

Л.К. Поліщук, О.О. Коваль

**ЗМІНА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА КОРОЗІЙНОГО
РОЗТРИСКУВАННЯ ПІД НАПРУЖЕННЯМ МАТЕРІАЛУ
МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ СТРИЛИ БУРТОУКЛАДНИКА**

Встановлено чинники, що впливають на довговічність та надійність стрілових конструкцій підйомно-транспортних машин, що оснащені стрічковими конвеєрами. Експериментально встановлено зміну механічних властивостей матеріалів тривалоексплуатованих стрілових конструкцій, синергетичний вплив механічних чинників та розчинених в повітрі оксидів на стрес-корозійні процеси в цих матеріалах. Доведено необхідність врахування деградації матеріалів для визначення залишкового ресурсу цих і подібних їм конструкцій.

The factors affecting the durability and reliability of jib constructions of lifting-transport machines, which are equipped with belt conveyers. Experimentally established changes in the mechanical properties of materials long exploited jib constructions, synergistic impact of mechanical factors and dissolved in the air oxides on stress corrosion processes in these materials. The necessity of accounting the degradation of materials for the determination of residual resource these and similar structures.

Сучасні потокові технологічні та автоматизовані лінії, які широко застосовуються в машинобудуванні, автомобілебудуванні, гірничій, вугільній, будівельній, харчовій промисловості, сільському господарстві тощо, потребують застосування підйомно-транспортних машин та механізмів різних типів, що забезпечують безперервність і ритмічність виробничих процесів. Підйомно-транспортне обладнання все більше відіграє все важливішу роль у технологічних процесах і стає в одним із найважливіших чинників, що визначають досконалість та ефективність виробництв.

Для забезпечення високої продуктивності праці на багатьох виробництвах застосовуються комплекси підйимально-транспортних машин неперервної дії, що складаються з кількох видів обладнання різного функціонального призначення, які забезпечують виконання певних операцій технологічного процесу. Зокрема, такі комплекси є найбільш економічно ефективними засобами механізації на кар'єрах відкритого видобування корисних копалин, переробних виробництвах тощо, а також для виконання транспортно-розвантажувальних робіт і складування буряків на цукрових заводах. Спільним для цих комплексів є наявність підйимально-транспортувального обладнання, оснащеного стріловою конструкцією, яка утримується під заданим кутом за допомогою відтяжок, закріплених на вантовій опорі. На стрілі улаштовано стрічковий конвеєр, який здійснює транспортування вантажу.

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) досягає довжини 200 м, «Тепова ТАКРАФ» (Німеччина) - 195 м, заводу «Азовмаш» - 190 м, «Фамак» (Польща) – до 150 м, а швидкість стрічки конвеєра – 7...9 м/с. Вантажопотоки, що надходять на стрічку конвеєра, характеризуються великою нерівномірністю і носять, як правило, випадковий характер. Коефіцієнт нерівномірності деяких вантажопотоків може досягати значень в межах 1,97...2,02 [1]. Зазначені режими транспортування також характерні для роботи конвеєра комплексу БУМ-65М2Б3-К. До того ж, через неврівноваженість обертових ланок трансмісійних ліній цього комплексу виникають механічні коливання, що створюють умови для втомного руйнування деталей і вузлів його механічної системи. На рис.1 наведена осцилограма вібрацій платформи оператора цього комплексу, що зареєстровані за допомогою вібрографа ВР-1 [2].

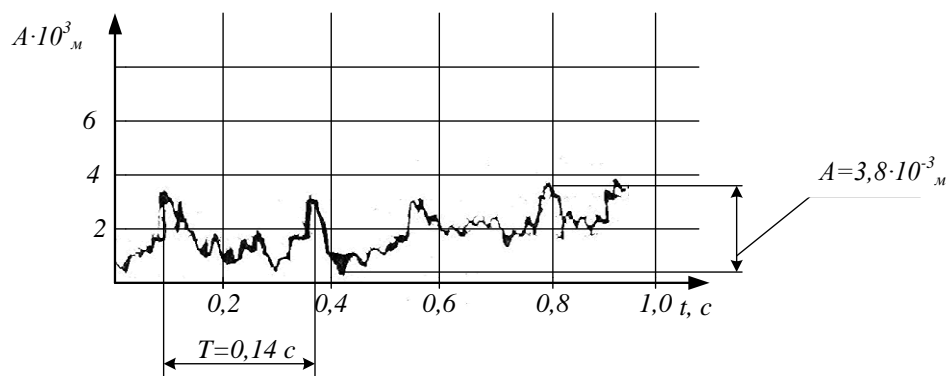


Рисунок 1 - Осцилограма вібрацій платформи оператора комплексу БУМ-65М2Б3-К.

З рисунка видно, що максимальна амплітуда коливань платформи досягає 3,8 мм, а основна частота коливань становить близько 7 Гц.

Транспортування нерівномірно розосередженого на стрічці вантажу супроводжується дією змінних у часі інерційних навантажень на стрілову конструкцію, що спричиняє виникнення вимушених коливань несівної конструкції стріли.

