

УДК 625.1:691.328

**ВПЛИВ КОРОЗІЇ БЕТОНУ ВІД ВЗАЄМОДІЇ ЛУГІВ ЦЕМЕНТУ З
РЕАКЦІЙНОЗДАТНИМИ ЗАПОВНЮВАЧАМИ НА ПОШКОДЖЕННЯ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ У КОЛІЇ**

Д-р техн. наук А. А. Плугін, аспіранти О. П. Крикун, В. В. Зінченко,
кандидати техн. наук О. С. Борзяк, О. А. Дудін

**INFLUENCE OF CONCRETE CORROSION FROM THE INTERACTION OF ALKALIS
OF CEMENT WITH REACTIVE AGGREGATES ON DAMAGE TO REINFORCED
CONCRETE SLEEPERS IN A TRACK**

D. Sc. (Tech.) A. Plugin, postgraduate students O. Krykun, V. Zinchenko,
PhD (Tech.) O. Borziak, PhD (Tech.) O. Dudin

***Анотація.** У статті наведено аналіз причин утворення тріщин та інших пошкоджень у залізобетонних шпалах, встановлено вплив корозії на пошкодження бетону, обумовленої взаємодією лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами, виявлено вагомості кожної з причин. Корозія бетону шпал, обумовлена реакцією між лугами та кремнієвою кислотою – лужно-кремнеземистою реакцією, в Україні спричинена безсистемною зміною постачальників заповнювачів і цементу та модернізацією виробництва цементних заводів, яка призвела до підвищення вмісту лугів понад 0,6 %. З усіх конструкцій з бетону корозія від лужно-кремнеземистої реакції найшвидше протікає саме у підрейкових основах залізниць – її ознаки з'являються в середньому через 2,8 року експлуатації, та фундаментах опор контактної мережі – через 3 роки. Це обумовлено особливостями конструкції та умов експлуатації шпал, у т. ч., можливо, додатковим до обводненості впливом струмів витоку. Внаслідок лужно-кремнеземистої реакції в бетоні виникають розтягувальні напруження, які призводять до утворення просторової сітки мікротріщин і зниження міцності бетону на розтяг.*

***Ключові слова:** залізобетонна шпала, тріщиностійкість, лужна корозія, лужно-кремнеземиста реакція.*

***Abstract.** The article analyses the causes of cracks and other damage in reinforced concrete sleepers. The effect of concrete corrosion, which is caused by the interaction of cement alkalis with reactive aggregates, on damage to sleepers has been established. The significance of each of the reasons has been established. Corrosion of concrete sleepers, which is caused by the reaction between alkalis and silicic acid - Alkali-Silica Reaction (ASR), in Ukraine was initially caused by a haphazard change in suppliers of aggregates and cement. Also it influenced by the modernization of the production of cement plants, which led to an increase in the content of alkalis in cement by more than 0.6%. Of all concrete structures, corrosion from ASR proceeds faster precisely in the railway track structures - its signs appear on average after 2.8 years of operation, and the foundations of overhead catenaries - after 3 years. For other structures, these signs appear later - for bridge structures after 3.7 years, for road surfaces - after 6.9 years. This is due to the peculiarities of the design and operating conditions of the sleepers, including, possibly, the effect of leakage currents additional to the water cut. The corrosion rate from ASR in structures in Ukraine is much higher (signs of corrosion appear on average after 2.2 years) than in the countries of North America, Central*

and Northern Europe (6.1 and 6.4 years, respectively). This is due to the wider use of additives in concrete, a better regulatory framework and a culture of compliance in these countries. ASR directly causes 15.5 % of defects, contributes to the formation and development of 32.8% of defects to the greatest extent, does not affect 30.9 % of defects at all, and to a limited extent contributes to the emergence and development of other 20.8 % of defects. The effect of corrosion of concrete from ASR on the occurrence of damage (defects) in sleepers is explained by the fact that as a result of ASR tensile stresses arise in concrete, which lead to the formation of a spatial network of microcracks and a decrease in the tensile strength of concrete. Since the prestressing of the reinforcement has created tensile stresses in the transverse direction, predominantly longitudinal cracks occur in the sleepers. Prestressed reinforced concrete structures are more vulnerable to damage caused by ASR concrete corrosion than conventional reinforced concrete or concrete structures.

Keywords: reinforced concrete sleeper, crack resistance, alkaline corrosion, Alkali-Silica Reaction.

Вступ. На залізницях України експлуатується переважно безстикова колія на залізобетонних шпалах. Шпали виготовляються згідно з ДСТУ Б В.2.6-209 [1] попередньо напруженими з бетону класу С32/40 переважно двох типів – Ш1 і СБ3. Вони запроектовані на відповідність навантаженням, встановленим ДСТУ 7571 [2], а для їх бетону нормуються відповідні суворим умовам експлуатації марки з морозостійкості F200 та водонепроникності W6. Конструкція і технологія залізобетонних попередньо напружених армованих високоміцним дротом шпал типу Ш1 під роздільні клемно-болтові проміжні рейкові скріплення КБ була впроваджена в 1960-х рр. [3, 4]. Технологічні лінії з виготовлення шпал у довгих 10-місних (2×5) формах тоді надійшли з Угорщини. Починаючи з 1990-х рр., на залізницях України впроваджуються також шпали типу СБ3, призначені для нероздільних пружних анкерних рейкових скріплень КПП-5, розроблених на основі польських скріплень СБ-3 та привабливих своїми малодетальністю, низькими метало- та трудомісткістю утримання. Шпали типу СБ3 відрізняються від Ш1 наявністю замуrowаних у бетон анкерів замість отворів із закладними шайбами для закладних болтів і більшою висотою підрейкового перерізу.

