УДК 691.3

© Т. М. Петрова, д-р техн. наук, профессор
© А. В. Полетаев, канд. техн. наук, доцент
© Э. Ю. Чистяков, старший преподаватель
(Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I)
E-mail: petrova@pgups.ru, apol@list.ru,
eduard_chistiakov@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-6-215-219

© Т. М. Petrova, Dr. Sci. Tech., Professor
© A. V. Poletaev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© E. Yu. Chistyakov, senior teacher
(Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University)
E-mail: petrova@pgups.ru, apol@list.ru,
eduard_chistiakov@mail.ru

К ВОПРОСУ О КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ АРМАТУРЫ В ТРАНСПОРТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

TO THE ISSUE OF CORROSION RESISTANCE OF PRESTRESSED REINFORCEMENT IN TRANSPORT STRUCTURES AFTER LONG-TERM OPERATION

Рассматривается коррозионная стойкость стальной проволоочной предварительно напряженной арматуры брусьев железнодорожных стрелочных переводов из шлакощелочного бетона за период 30-летней эксплуатации. Проведена оценка состояния арматуры и факторов, влияющих на возможное развитие коррозии: динамика связывания щелочи, состав пассивирующих пленок и прилегающего слоя бетона, микроструктурный анализ арматуры. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о высокой коррозионной стойкости арматуры в рассматриваемых конструкциях из шлакощелочных бетонов.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, транспортные конструкции, долговечность бетона, железнодорожные шпалы, переводные брусья, шлакощелочные бетоны, стальная арматура.

The article discusses the issues associated with corrosion resistance of steel wire prestressed reinforcement bars of railway switches from slag-alkaline concrete during thirty years of operation. The assessment of the state of reinforcement and factors affecting the possible development of corrosion, such as dynamics of alkali binding, the composition of passivating films and the adjacent layer of concrete, microstructural analysis of reinforcement has been implemented. The conducted research allows coming to conclusion about high corrosion resistance of reinforcement in the considered constructions from slag-alkaline concretes.

Keywords: high-strength concrete, transport structures, durability of concrete, railway cross-sleepers, transfer bars, slag-alkaline concrete, steel reinforcement.

Коррозионная стойкость арматуры железобетона в ходе его эксплуатации является важнейшим фактором, влияющим на долговечность конструкции. В случае предварительно напряженной арматуры, вследствие особенностей ее коррозионного поведения, может произойти внезапное разрушение сооружения, что особенно опасно.

Защитное действие бетона по отношению к арматуре основано на его способности придавать стали пассивность. Плотный бетон на портландцементе имеет значительную щелочность (водородный показатель pH 12,0–12,6). В щелочной среде на поверхности стали образуются адсорбционные слои или фазовые пленки оксидного типа, которые препятствуют анодному

растворению железа. Однако сталь с течением времени может потерять пассивность, т. е. активироваться, когда под действием среды происходит понижение щелочности или увеличивается концентрация, например, хлоридов в жидкой фазе бетона у поверхности арматуры [1].

Шлакощелочные вяжущие являются частным случаем щелочных и щелочно-щелочно-земельных алюмосиликатных вяжущих (грунтоцементов), впервые предложенных в 1957 году, и представляют собой гидравлические вяжущие вещества, получаемые путем тонкого измельчения металлургических шлаков, их затворением растворами щелочных соединений или совместным помолотом шлаков с малогигроскопичными соединениями щелочных металлов.

Многочисленными исследованиями показано, что по многим характеристикам шлакощелочные бетоны (ШЩБ) превосходят обычные портландцементные и являются одним из прогрессивных строительных материалов современности, который может создать серьезную конкуренцию традиционным бетонам. Однако остается ряд вопросов, требующих более глубокого изучения. Одним из них является вопрос о поведении арматуры в железобетонных конструкциях после длительной эксплуатации.

В связи с природой шлакощелочных вяжущих водородный показатель у них выше, чем у обычных портландцементных, что придает арматуре достаточную начальную пассивность. В то же время исследования ученых показали, что шлак может выступать агрессивным компонентом бетона по отношению к стальной арматуре, причем чем выше его дисперсность, тем агрессивнее этот компонент. Это касается, например, шлакопемзобетона, золошлакобетона, шлакопортландцемента и т. д. По поводу же сохранения пассивности шлакощелочного бетона по отношению к арматуре мнения расходятся.

Одной из причин понижения щелочности бетона может быть его карбонизация. В табл. 1 приведены некоторые данные по карбонизации шлакощелочных бетонов, полученные рядом авторов, при анализе которых можно видеть значительные расхождения результатов.