За таких умов важливого значення набувають питання довговічності і надійності машин, що входять в технологічний комплекс. Вихід з ладу будь-якого агрегату викликає простоювання всього комплексу, що призводить до значних втрат на виробництві.

Розв'язання цієї проблеми за рахунок збільшення запасу міцності призводить до збільшення початкової вартості машини, а отримувані при цьому масо-інерційні параметри машини виявляються необґрунтовано завищеними. Слід зазначити, що в деяких випадках збільшення маси вузлів і уявне, на перший погляд, збільшення міцності не тільки не приводить до підвищення надійності машини, але й до її зменшення. Так, збільшення площі поперечного перерізу канату 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 розрахункові втомні напруження не зменшаться, а, навпаки, збільшаться [3].

Більшість агрегатів, з яких складаються комплекси, є коштовними підйомально-транспортними машинами, а 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 ванти зі стрілою на поверхні несучих ланок з'являються тріщини і для підвищення міцності ці місця підсилюються шляхом наварювання пластин на пошкоджених поверхнях.

У сучасних інженерних розрахунках не розглядається вплив тривалої експлуатації на механічні властивості, проте, у низці наукових праць автори стверджують, що за таких умов механічні властивості конструкцій деградують [4,5,6]. Крім того, небезпечними є процеси корозійного розтріскування під напруженням металоконструкцій. І хоча середня швидкість корозії є незначною, локальні ураження матеріалу є доволі небезпечними і становлять одну з основних причин руйнування несівних елементів металоконструкції.

Тому для оцінювання технічного стану тривало експлуатованих 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

проаналізувати їх роботоздатність і використовувати отримані результати у відповідних інженерних розрахунках.

У даній статті розглядаються результати досліджень впливу тривалої експлуатації (близько 30 років на Барському цукровому заводі, Вінницька обл.) буртоукладника БУМ-65М2Б3-К на зміну механічних властивостей матеріалу (характеристики міцності та пластичності) і на корозійне розтріскування від напруженням матеріалу стріли, виготовленої із профільної сталі Ст.3.

Встановлено [7, 8, 9], що найбільшою мірою проявляються ці явища в елементах конструкцій з максимальним напруженням.

На рис. 2 зображена 3D модель стріли укладального конвеєра, яка

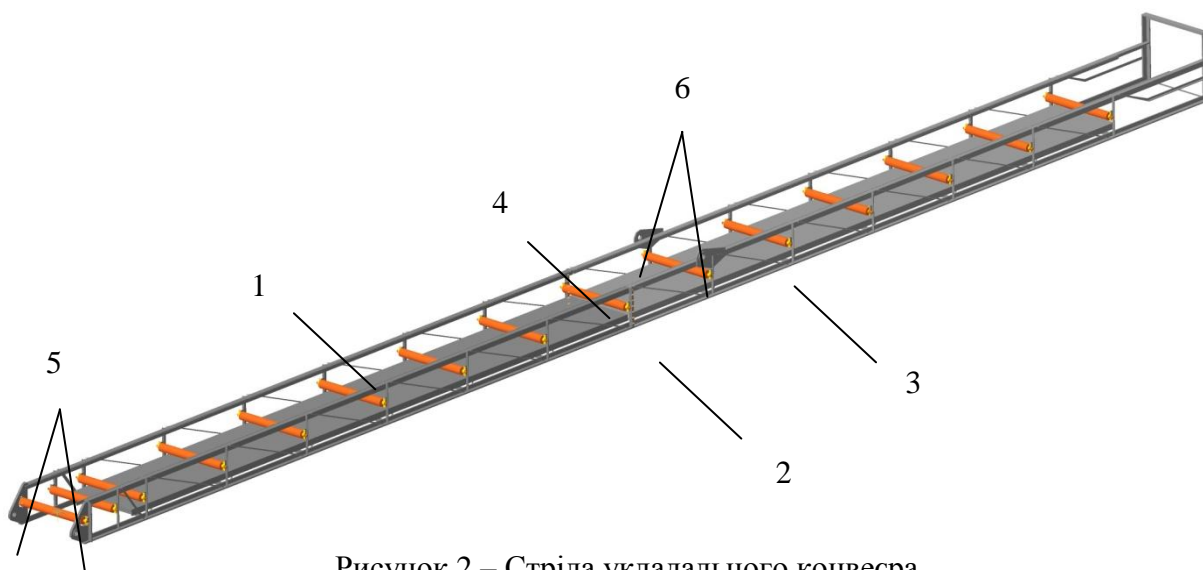


Рисунок 2 – Стріла укладального конвеєра

складається з верхнього 1 та нижнього 2 поясів, скріплених поперечними стійками 3 та відкосами 4. Верхній та нижній пояси виготовлено з рівнополичного кутника L50-5, а стійки та відкоси - з L32-3 (ДСТУ 2251-93 (ГОСТ 8509-93)), які утворюють стрижневу систему стріли. Кріпиться стріла до булоукладника за допомогою шарнірного з'єднання 5, а до пілона – через відтяжки шарнірами 6 і, таким чином, встановлюється під кутом 16° до горизонту.

