

УДК 621.311:621.882.626

## ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АРМАТУРИ ЗАЛІЗО-БЕТОННОГО БАЛКОВОГО ПРОГОНУ МОСТУ КІНЦЯ ХХ СТОРІЧЧЯ

А. Р. ДЗЮБИК<sup>1</sup>, А. А. ВОЙТОВИЧ<sup>1</sup>, О. З. СТУДЕНТ<sup>2</sup>,  
Л. В. ДЗЮБИК<sup>1</sup>, І. Б. ХОМИЧ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний університет "Львівська політехніка";

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Проаналізовано структуру, механічні властивості та фрактографічні особливості руйнування арматурної сталі 25Г2С із залізобетонних балок, експлуатованих ~40 років на центральному прогоні автодорожнього мосту. Встановлено, що жорсткі силові умови експлуатації прогону, розташованого на повороті автошляху, підсилені вібраційними навантаженнями від руху залізничного транспорту під ним та шкідливим впливом довкілля, інтенсифікували руйнування бетону на поверхні балок і посилили корозію арматури, порушивши когезію між бетоном та арматурою. Виявлено зменшення експлуатованої сталі поза регламентованим для неї діапазоном та незначну втрату пластичності, проте її ударна в'язкість стала вдвічі нижча, ніж рекомендоване значення. Руйнування прогону майже посередині довжини балки пов'язали з виявленим дефектом зварювання торців одного із прутків арматури та грубоголковою структурою ділянок перегріву в зонах термічного впливу навколо точок технологічних прихоплювань прутків зварюванням з ініціюванням від них крихкого руйнування відколом у максимально навантаженому перерізі балки.

**Ключові слова:** експлуатаційна деградація, арматурна сталь, структура, механічні властивості, особливості руйнування.

The structure, mechanical properties and fractographic features of 25Г2С steel for reinforced concrete beams after ~40 years of operation on the central span of a highway bridge are analyzed. It is shown that severe force conditions of operation of this bridge span located at a turn of a highway, intensified by vibration loads due to railway transport movement under it and harmful effects of the environment, facilitate the fracture of concrete on the surface of beams and intensify rebar corrosion breaking the cohesion between concrete matrix and reinforcement. The decrease in the exploited steel outside of the regulated range and a slight loss of plasticity are found. Its impact toughness is twice lower than the recommended value. The fracture of the bridge span beam almost in the middle of its length is associated with a detected defect in welding of the ends of one of the reinforcing bars and a coarse-acicular microstructure inside overheating areas in the heat-affected zones around technological spot of tack welding of the reinforcement with initiation of brittle cleavage fracture in the maximum loaded section of the beam.

**Keywords:** operational degradation, reinforcing steel, microstructure, mechanical properties, fractographic features of fracture.

**Вступ.** Проблема надійності експлуатації мостів спільна для багатьох країн світу. Зокрема, у США експлуатується близько 583 тисяч мостів. Серед них 235 тисяч – зі звичайного залізобетону, 108 тисяч – зі задалегідь напруженого, 200 тисяч – суто сталеві і близько 40 тисяч – із інших будівельних матеріалів [1]. Частка залізобетонних мостів становить 59%, а сталевих – 34%, і майже половину з них вважають ненадійними. У Російській Федерації на дорогах загального призначення експлуатується майже 42 тисячі мостів (з них 33,5 тисяч капітальні). Їх

Контактна особа: А. Р. ДЗЮБИК, e-mail: dar.lviv@gmail.com

загальна протяжність у 2000 р. становила ~1600 km і практично 95% з них залізобетонні або сталеві [2, 3]. В Україні всього близько 16 тисяч мостів різного підпорядкування. Хоча значна їх частина збудована 50–60 років тому, попри значне фізичне зношування і високу інтенсивність навантаження, половину з них продовжують експлуатувати [4]. Порівняно з європейськими містами (Будапештом, Лондоном, Прагою), які розташовані на берегах річок, в Україні мостів менше. Зокрема, якщо в європейських столицях один автомобільний міст припадає на 200–300 тисяч мешканців, то в Україні – один на мільйон. На сьогодні 86% залізобетонних мостів України відповідають 3–5-му стану з п'яти, що використовуються для оцінювання їх безпеки, але водночас всі вони експлуатувалися 45–48 років [5]. Це ознака надвисоких темпів втрати початкових функціональних властивостей елементів конструкцій та непомірного зростання найближчим часом витрат на ремонтні роботи.