Расчетным путем установлено, что только в высокопрочном ШЩБ с использованием в качестве затворителя растворимых силикатов натрия и в цементных бетонах при 20-миллиметровом защитном слое в атмосферных условиях при содержании углекислого газа в количестве, равном примерно 0,03 % объема, фронт карбо-

низации не достигнет арматуры за 50-летний срок эксплуатации.

Изучение свойств ШЩБ, находящегося под длительным воздействием постоянного тока, и их сравнение со свойствами бетона на основе портландцемента, показало что рН образцов на шлакощелочном вяжущем при затворении растворимым стеклом с $M_c = 1,5$ составляет 12,2–12,7, на портландцементном за этот же период времени снижается до 7,8–8,4 [4].

Для изготовления шлакощелочного бетона нами был использован гранулированный доменный шлак с модулем основности $M_o = 1,04$ и растворимое стекло с силикатным модулем $M_c = 1,5$. После длительных лабораторных исследований в заводских условиях были изготовлены и уложены в путь на действующей магистрали переводные брусья под стрелочные переводы.

Выбор этого вида конструкций был обусловлен тем, что переводные брусья работают в пути в более сложных условиях, чем шпалы на перегоне, при этом они имеют переменную длину, достигающую 5 м. Срок службы переводных брусев может быть в 1,5–2,0 раза меньше срока службы шпал.

В представленной работе приведены результаты оценки коррозионной стойкости предварительно-напряженной арматуры как ответ на часто возникающий вопрос о ее состоянии при длительной эксплуатации.

Испытаниям подвергались образцы, выбранные из уложенных авторами конструкций после эксплуатации в пути в течение 30 лет.

Известно, что коррозия арматуры в железобетонных конструкциях является одной из причин их повреждений. На коррозионную стойкость стальной арматуры бетона влияет множество

Таблица 1

Сравнительные данные по глубине карбонизации шлакощелочного бетона

Шлак; модуль основности M_o	Затворитель	Прочность, МПа	Условия проведения опыта	Наибольшая глубина карбонизированного слоя, мм	Источник информации
Доменный молотый гранулированный; 1,08	Na_2CO_3	41,6	Высокая концентр. CO_2 , 0,1 МПа, 28 сут	2,5	[2]
То же	Метасиликат натрия	37,7	То же	1,0	То же
Chonsqing Steel INC; 0,97	–	59,2	CO_2 , 28 сут	9,3	[3]

факторов, из которых наибольшее значение имеют структура и состав бетона, толщина защитного слоя, климатические условия и др.

Процесс коррозии металлов в подавляющем большинстве случаев имеет электрохимический механизм. Вследствие электромеханической гетерогенности поверхности металла на ней при контакте с электролитом образуются микрогальванические элементы. На анодных участках происходит растворение металла по схеме $Me \rightarrow Me^{n+} + ne$ (анодное окисление), ионизация атомов, переходящих в виде гидратированных анионов в раствор. Образующиеся свободные электроны, оставаясь в кристаллической решетке металла, перемещаются к катодным участкам ее поверхности. Электрическая цепь замыкается через раствор электролита. Кроме анодных и катодных реакций, являющихся основными, большое влияние на скорость коррозии могут оказывать вторичные реакции, приводящие к образованию продуктов коррозии. Если продукты коррозии хорошо растворимы, то могут переноситься от места их образования. Труднорастворимые, какими являются, как правило, продукты коррозии стали откладываются на ее поверхности, образуя увеличивающийся слой ржавчины, состоящий из оксидов и гидроксидов железа [5]. Как правило, эти реакции проходят параллельно.

Для оценки вероятности протекания процесса коррозии обычно используют диаграммы М. Пурбе «рН-потенциал». Данные разных авторов по величинам рН, при которых сталь арматуры находится в пассивном состоянии, существенно различаются и колеблются в пределах от 9 до 12. В сухом воздухе сталь, находясь в карбонизированном бетоне и будучи активной, не корродирует даже при рН менее 9 [5].

В связи с природой шлакощелочных вяжущих начальный водородный показатель у них выше, чем у портландцемента, что придает арматуре достаточную пассивность. Отдельно можно выделить вопрос о стойкости арматуры в шлакощелочных бетонах при повышенном содержании ионов — активаторов коррозии. Этот случай актуален для бетонов, в качестве щелочного компонента которых использовались щелочные отходы производств, применение которых всегда требует дополнительной проверки [6–8].