Аналіз напруженого стану проводився методом скінченних елементів із застосуванням обчислювального комплексу APM Structure 3D пакету APM Win Machine. Після виконання статичного розрахунку отримано карти напружень деформованого стану конструкції (рис. 3), за допомогою яких встановлено числові значення напружень у стрижнях. Розглядалися три випадки навантаження конвеєра: рівномірно розподілене по стрічці (рис. 3,а); збільшене у півтора рази щодо номінального (рис. 3,б); збільшене у 2 рази щодо номінального (рис. 3,в).

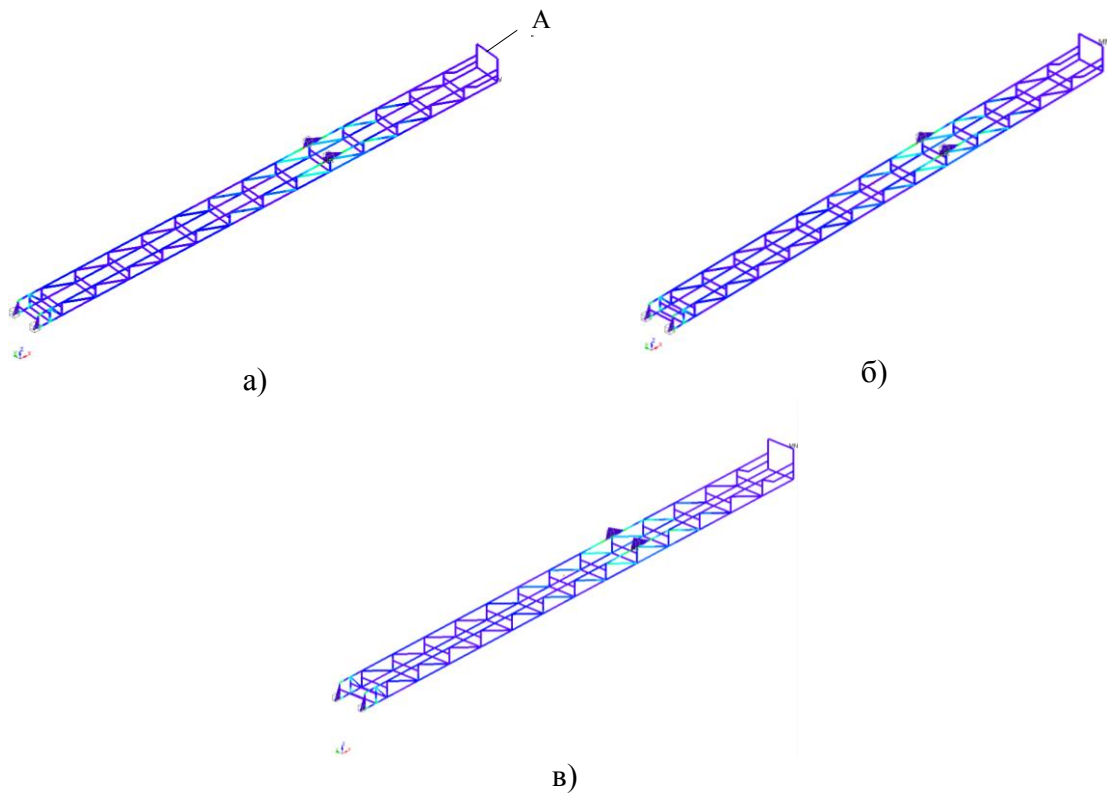


Рисунок 3 – Напружений стан стріли конвеєра
 (а - номінальне навантаження 1т; б - навантаження 1,5т; в - навантаження 2т)
 Встановлено, що найбільші значення напружень виникають у стрілі в місці кріплення відтяжок до шарнірів б.

На рис. 4 зображено вісім основних стрижневих елементів конструкції .

