

центр Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS), который объединяет 13 университетов, 25 ведущих проектантов и 276 исследователей и взаимодействует с 92 организациями (объем финансирования в 2006 году – 12,8 млн долларов).

По некоторым сведениям сегодня в Канаде и США существует около 400 мостов, где так или иначе применялась стеклопластиковая арматура.

Экономический эффект от применения композитной арматуры связан со **снижением расходов на эксплуатацию и увеличением срока службы** транспортных сооружений.

Сдерживающими факторами для уверенного внедрения полимерной композитной арматуры в строительную отрасль является отсутствие как нормативной базы по проектированию бетонных конструкций, армированных полимерной композитной арматурой, так и базы исследований долговременной прочности и опыта эксплуатации таких конструкций.

Следует сразу же констатировать, что, несмотря на рассуждения о необходимости оценки долговечности железобетонных конструкций, этот вопрос еще далек от своего решения. Вероятно, дело в том, что длительное время применяемая для железобетонных конструкций методология расчета по предельным состояниям в своих формулах не содержит такого понятия, как время, и потому не позволяет определить долговечность указанных конструкций. Мы полагаем, что определенные шаги в нужном направлении позволит сделать применение деформационного подхода в сочетании с какой-либо из теорий накопления повреждений [7].

Значительный интерес также представляет экспериментальное и теоретическое исследование поведения железобетонных конструкций, усиленных различными системами внешнего армирования, и особенно с применением полимерных композитных материалов.

Список литературы

- 1 Соломатов, В. И. Химическое сопротивление материалов / В. И. Соломатов, В. П. Селяев, Ю. А. Соколова. – М. : РААСН, 2001. – 284 с.
- 2 Долговечность железобетонных конструкций с полимерными покрытиями [Электронный ресурс] / Селяев В. П. [и др.] // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/dolgovechnost-zhelezobetonnyh-konstruktsiy-s-polimernymi-pokrytiyami>. – Дата доступа : 22.09.2024.
- 3 Полимерные покрытия для бетонных и железобетонных конструкций : [монография] / В. П. Селяев [и др.] ; Российская акад. архитектуры и строит. наук. – Саранск : СВМО, 2010. – 224 с.
- 4 Защита железобетонных конструкций транспортных сооружений от коррозии / И. Г. Овчинников [и др.] // Промышленные покрытия. – 2012. – № 5–6. – С. 72–75.
- 5 Красить ли железобетонные мосты? И. Г. Овчинников [и др.] // Транспортное строительство. – 2012. – № 10. – С. 12–14.
- 6 Булков, А. С. Защита от коррозии арматурной стали железобетонных конструкций транспортных сооружений [Электронный ресурс] / А. С. Булков, М. А. Баев, И. Г. Овчинников // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2020. – № 1. – С. 17. – Режим доступа : <https://t-s.today/PDF/15SATS120.pdf>. – Дата доступа : 22.09.2024. – DOI : 10.15862/15SATS120.
- 7 Проблемы применения современных нормативных документов для расчета транспортных сооружений / И. Г. Овчинников [и др.] // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 1 (107). – С. 116–122. – DOI : 10.31660/2782-232X-2024-1-116-122.

UDC 691.32:666.97

APPLICATIONS OF INTELLIGENT MATERIALS IN CONSTRUCTION

T. A. ZHELYAZOV

National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Department of Seismology and Seismic Engineering, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria

Concrete is a popular material in construction; it is also commonly used in the transport infrastructure. Concrete is, by design, expected to crack during the exploitation period. This potentially creates favorable conditions for corrosion of the internal steel reinforcement (in the case of classical reinforced concrete structure) and diminishes the water permeability of structural elements. One of the axes of research searching for options to cope with the above-undesired phenomena is the development of the so-called intelligent or, more precisely, self-healing materials. Concrete exhibits a natural potential for self-healing [1], which can be further engineered either through the addition of stimuli-responsive microcapsules in the cementi-

tious matrix [2, 3] or by mounting of "vascular networks" [4, 5]. Micro-capsules containing a healing agent are added to other concrete ingredient during the mixing phase. When cracks develop, the self-healing process is triggered mechanically or by another stimulus. The mechanical triggering is identified with the destruction of the shell of the capsules containing the healing agent by a propagating crack. Alternatively, shells can be destroyed and the healing agent, released, as a result of ultrasonic waves [6], electromagnetic waves [7], and microwaves [8]. Reportedly, self-healing can be also artificially activated via a "bacteria-based" approach [9, 10].

A constitutive relation rooted in continuum damage mechanics is employed to reproduce the mechanical response of a damageable material with healing capabilities

$$\sigma_{ij} = \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} E_0 (1-D) \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + \frac{1}{(1+\nu)} E_0 (1-D) \varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

where σ_{ij} are the components of the stress tensor, ε_{ij} are the components of the strain tensor, $\varepsilon_{kk} = tr(\varepsilon_{ij})$, ν and E_0 denote the Poisson's ratio, and the Young's modulus of the undamaged material, respectively, δ_{ij} is the Kronecker symbol, and D is the damage variable.

Results obtained by finite element analysis are reported below. The self-healing in a concrete specimen loaded in compression is triggered after a pre-loading phase. The purpose of the pre-loading phase is to generate some crack pattern in the damageable material creating thus a need for the self-healing procedure. Numerical simulations of standard compression tests on cylindrical specimens, 160 mm in diameter and 320 mm in height, are presented. The considered example is for a concrete C35 (Figure 1). Stresses are non-dimensionalized using a factor $1/f_{c,35}$, where $f_{c,35}$ is the compressive strength of a C35 grade concrete, and the compressive strains using a factor $1/\varepsilon_{c,max}$, where $\varepsilon_{c,max}$ is the expected strain at specimen failure. After the preloading phase, specimens are unloaded, healed, and reloaded until failure. The post-healing response curves (A, B, and C) correspond to various hypothetical capacities of the self-healing agent to fill the microcrack and microcavities formed in the damaged material. The self-healing efficiency is estimated according to [11] through the index of strength recovery,

$$I_R = f_{h,m} / f_{p,u}. \quad (2)$$

In (2), $f_{h,m}$ is the maximum stress reached after initiating (and finishing) the self-healing procedure; the quantity in the denominator, $f_{p,u}$, denotes the maximum stress developed in the preloading phase, for the considered test-case $f_{p,u} = f_{c,35}$. Following this criterion, the predicted strength recovery is 38.5 %, 60.5 % and 91.7 % for cases A, B, and C, respectively. The curves A, B, and C differ in terms of the extent to which microcracks and micropores are expected to be sealed with the product of the healing process.

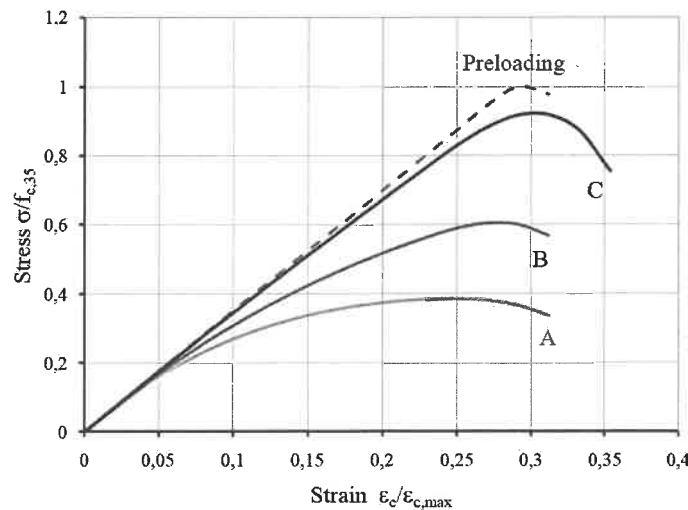


Figure 1 – Preloading of a concrete specimen and response after self-healing with various

All results are obtained using an original algorithm integrated into ANSYS Mechanical APDL. The numerical procedure allows for the simulations of the mechanical response of a damageable and healable material. In general, self-healing will potentially contribute to the better durability of structures and thereby improve the overall resilience of the infrastructure.