Значна тривалість експлуатації, висока концентрація небезпечних для металу і бетону домішок у повітрі (особливо у промислово розвинених регіонах світу), надмірно висока інтенсивність експлуатації мостів призводять до їх пошкодження. Одна з найвідоміших техногенних катастроф у Європі – обвал у 2018 р. однієї з двох центральних опор віадукта разом з 200-метровим прогоном автомобільного мосту у Генуї заввишки 50 m, прийнятого до експлуатації в 1967 р. та реконструйованого у 2018 р. У момент руйнації мостом рухалося понад 30 автомобілів, внаслідок чого загинуло більше 40 людей [6]. Причому ні контроль стану мосту (у тому числі із використанням неруйнівних методів), ні ремонтні заходи виявилися недостатніми, щоб запобігти цьому.

Мости експлуатуються в різних кліматичних і екологічних зонах (залежно від географічного розташування та домінування сільськогосподарського чи промислового виробництва). Їх елементи зазнають впливу статичних (власна вага разом з рухомих транспортом) і динамічних (пориви вітру тощо) навантажень, кліматичних змін (сезонні та добові перепади температури та різні типи опадів), шкідливого довкілля в промислових регіонах (висока вологість у поєднанні з агресивними газами CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> тощо), мінеральних речовин і солі як засобу від ожеледиці, блукальних електричних струмів тощо. За сукупної дії цих чинників в них відбуваються інтенсивні корозійні процеси, внаслідок яких пришвидшується їх руйнування [7–11]. Спостерігається зародження та розвиток тріщин, які складно прогнозувати лише розрахунковими методами [12, 13]. Особливо це стосується металу зварних швів [14–16]. Все це враховують під час будівництва нових шляхопроводів, використовуючи останні технологічні досягнення про склад бетонних сумішей, антикорозійний захист металевих елементів, у тому числі арматури [17–22]. Розробляють також рекомендації щодо ремонту пошкодженого бетону зі застосуванням композиційних матеріалів, зокрема вуглецевих стрічок типу FibARM [23, 24], та оцінювання їх технічного стану, в тому числі з визначенням механічних характеристик металу арматури [25, 26]. Відомі результати випробувань елементів металевих мостів, споруджених наприкінці XVIII – початку XIX сторіч, які необхідні для оцінювання їх реального технічного стану [27–29]. Але відсутні системні дослідження механічних властивостей сталевих арматур після тривалої експлуатації в елементах конструкцій залізобетонних мостів.

Нижче визначено механічні властивості сталі після ~40 років експлуатації в елементі залізобетонного мосту і вивчено особливості її руйнування за дії активного одновісного розтягу та ударного навантаження, як необхідних передумов для обґрунтування доцільності ремонтних робіт з відновлення ділянок із пошкодженими прошарками бетону.

**Методи досліджень.** Для атестації властивостей арматурної сталі використали: твердість *HV*, заміряну на шліфованій поверхні осьового перерізу прутків

арматури; характеристики міцності  $\sigma_{UTS}$ ,  $\sigma_{YS}$  та пластичності  $\delta$ ,  $\psi$ , визначені з діаграм розтягу п'ятикратних гладких циліндричних зразків діаметром 5 mm осьової орієнтації на розривній машині УМЕ-10Т за швидкості деформування  $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ; ударну в'язкість  $KCV$ , оцінену на осьових зразках Шарпі, випробуваних на маятниковому копрі ІО-5003. Для металографічних досліджень структури сталі застосували оптичний мікроскоп Neophot 21, а для фрактографічного аналізу зламів зразків – сканівний електронний EVO-40XVP.

**Об'єкт досліджень.** Візуальним обстеженням прогонів автодорожнього мосту над залізничними коліями, введеного в експлуатацію на початку 80-х років минулого сторіччя, на окремих балках виявили пошкодження і бетону, і арматури з періодичним профілем діаметром 32 mm. Найчіткіше це проявилось по центру балок прогону, розташованого на максимальному вигині автошляху. Адже вібрації від руху залізничного транспорту та неминуче пригальмовування автомобілів на повороті дорожнього полотна створювали додаткові циклічні навантаження з високою асиметрією на елементи прогону, сприяючи їх пошкодженню. Прогін складався зі семи поздовжніх несучих балок з двома рядами (по шість у кожному) арматури, розташованих одна над одною по їх висоті. Під час обстеження об'єкта по центру прогону виявили оголені від бетону прутки арматури зі слідами корозії та частковою втратою їх когезії з бетоном. Більшість з них знаходилися у нижній частині по висоті балок, де розтягувальні навантаження максимальні. Частина з них, зокрема п'ять зі шести прутків арматури однієї з балок, зруйнувалися (рис. 1а), і їх злами чітко виділялися на фоні бетону (рис. 1б). У результаті міст виявився непридатним для експлуатації.