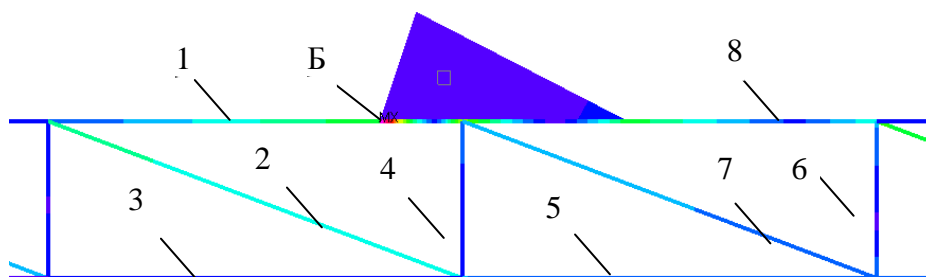
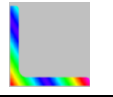
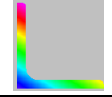
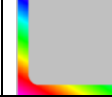
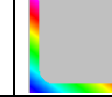
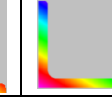
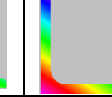
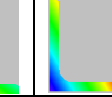
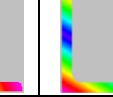
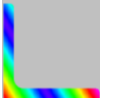
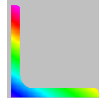
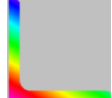
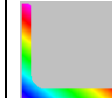
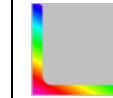
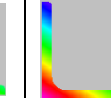
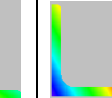
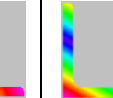
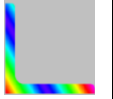
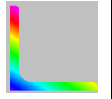
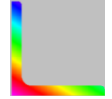
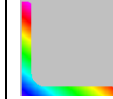
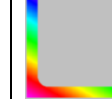
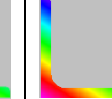
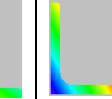
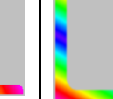


Рисунок 4 – Зона найбільших напружень в стрижнях конструкції

Максимальні значення напружень у стрижнях наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Максимальні напруження у перерізах стрижнів

Навантаження 1т								
	№ стрижня							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Максимальне значення, МПа	119,5	33,57	10,85	9,486	21,73	9,134	25,26	41,69
Напруження у перерізі								
Навантаження 1,5т								
	№ стрижня							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Максимальне значення, МПа	255,9	87,15	23,02	40,42	48,77	40,64	59,51	97,72
Напруження у перерізі								
Навантаження 2т								
	№ стрижня							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Максимальне значення, МПа	322,7	92,02	28,24	43,08	59,67	61,74	68,11	122
Напруження у перерізі								

Найменші (близькі до нуля) напруження виникають у поперечному стрижні (точка А, рис.3,а) відвантажувальної частини стріли, а найбільші – у стрижні 1 (точка Б, рис.4) верхнього пояса 1 (рис.2).

Досліджували складові елементи металоконструкції стріли, у яких напруження досягають свого екстремуму: ВР - вертикально розміщена в перерізі поличка кутника поперечного стрижня верхнього пояса стріли з найменшим діючим напруженням, ГР – горизонтально розміщена поличка кутника цього ж стрижня; ВН – вертикально розміщена в перерізі поличка кутника стрижня 1 верхнього пояса стріли з найбільшим діючим напруженням, ГН – горизонтально розміщена поличка цього ж стрижня. Характеристики міцності та пластичності визначали на циліндричних зразках типу 1 і 2 (рис. 5) шляхом розтягу зі швидкістю деформації 10^{-5} мм·с⁻¹ та 10^{-6} мм·с⁻¹ на установці УВП–6 (рис. 6).

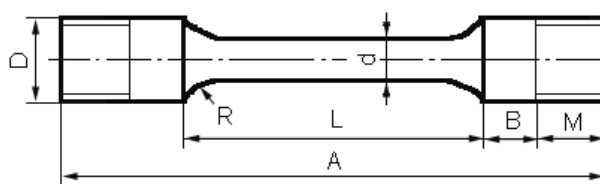


Рисунок 5 - Зразок для випробувань матеріалів на довготривалу корозійну міцність

Зразок типу 1 має такі розміри: $A = 80$ мм; $L = 40$ мм; $d = 4$ мм; $D = 6$ мм; $M = 10$ мм, а зразок типу 2 відрізняється лише розмірами $d = 3$ мм і $D = 4$ мм. Випробування проводили на повітрі та в середовищі синтетичного дощу з метою створення умов, наближених до експлуатаційних. Кислотний дощ утворюється, в основному, в результаті реакції між водою і такими забруднюючими речовинами, як діоксид сірки (SO_2) і різні оксиди азоту (NO_x). Аналіз атмосферних опадів у промислових регіонах України, в яких експлуатуються буртоукладники, показав, що рН такого дощу може досягати 4.4, а його усереднений хімічний склад є таким: $\text{H}_2\text{SO}_4 - 3,19$; $\text{Na}_2\text{SO}_4 - 3,2$; $\text{HNO}_3 - 1,58$; $\text{NaNO}_3 - 2,12$; $\text{NaCl} - 8,48$ [10,11]. 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.