Таким образом, с одной стороны, возможно более медленное, в 2–2,5 раза, прохождение коррозии в шлакощелочном камне по сравнению с портландцементным, указывающим на пассивное состояние арматуры, с другой — в ряде случаев активность стали в шлакощелочном бетоне больше.

Первоначальное содержание щелочных оксидов в жидкой фазе шлакощелочного бетона является достаточно высоким для пассивации стальной арматуры, однако со временем их содержание постепенно изменяется, они переходят в малорастворимые соединения, образуя цеолитоподобные аналоги земной коры и обеспечивая длительный рост прочности [9]. Этот процесс положительно влияет на структурообразование, но бетон сохраняет реакционную емкость по отношению к стальной арматуре, что может быть опасно.

Проведенные нами исследования позволили оценить динамику связывания щелочи в шлакощелочном бетоне за период с 1988 по 2018 г. (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что большая часть свободной щелочи переходит в труднорастворимые соединения в течение первого года. За последующий период времени отмечено плавное повышение связывания щелочного компонента вплоть до возраста 30 лет.

При проведенном визуальном осмотре образцов, изъятых из пути после многолетней эксплуатации, видимых следов прохождения коррозии обнаружено не было.

Дальнейший анализ осуществлялся на образцах-кернах, выбуренных из этих конструкций в наиболее характерных точках.

Таблица 2

Изменение количества связанной щелочи в шлакощелочном бетоне

Возраст образцов	Связанная щелочь, %	
	Тепловлажностная обработка	Нормально-влажное твердение
1 сутки	48	40
28 суток	52	48
1 год	63	63
5 лет	65	64
10 лет	66	66
30 лет	78	79

Известно [10], что одной из главных особенностей длительного сохранения арматуры в бетоне является образование на ее поверхности защитных пленок, имеющих толщину, по мнению одних авторов, — от 0,002 до 0,010 мкм, других — до 0,005 мкм, при отсутствии ферритов кальция.

В ходе исследований нами проведен поэлементный анализ поверхности арматуры после нахождения конструкций в пути (табл. 3).

Отмечено, что в образовании пассивирующей пленки шлакощелочного камня принимают участие не только кальций и кремний, но и натрий, при этом в последующем слое бетона — на рас-

стоянии от арматуры, его количество несколько уменьшается и составляет соответственно Na: 11,909–16,317 % при сокращении содержания Fe до 4,777–2,694 %. Рентгенофазовый анализ подтвердил, что в слое, прилегающем к арматуре, отсутствуют минералы — продукты коррозии.

В табл. 4 и на рисунке приведены результаты оценки поэлементного состава шлакощелочного камня на расстоянии от арматуры после нахождения конструкций в пути.

Обращает внимание отсутствие в химическом составе элемента Fe.

Электронные снимки структуры шлакощелочного камня на разном расстоянии от арматуры подтвердили отсутствие коррозионных разрушений арматуры и деструкции прилегающего к арматуре слоя бетона.

Выводы

Визуальный анализ и снимки при помощи электронного микроскопа в различные годы экс-

Таблица 3
Поэлементный химический состав пассивирующей арматуру пленки и последующего слоя бетона

Элемент	Пассивирующая пленка		Последующий слой бетона	
	содержание, %	атомарное содержание, %	содержание, %	атомарное содержание, %
Na	14,609	27,844	11,909	16,317
Mg	0,000	0,000	2,562	3,320
Al	0,569	0,925	5,497	6,418
Si	4,048	6,314	35,930	40,291
S	0,068	0,093	0,617	0,606
K	0,045	0,051	0,590	0,475
Ca	4,817	5,267	37,632	29,575
Ti	0,000	0,000	0,427	0,281
Mn	0,261	0,208	0,040	0,023
Fe	75,583	59,299	4,777	2,694
Всего	100,001	100,000	99,981	100,000

Таблица 4
Поэлементный состав шлакощелочного бетона после 30 лет эксплуатации конструкций

Элемент	Содержание, %	Атомарное содержание, %
Na	16,84	13,57
Al	1,21	0,83
Si	9,65	6,36
Ca	14,23	6,58
Fe	—	—
C	14,03	21,64
O	44,05	51,02

Спектрметрические снимки образцов шлакощелочного бетона, отобранных из конструкций

плутации конструкций не показали коррозионного разрушения арматуры.

Проведен анализ динамики связывания щелочи, состава пассивирующих арматуру пленок и прилегающего слоя бетона.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о высокой коррозионной стойкости стальной арматуры конструкций подрельсовых оснований из предварительно напряженного шлакощелочного железобетона, находившихся в сложных условиях эксплуатации железнодорожного пути в течение 30 лет.