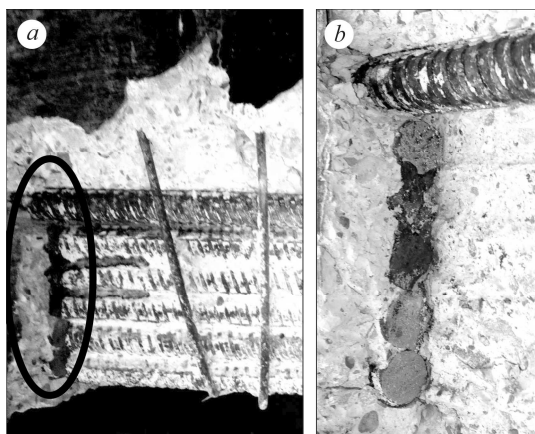


Рис. 1. Зона руйнування п'яти з шести прутків арматури (обведені еліпсоподібним контуром) (а), та вигляд експлуатаційно зруйнованих прутків арматури в перерізі однієї з балок центрального прогону залізобетонного автомобільного мосту (б).

Fig. 1. Fracture zone of five of the six reinforcing bars (enclosed in an ellipsoidal contour) (a), a view of operational failure of reinforcing bars in the section of one of the beams in the central span of a reinforced concrete highway bridge (b).

Макрофрактограми зруйнованих прутків арматури свідчать, що руйнування спричинило неякісно виконане зварне з'єднання торців двох частин третього знизу прутка арматури (рис. 2а), внаслідок чого на його зламі зафіксували сліди зашлаковування звареного перерізу і залишки розчину бетону на ньому. Це послабило загальну здатність перерізу балки витримувати навантаження і зумовило руйнування спочатку двох прутків арматури знизу від звареного прутка, а далі і тих, що зверху від нього, за крихким механізмом з характерними гребенями макроріздколу, які віялом поширювалися від осередку зародження руйнування від дефекту зварювання (вліво і вправо на рис. 2а, б). Зрозуміло, що руйнування шостого прутка – справа часу, адже всі інші (окрім з дефектним зварним з'єднанням) зруйнувалися по основному металу, але на їх зламах виявили сліди технологічних прихоплень зварюванням, які ослабили їх поперечний переріз і стали осередками руйнування крихким відколом (рис. 2с).

Таким чином, основною причиною аварійності балок одного з прогонів автодорожнього мосту стали декілька чинників. Перш за все, це пошкодження бетону з вільним доступом води і пари до арматури через несвоєчасне діагностування технічного стану елементів мосту та їх ремонту. По-друге, неякісне електродугове зварювання торців одного з прутків арматури та зварювання з високою погонною енергією для технологічної фіксації прутків на відповідних для них місцях шляхом прихоплення, що послабило утримувальну здатність їх перерізів, а отже, викликало руйнування балки загалом. І, по-третє, можливі перевантаження, пов'язані з інтенсивним рухом автотранспорту мостом.

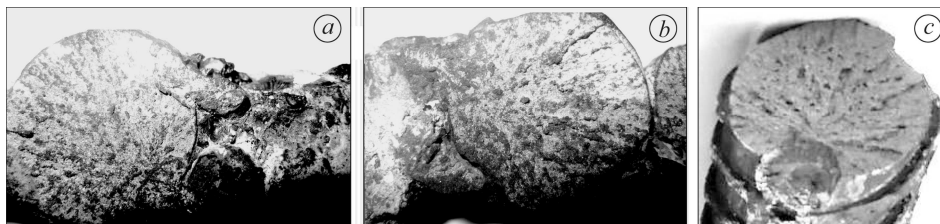


Рис. 2. Макрофрактограма експлуатаційного зламу в околі осередку зародження руйнування від неякісно зварених торців одного з прутків арматури (a, b) та слід від технологічного прихоплення на зламі іншого прутка (c).

Fig. 2. Macrofractogram of the operational fracture of a beam in the vicinity of the fracture origin from poorly welded ends of one of the reinforcing bars (a, b) and the trace of tack welding on the fracture surface of another of the reinforcement bar (c).

**Результати та їх обговорення.** Металографічні дослідження структури арматурної сталі та різних зон зварного з'єднання виявили практично однорідну дрібнодисперсну ферит-перлітну структуру основного металу (рис. 3a), грубо голкову на ділянці перегріву зони термічного впливу (ЗТВ) (рис. 3b) та практично феритну з дрібними ділянками перліту вздовж їх меж та великою кількістю дрібних пор поблизу металу шва (МШ) (рис. 3c).



Рис. 3. Структура експлуатованої арматурної сталі (a), зони термічного впливу на ділянці перегріву (b) та металу шва між двома торцями прутків арматури (c).  $\times 250$ .

