostroitelnykh konstruksiy na osnove rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya [Evaluation of long-term durability of a management power engineering structures based on the calculation of the stress-strain state]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2006, issue 13, pp. 165-167.
13. Nykyforchyn H., Lunarska H., Tsyrunyk O., Nikiforov K., Gabetta G. Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite-pearlite. *Materials and Corrosion*, 2009, vol. 60 (9), pp. 716-725. doi: 10.1002/maco.200805158.
14. Nykyforchyn H., Lunarska H., Tsyrunyk O., Genarro M.E., Gabetta G. Environmentally assisted «in-bulk» steel degradation of long term service gas. *Failure Analysis*, 2010, vol. 17, issue 3, pp. 624-632. doi: 10.1016/j.engfailanal.2009.04.007.
15. Nykyforchyn H.M., Student O.Z., Markov A.D. Abnormal manifestation of high-temperature degradation of the weld metal of low-alloy steel welded joints. *Materials Science*, 2007, vol. 43 (1), pp. 77-84. doi: 10.1007/s11003–007–0008–1
16. Zin I.M., Lyon S.B., Hussain A. Under-film corrosion of epoxy-coated galvanized steel An EIS and SVET study of the effect of inhibition at defect. *Progress in Organic Coatings*, 2005, vol. 52, pp. 126-135. doi:10.1016/j.porgcoat.2004.10.006.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., професором Є. В. Харченком (Україна), д.т.н., проф. В. І. Савуляком (Україна); д.т.н., проф. І. О. Вакуленком (Україна)

Надійшла до редколегії 15.12.2014.

Прийнята до друку 25.02.2015.