References

- 1 **Edvardsen, C.** Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete / C. Edvardsen // *ACI Materials Journal*. – 1999. – No. 96 (4). – P. 448–455.
- 2 Polymeric microcapsules with switchable mechanical properties for self-healing concrete: synthesis, characterisation and proof of concept / A. Kanellopoulos [et al.] // *Smart Materials and Structures*. – 2017. – 26 (4). – P. 045025.
- 3 Synthesis and characterization of epoxy encapsulating silica microcapsules and amine functionalized silica nanoparticles for development of an innovative self-healing concrete / G. Perez [et al.] // *Materials Chemistry and Physics*. – 2015. – No. 165. – P. 39–48.
- 4 A novel design of autonomously healed concrete: Towards a vascular healing network / P. Minnebo [et al.] // *Materials*. – 2015. – No. 10 (1). – P. 49.
- 5 **Sangadji, S.** Self healing of concrete structures-novel approach using porous network concrete / S. Sangadji, E. Schlangen // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2012. – No. 10 (5). – P. 185–194.
- 6 Employing ultrasonic wave as a novel trigger of microcapsule self-healing cementitious materials / N. Xu [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2021. – No. 118. – P. 103951.
- 7 Preparation and characterization of nano-Fe₃O₄/paraffin encapsulated isocyanate microcapsule by electromagnetic controlled rupture for self-healing cementitious materials / Y. Li [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – No. 265. – P. 120703.
- 8 Preparation and application of novel microcapsules ruptured by microwave for self-healing concrete / Y. Li [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2021. – No. 304. – P. 124616.
- 9 **Jonkers, H. M.** Bacteria-based self-healing concrete / H. M. Jonkers // *Heron*. – 2011. – No. 56 (1/2). P. 1–12.
- 10 **Jonkers, H. M.** Development of a bacteria-based self healing concrete / H. M. Jonkers, E. Schlangen // *Tailor made concrete structures*. – 2008. – No. 1. – P. 425–430.
- 11 Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials: An overview / L. Ferrara [et al.] // *Proceedings*. – 2018. – Vol. 2, no. 8. – P. 454.

УДК 691.17:66-96

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРСЕРНЫХ БЕТОНОВ

У. А. ЗИЯМУХАМЕДОВА

Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

Ф. Н. НУРҚУЛОВ

*Ташкентский химико-технологический научно-исследовательский институт,
Республика Узбекистан*

Г. Б. МИРАДУЛЛАЕВА, Ж. Х. НАФАСОВ

Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

На сегодня к числу наиболее распространённых бетонов из полимерных материалов следует отнести полимербетоны, бетонополимеры и полимерсерные бетоны. Этим материалам присущи не только высокая плотность, прочность, химическая стойкость и долговечность, но и высокие диэлектрические или электропроводящие характеристики. Кроме того, они сравнительно просты в изготовлении, и поэтому среди крупнейших потребителей полимерных материалов на одном из первых мест стоит строительная, а также транспортная индустрия [1].

Технология производства серного вяжущего проще и дешевле, чем технологии производства цемента. По результатам освоения производства технология производства серных вяжущих имеет следующие показатели по сравнению с традиционными способами производства цемента [2–4]:

- энергопотребление снижается в 1,5–2 раза;
- повышение экологической безопасности производства;
- капитальные затраты на организацию производства сокращаются на 40–50 %;
- достигается безотходность производства;
- стоимость снижается в 1,5–2 раза.