Fig. 3. Structure of exploited reinforcement steel (a), the heat-affected zone in the overheating area (b) and weld metal between two ends of the reinforcement bars (c).  $\times 250$ .

Найнебезпечнішим для прутків арматури всередині бетону виявилися зварні з'єднання. Пов'язано це з голковою морфологією складників у зоні перегріву ЗТВ, які слугували гострими структурно обумовленими концентраторами напружень. Тому прутки арматури із технологічними прихоплюваннями зварюванням руйнувалися саме в цій зоні.

**Механічні властивості арматурної сталі.** Згідно з результатами, отриманими на оптичному іскровому атомно-емісійному спектрометрі SPECTROMAX LMF 0,5, за хімічним складом експлуатована арматурна сталь відповідала сталі 25Г2С (mass%: 0,25 C; 0,7 Si; 1,4 Mn; 0,03 S; 0,03 P; 0,1 Ni; 0,1 Cr; 0,05 Cu). Вуглецевий еквівалент  $C_{eq} \leq \%C + 0,17\% Mn + 0,1\% Si$  для зварюваної пруткової

арматури з малолегованої сталі класу А-III (А400) має бути не нижчим за 0,62 [30]. У нашому ж випадку він становив 0,56.

Механічні властивості цієї сталі за розтягу (див. таблицю) задовольняли вимоги документа [30]. Але після експлуатації в балці мосту обидві характеристики міцності сталі (границі міцності  $\sigma_{UTS}$  та плинності  $\sigma_{YS}$ ) знизились відповідно на 4 і 21%, а характеристики пластичності (відносні видовження  $\delta$  та звуження  $\psi$ ) – на 0,5 та 5%. Як наслідок характеристики міцності вийшли за межі регламентованих значень [25]. Проте ударна в'язкість  $KCV$  експлуатованої сталі зменшилася найбільше.

**Механічні властивості сталі 25Г2С**

Сталі	Механічні властивості*				$KCV / KCU$
	$\sigma_{UTS}$	$\sigma_{YS}$	$\delta$	$\psi$	
	МПа		%		
Експлуатована	638	336	28	57	0,46 / –
Вихідна	665	425	29	60	– / 1,37
Згідно з вимогами ГОСТ 5781-82	660...680	420...435	25...29	–	– / 1,35

\*Середнє значення п'яти випроб.

Відома емпірична формула  $KCU = 1,25 \cdot KCV$ , яка пов'язує ударну в'язкість на зразках Менаже ( $KCU$ ) та Шарпі ( $KCV$ ) і встановлена для сталей труб аміакопроводів у вихідному стані [31]. Подібне співвідношення  $\alpha = KCU / KCV$  підтверджено також для неексплуатованих сталей парогонів і їх зварних з'єднань, для яких значення  $\alpha$  змінювалося від 1,2–1,3 за випроб зразків з основного металу, металу ЗТВ і МШ осьової орієнтації і досягало 1,38 для зразків, орієнтованих в радіальному і тангенціальному напрямках [32]. Отже, емпірично встановили, що значення  $KCU$  неексплуатованих сталей щонайбільше на 40% перевищують значення  $KCV$ . І це пов'язано з тим, що значення  $KCU$  інтегрально характеризують енерговитрати на зародження тріщини від дна U-подібного надрізу і на її поширення до руйнування. Тоді як значення  $KCV$  – в основному енерговитрати на поширення руйнування від гострого V-подібного концентратора. Для експлуатованої теплотривкої сталі різниця між ними зросла до 2,5 разів [32]. Підвищивши значення  $KCV$  для експлуатованої арматурної сталі на 50%, вирахували значення  $KCU$ , яке становило  $0,69 \text{ MJ/m}^2$ , тобто було вдвічі меншим за регламентоване. Отже, внаслідок експлуатації арматурна сталь істотно втратила здатність чинити опір крихкому руйнуванню, який не досягає регламентованого значення  $KCU$ . Зрозуміло, що жорсткі силові і температурні умови експлуатації сприятимуть її крихкому руйнуванню від будь-яких дефектів, зумовлених чи порушенням технології зварювання, чи такими чинниками, як структурний (крупногolkова морфологія складників на ділянці перегріву ЗТВ), чи корозійно-водневий за появи доступу вологи до арматури [33]. Адже, що нижча ударна в'язкість експлуатованої сталі, то вона чутливіша і до водневої, і низькотемпературної крихкості [34].

Крім того, за результатами випроб встановили, що зразки зі зварним з'єднанням руйнувалися на ділянці перегріву в ЗТВ. Причому їх границя міцності була в діапазоні 510...535 МПа, тобто була ще нижчою, ніж для основного металу (ОМ). Таке відхилення від значень  $\sigma_{UTS}$  ОМ значно перевищило допустиме в 50 МПа [35]. Тому зрозуміло, чому саме зварні з'єднання арматурних прутків є найслабшими елементами залізобетонних балок пошкодженого прогону.