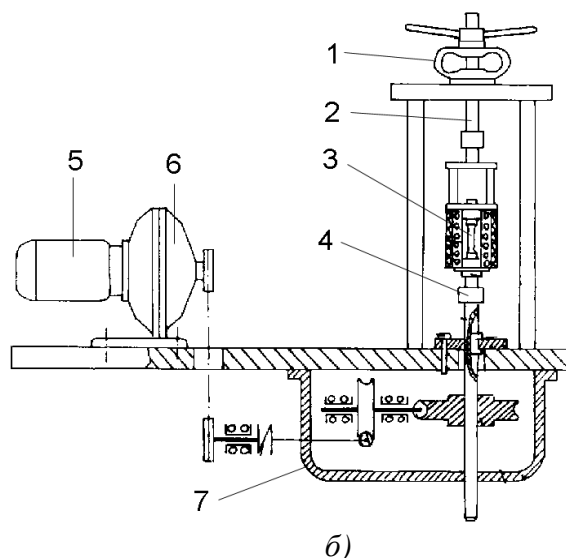


Рисунок 6 - Загальний вигляд (а) та кінематична схема (б) установки УВП-6:
 1 – динамометр; 2 – тяга верхня; 3 – зразок; 4 – тяга нижня; 5 – мотор-редуктор; 6 – ланцюгова передача; 7 – муфта; 8 – черв’ячна передача; 9 – черв’ячно-гвинтова передача

Таблиця 1 - Механічні властивості сталі Ст3

Сталь, елемент конструкції	Середо- вище	δ	ψ	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$V_{\text{деф.}}$
		%	%	МПа	МПа	мм/с
1	2	3	4	5	6	7
Ст3, ВР	повітря	25,15	66,94	420	252	10^{-5}
	синт. дощ	22,13	65,55	406	248	10^{-5}
Ст3, ГР	повітря	18,79	68,24	408	250	10^{-5}
	синт. дощ	16,92	66,00	386	242	10^{-5}
Ст3, ВН	повітря	18,92	64,01	440	298	10^{-5}
	синт. дощ	14,48	62,19	417	284	10^{-5}
1	2	3	4	5	6	7
Ст.3, ГН	повітря	12,17	61,97	457	356	10^{-5}
	синт. дощ	10,27	59,88	450	302	10^{-5}
Ст.3, ВР	повітря	22,16	65,24	420	246	10^{-6}
	синт. дощ	16,58	62,18	394	242	10^{-6}
Ст.3, ГР	повітря	18,24	63,12	406	240	10^{-6}
	синт. дощ	15,93	61,56	374	248	10^{-6}
Ст3, ВН	повітря	15,50	59,05	410	292	10^{-6}
	синт. дощ	12,25	52,00	408	287	10^{-6}
Ст3, ГН	повітря	10,86	62,04	462	336	10^{-6}
	синт. дощ	7,92	52,00	460	320	10^{-6}

Результати досліджень механічних характеристик зі швидкістю деформації 10^{-5} мм/с, які наведені в табл.1, показали, що в елементі конструкції ГР в обох випробувальних середовищах відбувається незначне зниження характеристик міцності та пластичності, яке прослідковується за характеристикою δ , порівняно з вихідним матеріалом елемента конструкції ВР (рис. 7 а, б). Характеристика ψ практично не змінилась (в межах похибки).

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

Для елемента конструкції ВН, пластичні властивості знизились на повітрі: δ на 25%; ψ на 4,4%, а у розчині синтетичного дощу відповідно на 35% та 5% 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