Шпали, що постачаються на залізниці, витримують вихідний контроль, передбачений ДСТУ Б В.2.6-209 [1] та його попередніми редакціями, у т. ч. ГОСТ 10629. Незважаючи на це по мірі напрацювання, що оцінюється пропущеним тоннажем, у шпалах утворюються тріщини та інші пошкодження (дефекти), які майже всі враховані технічними вказівками ЦП-0150 [5]. Проте, починаючи з 2000-х рр., відмічаються й нові види пошкоджень, наприклад сітка тріщин, яка, як правило, виникає через 1–3 роки експлуатації [6], у подальшому розвивається у більші тріщини та призводить до руйнування і вилучення з колії сотень шпал набагато раніше за встановлене напрацювання (рис. 1).

Наявність аналогічної сітки тріщин та її розвиток у більші тріщини спостерігався також у залізобетонних плитах безбаластного мостового полотна (рис. 2, а). Відомі також випадки аналогічних тріщин у залізобетонних мостових прогонових будовах, наприклад балках прогонової будови довжиною 11,4 м, встановлення якої у 2017 р. було скасовано внаслідок виявлення в ній тріщин після річного зберігання на складі мостобудівного поїзда № 8 Південної залізниці (рис. 2, б). Характерними для плит БМП і прогонових будов були патьоки вилуговування через сітку тріщин (рис. 2).



a



б

Рис. 1. Пошкодження залізобетонних шпал, що розвилися із сітки тріщин:
a – відколи бетону; *б* – повністю зруйновані шпали, вилучені з колії на ст. Бахмач Південно-Західної залізниці



a



б

Рис. 2. Сітка тріщин у залізобетонних конструкціях:
a – безбаластного мостового полотна; *б* – прогонової будови

Встановленню причин тріщиноутворення була присвячена низка науково-дослідних робіт (НДР), зокрема «Проведення досліджень по встановленню причин руйнування залізобетонних шпал та розробка рекомендацій по підвищенню міцності бетону» (ДНУЗТ, 2011), «Дослідження причин передчасного руйнування залізобетонних шпал Ш1-3 виробництва ПрАТ «Коростенський завод ЗБШ» (ДНУЗТ,

2015), «Провести фізико-хімічні дослідження бетону залізобетонних шпал та надати висновок щодо причин його корозії» (НДІБК, 2019). У даних роботах утворення цієї сітки тріщин у шпалах пов'язується з корозією бетону від взаємодії лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами, зокрема активним кремнеземом, який в них міститься [7–11]. Проте у наведених роботах недостатньо уваги приділено дослідженню

впливу зазначених корозії та сітки тріщин на утворення і розвиток інших різних дефектів (пошкоджень) у шпалах [5]. Отже, дослідження, спрямовані на встановлення та усунення причин утворення тріщин у шпалах, встановлення впливу корозії бетону, обумовленої взаємодією лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами, на пошкодження шпал, є актуальним завданням, вирішення якого дозволить знизити втрати від передчасного виходу з ладу та заміни шпал раніше за встановлене напруцювання.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження – уточнення причин утворення тріщин та інших пошкоджень у залізобетонних шпалах, встановлення впливу корозії на пошкодження бетону, обумовленої взаємодією лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами, виявлення вагомості кожної з причин.

Для досягнення поставленої мети сформовані завдання досліджень:

- аналітичний огляд наявних даних у літературних джерелах і результатів попередніх досліджень щодо причин тріщиноутворення залізобетонних конструкцій, у т. ч. корозії бетону, обумовленої взаємодією лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами;

- аналіз результатів натурних обстежень і виявлення причин тріщиноутворення залізобетонних конструкцій;

- порівняльний і статистичний аналіз літературних джерел, результатів попередніх досліджень і натурних обстежень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У багатьох країнах Європи, Північної Америки, Південної Африки, Австралії проблема корозії бетону від взаємодії лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами є надто актуальною та широко відома з 1940-50-х рр. [8–10]. Перші згадки про реакційну здатність природних кам'яних матеріалів у лужних середовищах відносяться до 1916 р., коли було повідомлено про реакцію між

польовим шпатом і карбонатом натрію. Деградацію бетону внаслідок реакції між лугами, що містились у цементі, та деякими природними заповнювачами було зафіксовано у 1922 р. у гідротехнічній споруді New River Hydropower Station (Вірджинія, США) через 10 років після її зведення [12]. У 1940 р. Т. Stanton спростував стале уявлення про те, що заповнювачі в бетоні є дійсно інертними і не вступають у жодні хімічні реакції [12]. Він виявив негативний вплив лугів цементу на заповнювачі. Його ранні експериментальні роботи показували, що розширення і розтріскування бетону було результатом поєднання високолужного цементу і реакційноздатного заповнювача та зберігання зразків бетону за високої вологості. За результатами його робіт були зроблені два важливих висновки: 1) розширення зразків у результаті реакції між лугами цементу і кремнеземом заповнювача є незначним, коли вміст лугів у цементі не перевищує 0,6 % у перерахунку на Na_2O ; 2) часткове заміщення високолужного цементу активними пуцолановими добавками запобігає надмірному розширенню бетону. У період 1947–52 рр. у Німеччині та США було показано, що ці процеси обумовлені реакцією між лугами та кремневою кислотою – лужно-кремнеземистою реакцією, Alkali-Silica Reaction (ASR) [13, 14]. Але ці дослідження лише описували наявність проблеми, не пропонуючи її вирішення.