Заміри твердості сталі за Вікерсом в осьовому перерізі зразка зі зварним з'єднанням після випроб на розтяг виявили, що МШ мав найнижчу (через менший вміст вуглецю у литій структурі), а ЗТВ – найвищу (внаслідок перегріву з

ослабленням меж зерен та формуванням голкоподібної морфології складників у цій зоні, які ставали структурними концентраторами напружень) твердість  $HV$  (рис. 4). Зразок руйнувався в місці переходу валика підсилення шва до прутка арматури (тобто у перерізі з концентратором напружень, але все ще на ділянці ЗТВ у приповерхневому прошарку арматури, окриженому перегрівом під час нанесення валика).

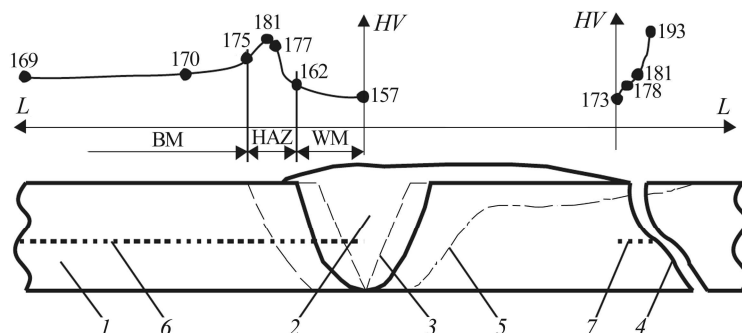


Рис. 4. Розподіл значень твердості  $HV$  поперек зварного з'єднання, оцінений в осьовому перерізі двох зварених між собою арматурних прутків, зруйнованих за випроб розтягом: 1 – арматура; 2 – метал шва; 3 – підготовлені під зварювання краї арматури; 4 – профіль зламів зразка; 5 – зона термічного впливу; 6, 7 – лінії вимірювання твердості поперек зварного шва та в околі зламів зразка. Цифри біля точок відповідають твердості за Вікерсом.

Fig. 4. Distribution of hardness  $HV$  values across the welded joint, estimated in the axial section of two reinforcement bars, the ends of which are welded under tension: 1 – reinforcement; 2 – weld metal; 3 – edges of reinforcement, prepared for welding; 4 – specimen fracture profile; 5 – heat affected zone; 6, 7 – lines of hardness measuring across the weld and in the vicinity of the specimen fracture surface. The numbers near the points correspond to the Vickers hardness.

**Фрактографічний аналіз зламів зразків з експлуатованої арматури.** Злам зразка на розтяг на макрорівні мав типову морфологію типу чашка-конус. За вищої роздільної здатності в центрі зламу в межах феритних зерен виявили характерні ознаки в'язкого руйнування із рівновісних ямок, на дні яких чітко виділялися неметалеві включення завбільшки  $1...5 \mu\text{m}$  (рис. 5a). Рельєф, який формувався на місці перлітних зерен, залежав від орієнтації ламелей цементит-феритної структури до прикладених ззовні напружень. За осьової їх орієнтації на зламі навколо часточок цементиту спостерігали рівновісні і дуже дрібні ямки (до  $0,5 \mu\text{m}$  діаметром). За відхилення від неї на зламі з'являлись витягнені часточки цементиту, феритні перетинки між якими витягувалися аж до руйнування, формуючи обумовлену ламелярною структурою текстуру в межах перлітних зерен (рис. 5a). На ділянці конусної частини зламу ямки навколо неметалевих включень були більшими і глибшими та мали витягнену форму з характерними слідами виходу смуг ковзання на їх поверхню (рис. 5b). Водночас навколо цементиту в перліті вони були дещо більшими, ніж у центрі зламу, і залишалися практично рівновісними. Це значить, що деформація зсувом на кінцевому етапі руйнування зразка, суттєво змінивши морфологію великих ямок, практично не вплинула на геометрію дрібних.

На зламі зразка експлуатованої сталі випробовуваного на ударну в'язкість лише в околі дна надрізу виявили невеликі (до  $100 \mu\text{m}$ ) ділянки в'язкого руйнування з формуванням спочатку параболічних ямок за механізмом зсуву (рис. 5c), а потім – рівновісних за механізмом відриву, які відразу змінилися на фасетки крихкого кризьзеренного відколу з характерними річковими візерунками гребенів відриву на

їх поверхні, орієнтація яких змінювалася за переходу від зерна до зерна (рис. 5d). Таким чином, фрактографічно підтвердили наднизький опір крихкому руйнуванню експлуатованої сталі.