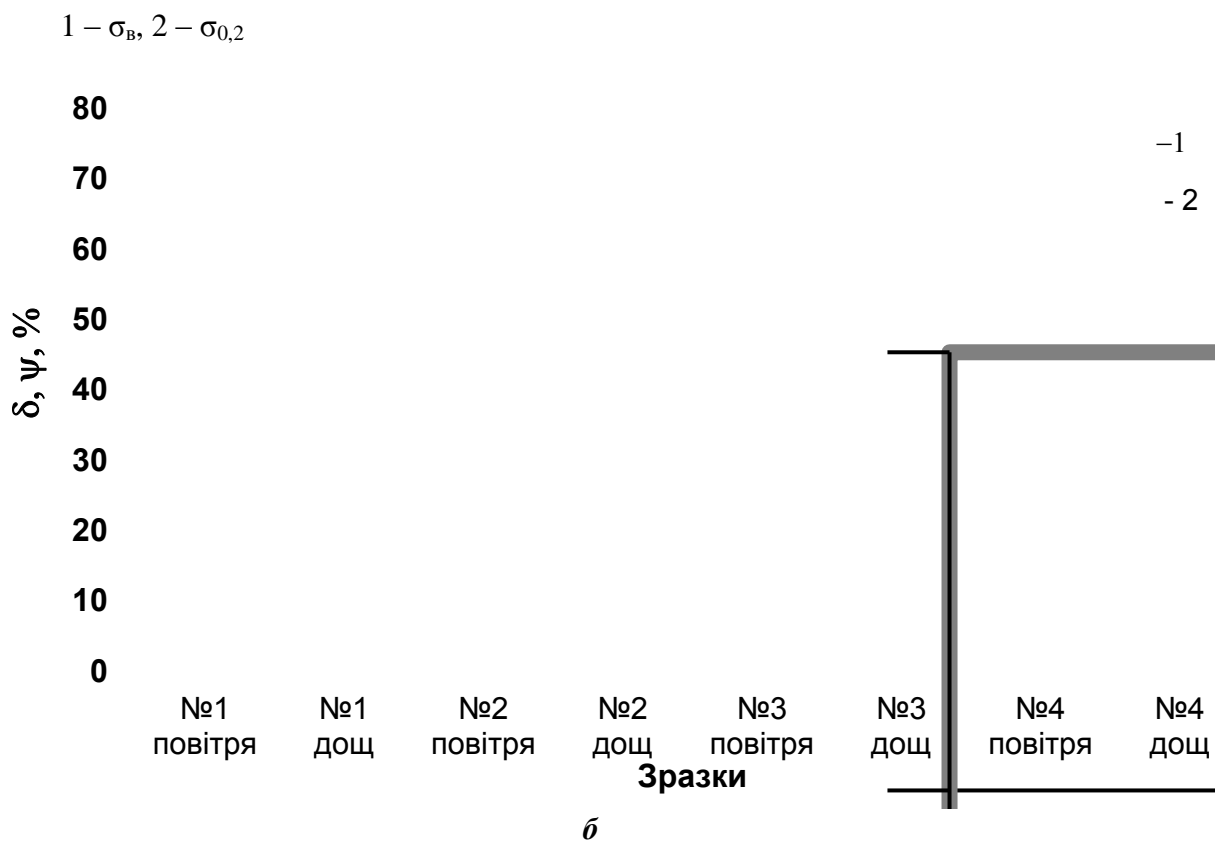
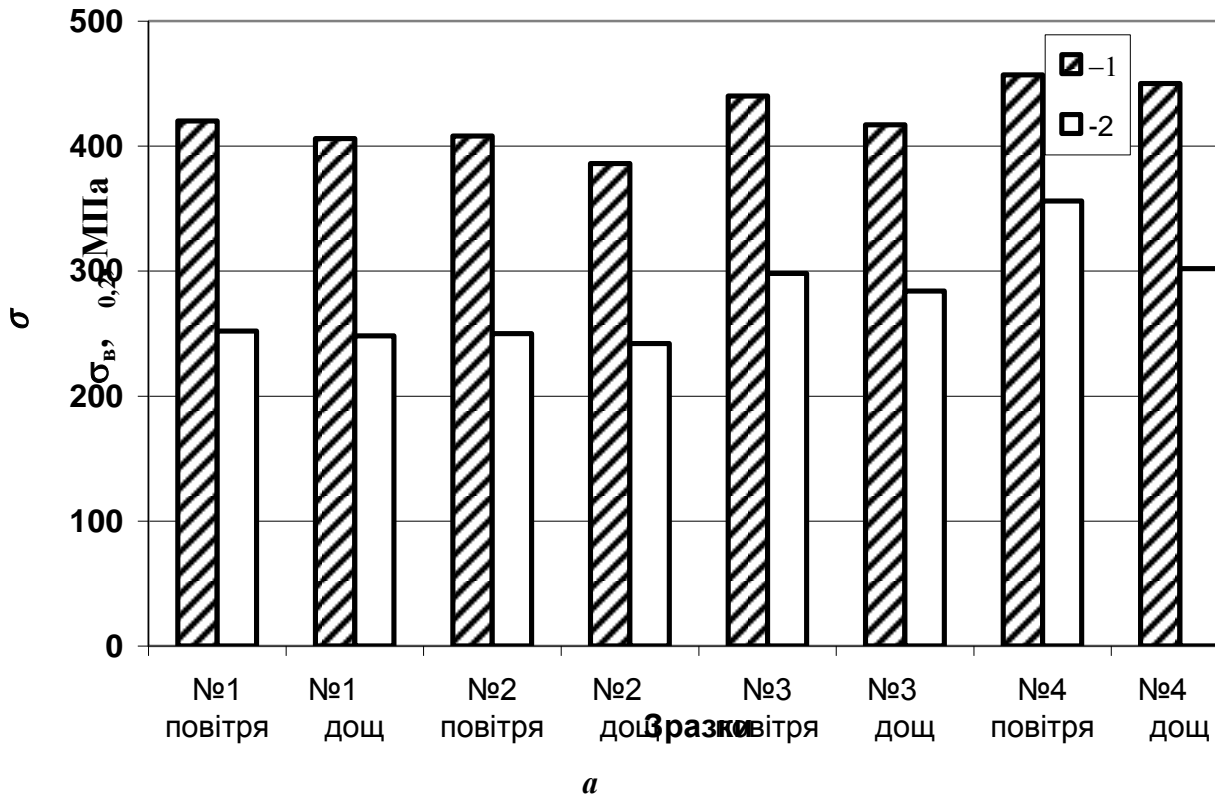


Рисунок 7. Міцність (а) та пластичність (б) різних елементів конструкції за деформації 10^{-5} мм/с на повітрі та в розчині синтетичного дощу. напружень може спричинити підвищений ризик до руйнування [10,11].

Випробування у розчині синтетичного дощу показали, що навіть за швидкості деформації (10^{-5} мм/с) 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 чинником, оскільки такі пошкодження можна розглядати як ефективні концентратори механічних напружень, від яких можливе зародження тріщиноподібних дефектів.

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).