Библиографический список

1. Алексеев С. Н. Коррозия и сохранность арматуры в бетоне. М.: Стройиздат, 1972. С. 45–53.
2. Malolepszy J., Deja J. Durability of Alkali Activated Slag Mortars and Concretes // 2nd Int. Conf. Alkaline Cements. Kyiv, Ukraine, 1999. Pp. 685–697.
3. Xu Bin, Pu Xincheng. Study on Durability of Solid Alkaline AAS Cement // 2nd Int. Conf. Alkaline Cements. Kyiv, Ukraine, 1999. Pp. 64–71.
4. Петрова Т. М., Чибисов Н. П., Лобач И. П. Электрофизические свойства армированного шлакощелочного бетона при воздействии постоянного тока // Роль структурной механики в повышении прочности и надежности бетона транспортных сооружений: сб. науч. тр. СПб.: ПГУПС, 1995. С. 62–68.
5. Алексеев С. Н., Иванов Ф. М., Модры С., Шисль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
6. Кривенко П. В., Пушкарева Е. К. Долговечность шлакощелочного бетона. Киев: Будивельник, 1993. 224 с.
7. Савиных Г. Б. Физико-химические процессы при твердении и эксплуатации шлакощелочного железобетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Рига, 1988. 20 с.
8. Орбелин С. И. Стойкость и защитные свойства шлакощелочных бетонов // Шлакощелочные вяжущие, бетоны и конструкции: материалы III Всесоюзной науч.-практ. конф. Киев, 25–27 октября 1989 г. Киев: Киевский инж.-строит. ин-т, 1989 (1990). Т. II. С. 73–75.
9. Кривенко П. В., Рунова Р. Ф., Саницкий М. А., Руденко И. И. Щелочные цементы. Киев: ООО «Основа», 2015. 448 с.
10. Поletaев А. В. Оценка долговечности конструкций подрельсовых оснований железнодорожного пути на основе шлакощелочных вяжущих: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2003. 24 с.

References

1. Alekseev S. N. *Korroziya i sokhrannost' armatury v betone* [Corrosion and preservation of concrete reinforcement]. Moscow, Stroizdat Publ., 1972, pp. 45–53.
2. Jan Malolepszy, Jan Deja. *Durability of Alkali Activated Slag Mortars and Concretes*, 2nd Int. Conf. Alkaline Cements. Kyiv, Ukraine, 1999, pp. 685–697.
3. Xu Bin, Pu Xincheng. *Study on Durability of Solid Alkaline AAS Cement*. Kyiv, Ukraine, 1999, pp. 685–697.
4. Petrova T. M., Chibisov N. P., Lobach I. P. *Ehlektrofizicheskie svoystva armirovannogo shlakoshchelochnogo betona pri vozdeystvii postoyannogo toka* [Electric-physical properties of reinforced slag-alkaline concrete under direct current]. *Trudy MPS RF* [Proc. of MPS RF]. St. Petersburg, PGUPS Publ., pp. 62–68.
5. Alekseev S. N., Ivanov F. M., Modry M., Shissel' P. *Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnykh sredakh* [Durability of reinforced concrete in aggressive environments]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990, 320 p.
6. Krivenko P. V., Pushkareva E. K. *Dolgovechnost' shlakoshchelochnogo betona* [Durability of slag-alkaline concrete]. Kiev, Budivelnik Publ., 1993, 224 p.
7. Savinykh G. B. *Fiziko-khimicheskie protsessy pri tverdenii i ehkspluatatsii shlakoshchelochnogo zhelezobetona*. *Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk* [Physico-chemical processes at hardening and operation of slag-alkaline reinforced concrete. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Riga, RPI Publ., 1988, 20 p.
8. Orbelin S. I. *Stoykost' i zashchitnye svoystva shlakoshchelochnykh betonov* [Durability and protective properties of slag-alkaline concretes]. *Trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. of scientific and practical conference]. Kiev, 1989, vol. II, pp. 73–75.
9. Krivenko P. V., Runova R. F., Sanitskiy M. A., Rudenko I. I. *Shchelochnye tsementy* [Alkaline cements]. Kiev, Osнова Publ., 2015, 448 p.
10. Poletaev A. V. *Otsenka dolgovechnosti konstruktсий podrel'sovykh osnovaniy zheleznodorozhnogo puti na osnove shlakoshchelochnykh vyazhushchikh*. *Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Assessment of structure durability of railway track sub-rail bases on the basis of slag-alkaline binders. Author's thesis of PhD in sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2003, 24 p.