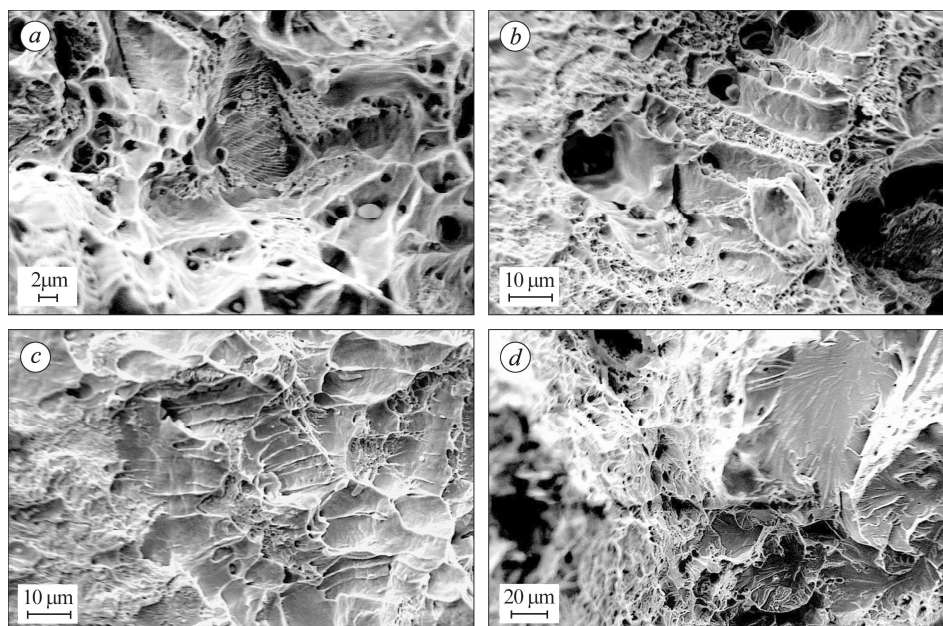


Рис. 5. Фрактограми арматурної сталі 25Г2С після тривалої експлуатації, отримані на центральній (а) і конічній (b) частинах поверхні зламу зразка, випробуваного на розтяг, а також поблизу надрізу (c) і в зоні переходу від в'язкого до крихкого руйнування на етапі спонтанного руйнування (d) зразка для випробувань на ударну в'язкість.

Fig. 5. Fractograms of the 25Г2С reinforcement steel after long-term operation, obtained in the central (a) and the conical (b) parts of the fracture surface of the tensile specimen, as well as near the notch (c) and in the area of spontaneous fracture under transition from ductile to brittle fracture (d) during impact testing of the specimen.

## ВИСНОВКИ

Встановлено, що внаслідок понад сорокарічної експлуатації арматурної сталі 25Г2С в балці одного з прогонів залізобетонного автодорожнього мосту відбулось її зменшення, незначна втрата пластичності та двократна опору крихкому руйнуванню, що не задовольняло регламентоване для неї значення. Виявлено причину пошкодження однієї з балок прогону через викришування зовнішнього прошарку бетону, оголення дефекту зварювання пари торців одного із арматурних прутків балки та грубоголкуву структуру ділянок перегріву в зонах термічного впливу навколо точок технологічних прихоплювань прутків зварюванням, які ініціювали крихке руйнування відколом в чотирьох з п'яти прутках зруйнованого прогона мосту арматури з подальшим пошкодженням балки майже по центру її довжини.

1. [www.nace.org/publicaffairs](http://www.nace.org/publicaffairs)
2. Овчинникова Т. С., Маринин А. Н., Овчинников И. Г. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций // Интернет-журн. "Наукоеведение". – 2014. – Вып. 5 (24). <http://naukovedenie.ru>
3. Защита от коррозии металлических и железобетонных мостовых конструкций методом окрашивания/ И. Г. Овчинников, А. И. Ликверман, О. Н. Распоров, Е. С. Иванов, В. М. Мезенов, И. И. Овчинников. – Саратов: Изд-во "Кубик", 2014. – 504 с.