На початку 1950-х рр. руйнівну дію цієї реакції на бетон було виявлено в Австралії, а з середини 1950-х рр. руйнування конструкцій фіксувалися вже в багатьох країнах світу: Канаді й Данії (1950), Ісландії (1960–1970), СРСР (1962), Південній Африці (1970), Великій Британії (1971), Туреччині (1975), Швеції і Норвегії (1980–1990), Швейцарії (1995), Нідерландах (1995–1998), Фінляндії (2011) [15–27]. Корозії зазнавали конструкції автодорожніх та аеродромних покриттів, мостів, гребель, водопропускних споруд, підрейкових кон-

струкції залізниць, будівель. У Данії руйнування бетону, обумовлене цією причиною, прийняло настільки масовий характер, що було створено Національний комітет з проблеми лугостійкості бетону [15].

У Німеччині, як відмічав Й. Штарк [9], приблизно до 1965 р. існувала думка, що внаслідок геологічної ситуації реакція з лугами, що спричиняє пошкодження бетонних елементів, не відбувається. Проте Лахсверський міст (Шлезвіг-Гольштейн), збудований у 1965–66 рр. і в якому зафіксовано пошкодження внаслідок ASR, вже у 1968 р. через небезпеку експлуатації

було знесено. На території Східної Німеччини перші пошкодження від ASR були виявлені у 1979–80 рр. у Мекленбурзі та у 1983 р. у Саксонії і Тюрингії. Пошкодження шпал із попередньо напруженого залізобетону внаслідок ASR на залізницях Німеччини призвели до мільярдних витрат. На момент видання роботи [9] її авторам продовжувала поступати інформація про нові пошкодження конструкцій, переважно мостів, від ASR. Можна вважати досі не вирішеними ці проблеми стосовно мостів й у Швеції (рис. 3).



a



б



в

Рис. 3. Велосипедно-пішохідний міст Kartensbron у м. Мальме, Швеція, збудований у 2013 р.: *a, б* – вигляд мосту; *в* – сітка тріщин від лужної корозії на бетонному покритті тротуарів, у 2019 р.

Для запобігання ASR у 1974 році було розроблено «Запобіжні заходи проти ушкоджень лужною реакцією в бетоні», яке

неодноразово переглядалось – за станом на 2007 р. було чинним вже 5 видання [10]. Основним заходом було передбачено обме-

ження вмісту лугу в клінкерних цементах не більше 0,6 % у Na_2O -еквіваленті. Пізніше в Німеччині обмеження були пом'якшені до 0,8 % у портландцементі та 1,0 % у портландцементі зі шлаком. Проте обмеження 0,6 % є базовим для розроблення в різних країнах нормативів на цемента, бетони, залізобетон. Так, воно тривалий час не дає можливості обґрунтувати застосування нового класу швидкотверднучих лужно-активованих цементів [28–30], у складі яких лугів значно більше (1,5–5 %), ніж у традиційних цементах.

У СРСР проблема пошкодження залізобетонних шпал від ASR мала більш академічний, ніж виробничо-експлуатаційний характер [8]. Заводи залізобетонних конструкцій, у т. ч. шпал, були прив'язані до постійних визначених ще на стадії їх будівництва кар'єрів заповнювачів і виробників цементу, а цемент був менш активним і з набагато меншим вмістом лугу.

Корозія бетону шпал від ASR в Україні проявила себе лише з середини 2000-х рр. За даними НДР «Исследования основных производственных факторов, определяющих расходы цемента при изготовлении железобетонных конструкций» (ХарДАЗТ, 1998), збільшення корозійних пошкоджень спричинено постійною безсистемною зміною постачальників заповнювачів і цементу, яка почалася у 1990-ті рр. У таких умовах виникла необхідність у розробленні рекомендаційних документів для заводів залізобетонних шпал [31, 32]. Суттєво вплинула також модернізація виробництва цементними заводами з середини 2000-х рр., яка полягала, по-перше, у переведенні випалу клінкеру з газу, що дорожчав, на вугілля, по-друге, в уловлюванні з повітря та повертанні у сировину пилюватих фракцій клінкеру [33]. Поряд з підвищенням тонини помелу це призвело до підвищення активності цементу, що дозволило заводам ЗБШ навіть відмовитись від тепловологісної обробки шпал влітку, і різкого та спочатку практично неконтрольованого підвищення

вмісту лугів, про що свідчать дані НДР «Проведення досліджень з використання хімічних добавок для зниження енергоємності виробництва залізобетонних шпал і розробка ДСТУ на шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 мм» (УкрДУЗТ, 2013-2014).