За випробувань з меншою швидкістю деформації (10^{-6} мм/с) спостерігаються такі ж тенденції як і під час випробувань за деформації 10^{-5} мм/с: 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 δ та ψ знижуються відповідно на 51% і 5% у повітрі та на 52,2% і 6,4% у розчині синтетичного дощу порівняно з вихідним матеріалом.

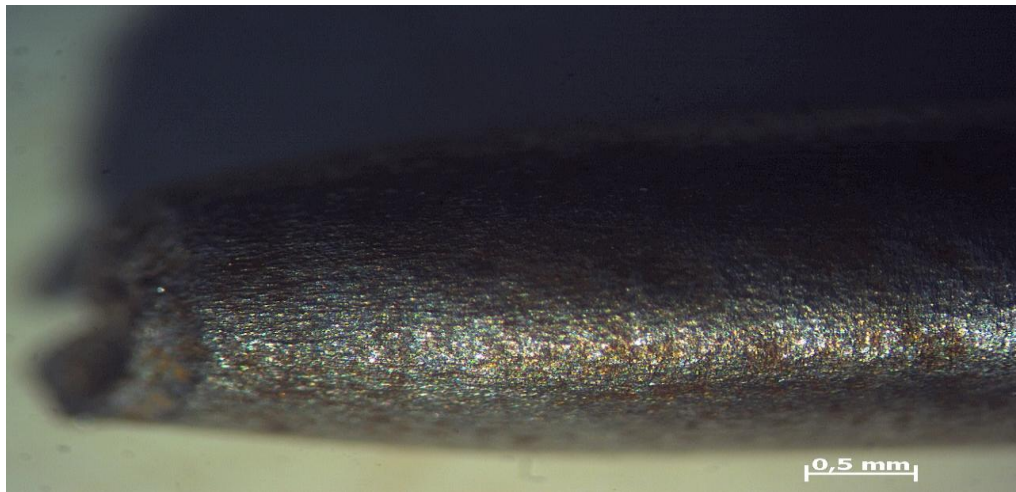
Оскільки зміни характеристик міцності та пластичності за різних швидкостей деформування (10^{-6} та 10^{-5} мм/с) практично не відрізняються, то ці швидкості дають можливість визначення максимального впливу