4. Виступ міністра інфраструктури В. Омеляна в ефірі телекомпанії “Україна 112” від 15 серпня 2018 р. <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/2518368-omelan-skazav-skilki-v-ukraini-avarijnih-mostiv.html>
5. Давиденко О. О. Оцінка технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів // Автомобільні дороги. – 2014. – № 1 (237). – С. 29–34.
6. <https://uk.wikipedia.org/wiki>
7. Макаров В. Н., Овсянников С. В., Овчинников И. Г. Антикоррозионная защита мостовых сооружений. – Саратов: Издат. центр “Наука”, 2007. – 192 с.
8. Residual strength of the overhead section of a main pipeline with annular cracks / A. R. Dzyubyk, L. V. Dzyubyk, G. V. Pokhmurs'ka, and I. A. Prokopyshyn // Materials Science. – 2019. – **54**, № 6. – P. 855–865. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00273-4>.  
(Залишкова міцність надземної ділянки магістрального трубопроводу з кільцевими тріщинами / А. Р. Дзюбик, Л. В. Дзюбик, Г. В. Похмурська, І. А. Прокопишин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 6. – С. 93–101.)
9. Influence of corrosive hydrogenating media on the residual service life of structural elements in the maneuvering mode of operation / O. E. Andreikiv, V. R. Skal's'kyiI, Ya. Dolins'ka, and A. R. Dzyubyk // Materials Science. – 2018. – **54**, № 1. – P. 61–68. <http://dx.doi.org/10.1007/s11003-018-0158-3>.  
(Вплив корозивно-наводнювальних середовищ на залишковий ресурс елементів конструкцій за їх маневрового режиму експлуатації / О. Є. Андрейків, В. Р. Скальський, І. Я. Долінська, А. Р. Дзюбик // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 1. – С. 64–70.)
10. Hredil M. I. and Toribio J. Corrosion resistance of prestressing steel wires // Materials Science. – 2015. – **50**, № 5. – P. 39–45.  
(Hredil M. I. and Toribio J. Corrosion resistance of prestressing steel wires // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 5. – С. 39–43.)
11. Hredil M. Peculiarities of bond strength degradation in reinforced concrete induced by accelerated electrochemical methods // Proc. Struct. Integrity. – 2018. – **13**. – P. 1657–1662.
12. Calculation of trajectories and the rate of growth of curvilinear fatigue cracks in isotropic and composite plates / H. Pokhmurska, O. Maksymovych, A. Dzyubyk, and L. Dzyubyk // Proc. IOP Conf. Mater. Sci. and Eng. – 2018. – 373. 012024. – P. 1–13. DOI: 10.1088/1757-899X/373/1/012024.
13. Ensuring the specified position of multisupport rotating units when dressing mineral resources / A. Dzyubyk, A. Sudakov, L. Dzyubyk, and D. Sudakova // Mining of Mineral Deposits. – 2019. – 13(4). – P. 91–98. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.091>.
14. Osadchuk V. A., Tsybalyuk L. I., and Dzyubyk A. R. Determination of the triaxial distribution of residual stresses in welded joints of structural elements with rectilinear seams and estimation of their influence on joint strength in the presence of crack-type defects // J. Math. Sci. – 2012. – **183**, № 2. – P. 150–161.
15. Specific features of the fatigue fracture of welded joints of 34KhN2MA steel formed by electrodes with different phase compositions / A. R. Dzyubyk, A. A. Voitovych, L. V. Dzyubyk, and L. O. Babii // Materials Science. – 2018. – **54**, № 2. – P. 215–222. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0176-1>.  
(Особливості втомного руйнування зварних з'єднань сталі 34ХН2МА, сформованих електродами різного фазового складу / А. Р. Дзюбик, А. А. Войтович, Л. В. Дзюбик, Л. О. Бабій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 2. – С. 75–81.)
16. Dzyubyk A. R. Welded joints on 34KhN2MA steel produced from electrodes with various phase compositions // Materials Science. – 2020. – **56**, № 2. – P. 203–209. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00416-y>.  
(Дзюбик А. Р. Ударна в'язкість зварних з'єднань зі сталі 34ХН2МА, виконаних електродами різного фазового складу // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2020. – **56**, № 2. – С. 60–66.)
17. Suvash C. P. and Adewumi J. B. A review on reinforcement corrosion mechanism and measurement methods in concrete // Civil Engin. Res. J. – 2018. – **5**, № 3. – P. 80–90. DOI: 10.19080/CERJ.2018.05.555661.
18. Concrete Durability and Steel Corrosion // Spec. Iss.: “Advances in Materials Science and Engineering” / Eds. S.-J. Kwon, H.-S. Lee, B. Shafei, Y. Wang, and V. Saraswathy. – Vol. 2016. – Hindawi Publishing Corporation, 2016. – 189 p. DOI:10.1155/2016/3658208.
19. Microscopic analysis of steel corrosion products in seawater and sea-sand concrete / Gang Wang, Qing Wu, Xue-Zhong Li, Jun Xu, Yao Xu, Wen-Hao Shi, and Shi-Lin Wang // Materials. – 2019. – 12 (20), 3330. DOI:10.3390/ma12203330.