У 2015–19 рр. в УкрДУЗТ у межах НДР «Проведення досліджень з можливості застосування шпал залізобетонних попередньо напружених колії 1520 мм типу СБЗ зі скріпленнями проміжними пружними типу КПП-5 на ділянках підвищеної вантажонапруженості та розробка рекомендацій» (2015-2016), «Оцінка впливу класу бетону за міцністю на стиск попередньо напружених залізобетонних шпал типу СБЗ-0 на їх працездатність і ресурс» (2019), «Дослідження впливу конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів на утворення тріщин у шпалах типу СБЗ» (2019) було проведено натурні й лабораторні дослідження з виявлення впливу різних факторів на пошкоджуваність шпал [34–36]. Було встановлено вплив конструкції вузла скріплення, класу бетону, положення арматурного пакета (відхилення товщини захисного шару) на утворення у шпалах тріщин певних видів, а також відсутність впливу вантажонапруженості ділянки (на накопичення пошкоджень впливає тільки напруження). Разом з цим отримано дані щодо кількості шпал з ознаками корозії від ASR, які й проаналізовано у цьому дослідженні.

Основна частина дослідження. Аналіз робіт [15–27] показав, що найчастіше руйнувань зазнають такі конструкції з бетону, як мости, автодорожні покриття, фундаменти опор контактної мережі, підрейкові конструкції, рідше – конструкції будівель. У табл. 1 і на рис. 4 узагальнено дані [10, 21, 23, 34] та дані НДР УкрДУЗТ 2015-2019 рр. щодо тривалості експлуатації конструкцій до виявлення пошкоджень від корозії внаслідок ASR.

Аналіз табл. 1 і рис. 4 показує, що для конструкцій різного призначення, які зазнають корозії від ASR, характерні різні терміни експлуатації до виявлення пошкоджень від неї – найшвидше ознаки корозії з’являються саме у підрейкових основ залізниць (в середньому через 2,8 року, рис. 4, б), потім у фундаментах опор контактної мережі (3 роки), мостових конструкцій (3,7 року), автодорожніх покриттів (6,9 року). Це свідчить про вплив на швидкість цього виду корозії умов

експлуатації та особливостей конструкції, у т. ч. виду і витрати цементу в бетоні, а також про те, що саме для умов експлуатації та особливостей конструкції залізничних шпал ця корозія протікає найшвидше. Також такий розподіл швидкості корозії між конструкціями може свідчити про додатковий до обводненості вплив на неї струмів витоку, який найчастіше спостерігається саме у підрейкових основах і фундаментах опор контактної мережі та не спостерігається в автодорожніх покриттях.

Таблиця 1

Тривалість експлуатації конструкцій з бетону до виявлення пошкоджень від корозії внаслідок ASR

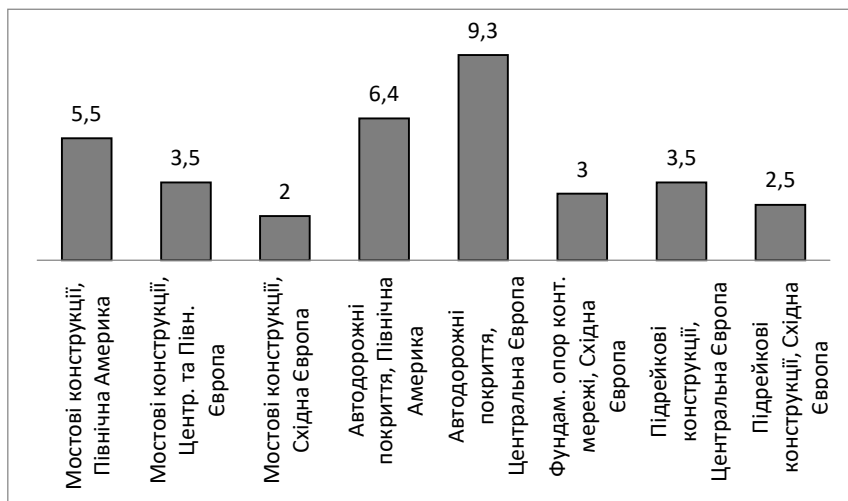
Вид конструкцій	Джерело	Країна, регіон		Рік		Т, років		
				будівництва	виявлення пошкоджень			
Мостові конструкції	[21]	США	Вашингтон	1919–20	1923	3	4,5	
			Арканзас	1934	1942	8		
	[10]	Німеччина	Шлезвіг-Гольштейн	1965–66	1968	2		
	Рис. 3 Рис. 2	Швеція Україна	Мальме Харків	2013 –	2018 –	5 1–3		
Автодорожні покриття	[21]	США	Каліфорнія	1927	1932	5	7,7	
				Вашингтон	1930–31	1939		8–9
				Небраска	1931	1932		1
	[10]	Німеччина	Раштадт	1985	1996	11		
			Дормштадт-Франкфурт	1993	2004	11		
			Притувалк-Пархім	1994–96	2002	8		
	Менхофдрайек-Франкфурт	1997	2004	7				
Фундаменти опор контактної мережі	[23]	СРСР, РФ		–	–	3	3	
Підрейкові конструкції	[10]	Німеччина		–	–	2–5	3,5	
	[23]	РФ		2001	2004	3		
	[34]	Україна	Харківська обл.	2005–07	2006–08	1–3		

Також відмічено різну швидкість корозії від ASR для конструкцій, що зведені та експлуатуються в різних частинах світу