a

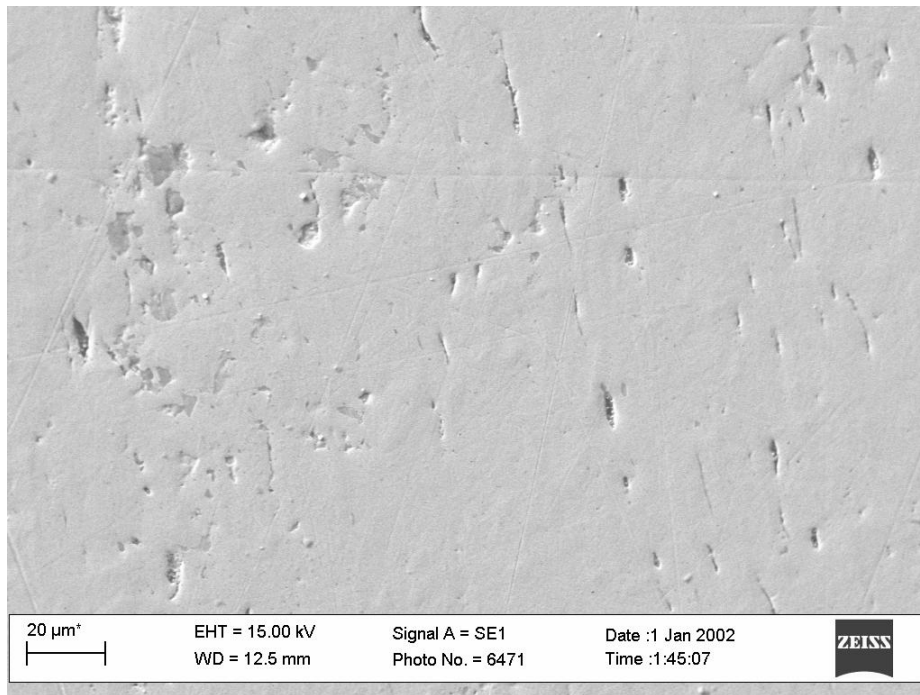


б

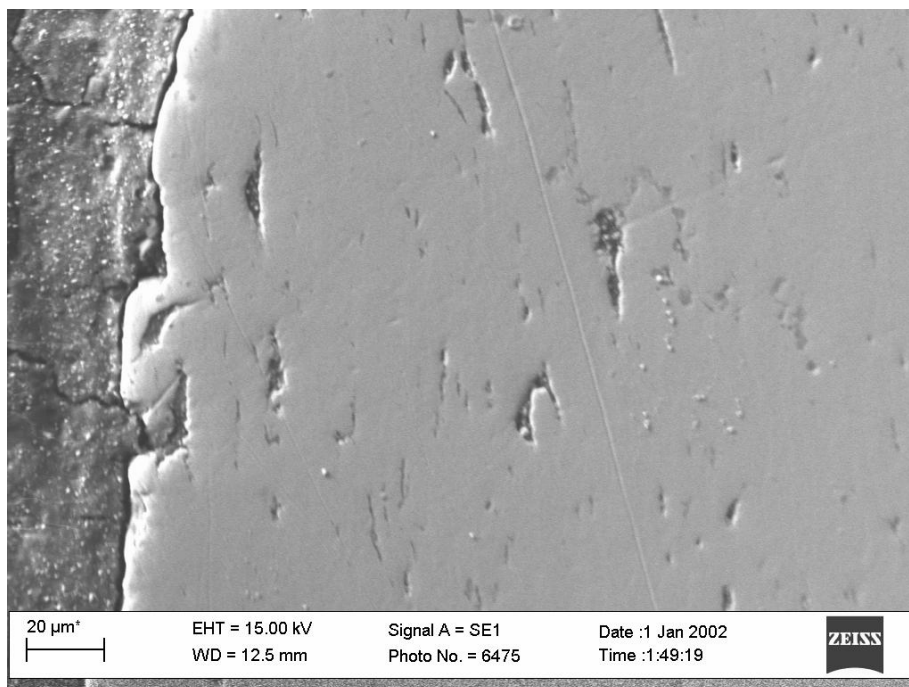


в

Рисунок 8 - Зразки після випробувань у середовищі синтетичного дощу:
a – зразок елемента конструкції ВР; *б* - зразок елемента конструкції ГН, *в* – зразок елемента конструкції ГН (збільшено)



a



б

Рисунок 9 - Пошкодження металу після випробувань у середовищі синтетичного дощу: а – вихідний матеріал;
б – зразок елемента конструкції ГН

Висновки

Встановлено, що після довготривалої експлуатації механічні властивості матеріалу складових елементів металоконструкції стріли буртоукладника зазнали змін порівняно з вихідним матеріалом: для елементів конструкції 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 є у елементах конструкції ГН найбільш навантаженої частини стріли.

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

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

Негативним явищем з точки зору довговічності та безпечної експлуатації є поява сітки поверхневих тріщин різного розміру та орієнтації на поверхні зразка елемента конструкції ГН.

Тому при визначенні залишкового ресурсу стрижневих металоконструкцій тривалої експлуатації необхідно враховувати деградацію механічних властивостей матеріалу, а також синергетичний вплив механічних чинників та іонної сили середовища, що значно прискорює корозійні процеси.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Спиваковский А.О. Теория ленточных конвейеров/ А.О. Спиваковский, В.Г. Дмитриев – М.: Наука, 1982.-187 с.
2. 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.
3. Панкратов С.А. Динамика машин для открытых горных и земляных работ – М.:Машиностроение, 1967.- 448 с.
4. Никифорчин Г. М., Студент О. З., Марков А. Д. Аномальный прояв високотемпературної деградації металу шва зварного з'єднання оццаднолегованої сталі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – 43, № 1. – С. 73–79.
5. (Nykyforchyn H. M., Student O. Z., and Markov A. D. Abnormal behavior of high-temperature degradation of the weld metal of low-alloy steel welded joints // Materials

- Science.
– 2007.– 43, № 1. – P. 77–84.)
6. 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. // *Mat. and Corr.* – 2009. – 60, № 9. – P. 716–725.
 7. Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyulnyk et al. // *Eng. Failure Analysis.* – 2010. – 17.– P. 624–632.
 8. Розрахунок залишкової довговічності тривало експлуатованої ділянки магістрального газопроводу / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара, О. Т. Цирульник, Л. І. Ниркова // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2012. – 48, № 2. – С. 103–110.
 9. (*Evaluation of the residual lifetime of a section of a main gas pipeline after long-term operation / O. E. Andreikiv, O. V. Nembara, O. T. Tsyul'nyk, L. I. Nyrkova // Materials Science.* – 2012. – 48, № 2. – P. 31–238.)
 10. Л. Хорват. Кислотный дождь / Пер с венг. В.В. Крымского. Под ред. Ю.Н. Михайловского.– М.: Стройиздат, 1990. – 80 с.
 11. Under-film corrosion of epoxy-coated galvanized steel An EIS and SVET study of the effect of inhibition at defect / I.M. Zin, S.B. Lyon, A Hussain // *Progress in Organic Coatings*, 52 (2005) 126-135.
 12. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: 4 т / Под общей ред. Панасюка В.В. - Киев: Наук. думка, 1990. – 680 с.
 13. Василенко И.И. Коррозийное растрескивание сталей / И.И. Василенко, Р.К. Мелехов – Киев: Наук. думка, 1977. – 265 с.

Поліщук Леонід Клавдійович - к.т.н., доцент кафедри металорізальних верстатів та обладнання автоматизованих виробництв Вінницького національного технічного університету.

Коваль Олег Олександрович - студент Вінницького національного технічного університету.