20. *İlker Bekir Topçu and Arda Uzunömeroğlu*. Properties of corrosion inhibitors on reinforced concrete // *J. Struct. Engin. & Appl. Mech.* – 2020. – **3**, № 2. – P. 93–109.  
DOI:10.31462/jseam.2020.02093109.
21. *Hredil M. I.* Express method for the evaluation of the effect of corrosion of reinforcement on the integrity of reinforced concrete // *Materials Science.* – 2013. – **49**, № 3. – P. 394–397.  
(Греділь М. І. Експрес-методика оцінювання впливу корозії арматури на цілісність залізобетону // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2013. – **49**, № 3. – С. 102–104.)
22. *Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Use in Florida Structural Applications* FDOT / Kyle A., Christopher C. Ferraro, Trey Hamilton, Joel Harley, Raid S. Alrashidi, Megan Voss, Daniel Alabi // Report Contract Number: BDV31 977-105, The Florida Department of Transportation Research Center, 2020.
23. *Шилин А. А., Пшеничный В. А., Кармузов Д. В.* Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами. – М.: Стройиздат, 2004. – 144 с.
24. *Шилин А. А., Пшеничный В. А., Кармузов Д. В.* Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. – М.: Стройиздат, 2007. – 184 с.
25. *ТУ 5851-008-01388383-2002*. Балки железобетонные с каркасной арматурой для пролетного строения автодорожных мостов и путепроводов длиной 12, 15 и 18 м. – М.: Союздорпроект, 2002. – 18 с.
26. *Hredil M. I., Toribio J., and Nykyforchyn H. M.* Analysis of the plasticity characteristics of progressively drawn pearlitic steel wires // *Materials Science.* – 2016. – **51**, № 4. – P. 514–519.  
(Греділь М. І., Торібіо Дж., Никифорчин Г. М. Аналіз зміни характеристик пластичності прутків зі сталі внаслідок холодного волочіння // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2015. – **51**, № 4. – С. 71–75.)
27. *Fatigue crack growth rate of the long term operated puddle iron from the eiffel bridge /* G. Lesiuk, J. A. F. O. Correia, M. Smolnicki, A. M. P. De Jesus, M. Duda, P. A. Montenegro, and R. A. B. Calçada // *Metals.* – 2019. – **9**, № 1. – 53. DOI:10.3390/met9010053.
28. *Study of the fatigue crack growth in long-term operated mild steel under mixed-mode (I + II, I + III) loading conditions /* G. Lesiuk, M. Smolnicki, D. Rozumek, H. Krechovska, O. Student, J. Correia, R. Mech, and A. M. P. De Jesus // *Materials.* – 2020. – **13**, 160. – P. 1–16. DOI:10.3390/ma13010160. Special Issue Selected Papers from XIX International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals – ICMFM'19.
29. *Global-local fatigue assessment of an ancient riveted metallic bridge based on submodelling of the critical detail /* Z. Liu, J. Correia, H. Carvalho, A. Mourão, A. de Jesus, R. Calçada, and F. Berto // *Fatigue & Fract. Eng. Mater. & Struct.* – 2019. – **42**, № 2. – P. 546–560.
30. *ГОСТ 5781-82*. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия: Сб. ГОСТов. – М.: Стандартинформ, 2009. – 24 с.
31. *Досвід оцінки деградації матеріалу труб аміакопроводу за результатами неруйнівного контролю їх механічних характеристик /* В. Д. Миндюк, М. О. Карпаш, А. В. Яворський, І. В. Рибіцький, Є. Р. Доценко // *Техн. диагностика и неразр. контроль.* – 2012. – № 2. – С. 30–35.
32. *Krechkovs'ka H. V. and Student O. Z.* Determination of the degree of degradation of steels of steam pipelines according to their impact toughness on specimens with different geometries of notches // *Materials Science.* – 2017. – **52**, № 4. – P. 566–571.  
(Кречковська Г. В., Студент О. З. Оцінювання деградації сталей парогонів за ударною в'язкістю на зразках з різною геометрією надрізу // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2016. – **52**, № 4. – С. 106–110.)
33. *Греділь М. І.* Втрата когезії між бетоном та сталеву арматурою за впливу корозивно-наводнювального середовища // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2021. – № 4. – С. 24–29.
34. *Крижанівський Є. І.* Деградація матеріалів нафтогазових об'єктів довготривалої експлуатації та шляхи забезпечення їх працездатності // *Розробка родовищ.* – 2014. – Т. 8. – С. 241–253.
35. *ГОСТ 10922-2012*. Арматурные и закладные изделия, их сварные, вязаные и механические соединения для железобетонных конструкций. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2013. – 64 с.

Одержано 27.01.2021