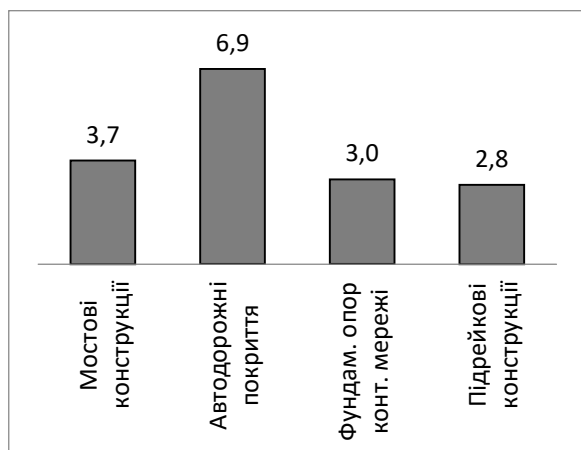
(рис. 4, в). Найшвидше ознаки корозії з’являються у країнах Східної Європи (Україна, РФ, в середньому через 2,2 року),

а в країнах Північної Америки, Центральної та Північної Європи – набагато повільніше (6,1 і 6,4 року, відповідно). Оскільки кліматичні умови у цих країнах приблизно схожі, це, очевидно, пов'язано з технічним

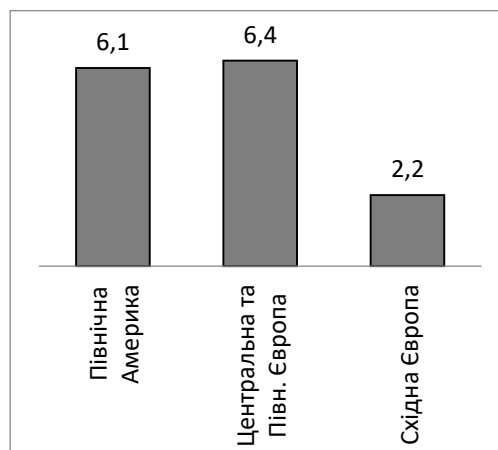
рівнем будівельної галузі в них – більш раннім і широким застосуванням добавок в бетони, більш досконалою нормативною базою та культурою її дотримання.



а



б



в

Рис. 4. Тривалість експлуатації до виявлення пошкоджень від корозії внаслідок ASR конструкцій з бетону: а – різного призначення, експлуатованих у різних частинах світу; б – різного призначення; в – експлуатованих у різних частинах світу

Аналіз даних НДР УкрДУЗТ дозволив удосконалити встановлену у вказівках [5] та розвинуту у роботі [36] класифікацію пошкоджень (дефектів) залізобетонних шпал, уточнити причини їх утворення. Удосконалена класифікація дефектів та причини їх утворення наведені на рис. 4 і в табл. 2.

На основі даних НДР УкрДУЗТ 2015-2019 рр. за результатами численних натурних досліджень ділянок залізниць з найбільшою пошкоджуваністю шпал визначено частку шпал з кожним дефектом, складено рейтинг дефектів за розповсюдженістю, наведений у табл. 3.

11.1/11.2 Поперчні тріщини в підрейковому перерізі знизу шпали



12.1 Поперчні тріщини посередині шпали



12.1a Поперечна тріщина на кінці шпали



12.1б Сітка тріщин на поверхнях шпали, переважно на кінцях



12.1в Стирання кінця шпали від отрушення



13.1/13.2 Поперчні тріщини в зоні анкерів



21.1 Подовжня тріщина через анкери або отвори для закладних болтів



21.1a Подовжні тріщини в середній частині шпали



21.1б Вихід робочої арматури на верхню грань шпали



22.1/22.2 Подовжні тріщини в торці шпали



Рис. 4. Основні дефекти (пошкодження) шпал

Таблиця 2

Причини утворення дефектів (пошкоджень) залізобетонних шпал

Шифри дефектів	Основна причина утворення дефекту (пошкодження)	Рейтинг за розповсюдженістю
12.1в	Осідання баласту під рейковими нитками, коливання кінців шпали від вертикального навантаження	1 ⁴
12.1	Осідання баласту під рейковими нитками, вигин і злам шпали від вертикального навантаження	2 ²
13.1/13.2	Утворення тріщин від впливу горизонтальної складової навантаження на анкер. Сприяє осідання баласту під рейковими нитками та зміщення арматурного пакета вниз	3 ³
22.1/22.2	Нерівномірне осідання баласту під рейковими нитками, утворення дотичних напруг, тріщин і відколу від нерівножорсткості основи. Сприяють напруження від попереднього натягу арматури	4 ²
12.1б	Утворення сітки тріщин від корозії заповнювачів лугами цементу, їх розвиток від попереминого заморожування та відтавання. Сприяє виникненню та розвитку інших пошкоджень	5 ¹
11.1/11.2	Осідання баласту під рейковими нитками, утворення тріщин від вертикального навантаження	6 ³
21.1	Утворення тріщин від впливу горизонтальної складової навантаження на анкер	7 ³
21.1а	Корозія заповнювачів лугами цементу, утворення тріщин від попереднього натягу арматури внаслідок втрати бетоном міцності	8 ¹
12.1а	Осідання баласту під рейковими нитками, коливання кінців шпали від вертикального навантаження і утворення тріщини. Удар робочого органу виправно-підбивальних колійних машин	9 ³
21.1б	Зміщення арматурного пакета під час формування шпали на ЗЗБШ	10 ⁴
¹ Дефекти, обумовлені безпосередньо корозією бетону від ASR. ² Дефекти, утворенню і розвитку яких найбільше сприяє корозія від ASR. ³ Дефекти, утворенню і розвитку яких певною мірою сприяє корозія від ASR. ⁴ Дефекти, на утворення і розвиток яких корозія від ASR не впливає.		

У табл. 2 зазначено зв'язок дефектів шпал з корозією бетону від ASR і видно, що безпосередньо обумовлені корозією від ASR дефекти 12.1б – сітка тріщин на поверхнях шпали, переважно на кінцях (5-й за рейтингом), і 21.1а – подовжні тріщини в середній частині шпали (8-й). Дефектами, утворенню і розвитку яких найбільше сприяє корозія бетону від ASR, є 12.1 – поперечні тріщини посередині шпали (2-й),

і 22.1/22.2 – подовжні тріщини в торці шпали (4-й). Зовсім не впливає корозія від ASR на дефекти 12.1в – стирання кінця шпали від отрушення (1-й, є повністю недоліком утримання колії), і 21.1б – вихід робочої арматури на верхню грань шпали (10-й, є повністю заводським дефектом). На інші дефекти корозія від ASR також впливає, але певною обмеженою мірою.

Таблиця 3

Результати натурних досліджень ділянок залізниць з найбільшою пошкоджуваністю залізобетонних шпал

Характеристики обстежених ділянок, види дефектів	Частка шпал з дефектом, %							Середньозважене значення	Рейтинг дефекту за розповсюдженістю
	Харків – Бурги	Халимонове – Конотоп ¹	Одноробівка – Букіне	Одноробівка – Букіне	Люботин – Люботин-Зах. 2 к.	Люботин – Люботин-Зах. 3 к.	Люботин – Люботин-Зах. 1 к. ²		
Протяжність, км	0,388	10,66	14	0,3	0,6	0,6	0,2		
Кількість шпал, шт.	714	19614	22960	480	1104	1104	368		
Епюра шпал, шт./км	1840	1840	1600	1600	1840	1840	1840		
Напрацювання, млн т	84,7	387,5	203,8	220,7	277,4	174,4	360,3	282	
Строк експлуатації, р.	5	11	10	13	13	12	12	10,5	
12.1в	0	0	78	0,2	0,1	0,1	0	38,7	1 ⁴
12.1	6,3	12	35	32	0	0,2	0	22,9	2 ²
13.1/13.2	0	33	9,5	2,3	0,7	0	0	18,7	3 ³
22.1/22.2	0	41	1,5	0	0,1	5,5	0	18,2	4 ²
12.1б	0	0	34	32	1,5	4,3	6,5	17,4	5 ¹
11.1/11.2	0	10	0	0	0	0	0	4,2	6 ³
21.1	0	4	1,1	0	0	0	0	2,2	7 ³
21.1а	0	0	3,9	0,6	1,4	1,8	0	2,0	8 ¹
12.1а	0	0	2,1	0,6	0	0	0	1,0	9 ³
21.1б	0	0	0	2	0	0	0	0	10 ⁴

Вплив корозії бетону від ASR на виникнення і розвиток пошкоджень (дефектів) у шпалах пояснюється тим, що внаслідок ASR в бетоні виникають розтягувальні напруження, які призводять до утворення просторової сітки мікротріщин (на поверхні видно, як дефект 12.1б, рис. 4). Її розвиток обумовлює зниження міцності бетону на розтяг. Оскільки шпали є попередньо напруженими з повністю ізотропним армуванням у подовжньому напрямку, а попереднє напруження створило розтягувальні напруження у поперечному напрямку, у шпалах виникають переважно подовжні

тріщини (дефекти 21.1а, 22.1/22.2, 21.1). Утворенню поперечних тріщин (дефекти 11.1/11.2, 12.1, 12.1а, 13.1/13.2), якому запобігає попереднє напруження, зниження міцності бетону на розтяг лише сприяє, а основними причинами є конструктивні особливості шпал, порушення вимог до утримання колії тощо (табл. 2). З викладеного можна також зробити висновок щодо більшої вразливості попередньо напружених залізобетонних конструкцій для пошкоджень, які спричиняє корозія бетону від ASR, порівняно зі звичайними залізобетонними або бетонними конструкціями.



Рис. 5. Розподіл частки дефектів (пошкоджень) від їх загальної кількості за їх зв'язком з корозією бетону, обумовленою ASR

Розподіл частки дефектів (пошкоджень) від їх загальної кількості за їх зв'язком з корозією бетону, обумовленою ASR, обчислено за даними табл. 3 і подано на діаграмі рис. 5. Із рис. 5 видно, що 15,5 % всіх дефектів шпал безпосередньо обумовлені корозією бетону від ASR. 32,8 % дефектів корозія від ASR сприяє найбільше, ще 20,8 % – певною обмеженою мірою. Лише 30,9 % дефектів у жодному разі не пов'язані з корозією бетону від ASR.

Висновки

1. Корозію бетону шпал від ASR в Україні почали виявляти з 2000-х рр. внаслідок безсистемної зміни постачальників заповнювачів і цементу та модернізації виробництва цементними заводами, яка призвела, з одного боку, до підвищення активності цементу, що дозволило скоротити тепловологісну обробку шпал, а з другого – до підвищення вмісту лугів понад 0,6 %.

2. Зі всіх конструкцій з бетону корозія від ASR найшвидше протікає саме у підрейкових основах залізниць – її ознаки з'являються в середньому через 2,8 року експлуатації, та фундаментах опор контактної мережі – через 3 роки, тоді як для інших конструкцій ці ознаки з'являються пізніше: для мостових конструкцій – через 3,7 року, автодорожніх покриттів – через

6,9 року. Це обумовлено особливостями конструкції та умов експлуатації шпал, у т. ч., можливо, додатковим до обводненості впливом струмів витоку.

3. Швидкість корозії від ASR в конструкціях в Україні набагато більша (ознаки корозії з'являються в середньому через 2,2 року), ніж у країнах Північної Америки, Центральної та Північної Європи (6,1 і 6,4 року, відповідно), що пояснюється більш широким застосуванням добавок в бетони, досконалішою нормативною базою та культурою її дотримання в останніх.

4. ASR по-різному впливає на утворення та розвиток дефектів шпал:

- безпосередньо обумовлює 15,5 % дефектів, зокрема 12.1б – сітка тріщин на поверхнях шпали, переважно на кінцях (5-й за розповсюдженістю), і 21.1а – подовжні тріщини в середній частині шпали (8-й);

- найбільше сприяє утворенню і розвитку 32,8 % дефектів, зокрема 12.1 – поперечні тріщини посередині шпали (2-й), і 22.1/22.2 – подовжні тріщини в торці шпали (4-й);

- зовсім не впливає на 30,9 % дефектів, зокрема 12.1в – стирання кінця шпали від отрушення (1-й, є повністю недоліком утримання колії), і 21.1б – вихід робочої

арматури на верхню грань (10-й, є повністю заводським дефектом);

- обмежено сприяє виникненню і розвитку інших 20,8 % дефектів.

5. Вплив корозії бетону від ASR на виникнення пошкоджень (дефектів) у шпалах пояснюється тим, що внаслідок ASR в бетоні виникають розтягувальні напруження, які призводять до утворення просторової сітки мікротріщин і зниження міцності бетону на розтяг. Оскільки попереднє напруження арматури створило розтягувальні напруження у поперечному напрямку, у шпалах виникають переважно подовжні тріщини. Утворенню поперечних

тріщин, якому запобігає попереднє напруження, зниження міцності бетону на розтяг лише сприяє, а основними причинами є конструктивні особливості шпал, порушення вимог до утримання колії тощо. Отже, попередньо напружені залізобетонні конструкції є більш уразливими до пошкоджень, які спричиняє корозія бетону від ASR, порівняно зі звичайними залізобетонними або бетонними конструкціями.

6. Для підвищення достовірності цих висновків рекомендується виконати фізико-хімічні дослідження бетону шпал з різними дефектами.

Список використаних джерел

1. ДСТУ Б В.2.6-209:2016. Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage?id_doc=64108.
2. ДСТУ 7571:2014. Рухомий склад залізниць. Норми допустимого впливу на залізничну колію. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63585.
3. Железобетонные шпалы для рельсового пути / А. Ф. Золотарский, Б. А. Евдокимов, Н. М. Исаев и др.; под ред. А. Ф. Золотарского. Москва: Транспорт, 1980. 270 с.
4. Железобетонные шпалы / под ред. О. П. Мчедлова-Петросяна. Труды ХИИТа. 1966. Вып.86. 64 с.; 1969. Вып. 109. 64 с.; 1971. Вып.122. 64 с.
5. Технічні вказівки з використання старопридатних матеріалів верхньої будови колії на залізницях України (ЦП-0150) / НКТБ ЦП Укрзалізниця. Київ, 2006. 56 с.
6. Експериментальні дослідження тріщиностійкості залізобетонних шпал з безпідкладковим пружним рейковим скріпленням / А. А. Плугін, С. В. Мірошніченко, О. А. Калінін та ін. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2020. Вип. 192. С. 11-23.
7. Пшінько П. О. Підвищення надійності залізничних залізобетонних шпал: автореф. дис... канд. техн. наук 05.23.01. Дніпропетровськ: ПДАБА, 2012. 20 с.
8. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шисль; под ред. Ф. М. Иванова. Москва: Стройиздат, 1990. 320 с.
9. Штарк Йохан, Вихт Бернд. Долговечность бетона / пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. Киев: Оранта, 2004. 295 с.
10. Штарк Йохан. Щелочная коррозия бетона / пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. Киев, 2010. 166 с.
11. Розенталь Н. К., Любарская Г. В. Коррозия бетона при взаимодействии щелочей с диоксидом кремния заполнителя. *Бетон и железобетон*. 2012. № 1(6). С. 50-60.
12. Stanton T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *J. Amer. Soc. Eng.* 1940. 66(10). P. 1781-1811.
13. Kühl H. Zement-Chemie: Die Erhärtung und die Verarbeitung der hydraulischen Bindemittel. 1951. Vol. 3. Verlag Technik. 220 p.
14. Bredsdorf P., Idorn G., Kjaer A., Plum N., Poulsen E. Chemical reaction involving aggregate. In: Proc. IV Int. Sym. Chem. Cem. 1960. II. P. 749-783.

15. Nerenst P. Alment om Alkali Reak tioner i Beton. The Danish National Institute of Building Research and the Academy of Technical Sciences, Committee on Alkali Reactions in Concrete, Progress Report Al. Copenhagen, 1957. 50 p.
16. Москвин В. М., Рояк Г. С. Коррозия бетона при действии щелочей цемента на кремнезём заполнителя. Москва: Госстройиздат, 1962. 164 с.
17. Gudmundsson G., Asgeirsson H. Some Investigation on Alkali Aggregate Reaction. 1975. P. 211-220.
18. Hobbs D. W. Alkali-silica reaction in concrete, London, 1988. 183 p.
19. Lagerblad & Trägårdh. Alkalisilica reactions in Swedish Concrete. Stockholm, 1992. 74 p.
20. Jensen V. Alkali aggregate reaction in Southern Norway: thesis. Trondheim, 1993. 265 p.
21. American Concrete Institute. State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity. 1998. 29 p.
22. Bakker J. D. ASR in 20 bridges in and over motorway 59 in the Netherlands. Proceedings of the 8th International Conference on Structural Faults and Repair. London, cd-room. 1999. P. 8.
23. Рояк Г. С. Внутренняя коррозия бетона. *Тр. ЦНИИС*. 2002. № 210. 156 с.
24. Bodeker W. Alkalireaktion im Bauwerksbeton – Ein Erfahrungsbericht. *Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton (DAfStb)*. 2003. 539 p.
25. Jensen V., Merz C. Alkali-aggregate reaction in Norway and Switzerland – survey investigations and structural damage. Proceedings of the 13th ICAAR. Trondheim. 2008. P. 785-795.
26. Andiç-Çakır, Ö., Çopuroğlu, O., Katayama, T. A Review of Alkali-Silica Reactivity in Turkey: A Case Study From Izmir, west Anatolia. Proceedings of the 14th ICAAR. Austin. 2012. 10 p.
27. Pyu H., Ferreira M., Holt E. Assessing the extent of AAR in Finland. Proceedings of the 14th ICAAR. Austin. 2012. 6 p.
28. Krivenko P., Kovalchuk O. Influence of type of alkaline activator on durability of alkali activated concrete using aggregates capable to alkali-silica reaction. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. P. 180-188.
29. Щелочные и щелочноземельные гидравлические вяжущие и бетоны / В. Д. Глуховский, А. А. Волянский, В. А. Гончаров, П. В. Кривенко. Київ: Вища школа, 1979. 232 с.
30. Високорухомі шлаколужні бетоны з підвищеною ранньою міцністю / П. В. Кривенко, І. І. Руденко, О. М. Петропавловський, О. П. Константиновський. *Науковий вісник будівництва*. 2019. Т. 93. №3. С. 117-124.
31. Рекомендації з виготовлення залізобетонних шпал у відповідності до ТУ У 01116472.021-97 (для Київського експериментального заводу залізобетонних шпал) / ХарДАЗТ. Харків, 2000. 58 с.
32. Рекомендації з удосконалення технології виробництва залізобетонних шпал у відповідності з ТУ У 01116472.021 (для Коростенського заводу залізобетонних шпал) / ХарДАЗТ. Харків, 2001. 123 с.
33. Гев'юк І. М. Мультимодальні композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю та модифіковані бетоны на їх основі: дис... канд. техн. наук. 05.23.05. Львів: НУ «ЛП», 2018. 194 с.
34. Досвід експлуатації залізобетонних шпал з пружними рейковими скріпленнями, розробленими в УкрДАЗТ / А. М. Пługін, А. А. Пługін, Ю. Л. Тулей, С. В. Мірошніченко та ін. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2014. Вип. 148. Ч. 2. С. 92-103.
35. Досвід експлуатації пружних рейкових скріплень типу PRS і залізобетонних шпал із ними / А. А. Пługін, А. М. Пługін, С. В. Мірошніченко та ін. *Українські залізниці*. 2015. № 3–4. С. 60-64.

36. Plugin A. A., Miroshnichenko S. V., Lobiak O. V., Kalinin O. A., Plugin D. A. Crack resistance of reinforced-concrete sleepers with elastic rail fastening systems without base-plate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 1002(1). 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/1002/1/012010.

Плугін Андрій Аркадійович, д-р техн. наук, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Крикун Оксана Петрівна, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4731-179X. E-mail: 0509ksushka@gmail.com.

Зінченко Владислава Володимирівна, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6701-5501. E-mail: zinchenko4@kart.edu.ua.

Борзяк Ольга Сергіївна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Дудін Олексій Аркадійович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6838-1669. E-mail: dudin@kart.edu.ua.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel. +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Krykun Oksana, postgraduate student, department of railway track and transport structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4731-179X. E-mail: 0509ksushka@gmail.com.

Zinchenko Vladyslava, postgraduate student, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6701-5501. E-mail: zinchenko4@kart.edu.ua.

Borziak Olga, PhD (Tech), associate professor, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Dudin Oleksii, PhD (Tech), associate professor, department of railway stations and units. Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6838-1669. E-mail: dudin@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 31.03.2021 р.