

УДК 624.012

## ТРАНСФОРМИРОВАННЫЕ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

**Ю.Г. Москалькова**

Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь

e-mail: [julia43@tut.by](mailto:julia43@tut.by)

*В статье представлены результаты экспериментальных исследований изменения прочностных и деформативных характеристик бетона в результате действия статического малоциклового нагружения и получены скорректированные диаграммы деформирования для бетона нормального веса на плотных заполнителях, сталефибробетона на основе стальной фибры, бетона с использованием отходов литейно-металлургических производств.*

**Ключевые слова:** бетон, диаграмма деформирования, малоцикловое нагружение, бетон нормального веса, сталефибробетон, бетон с отходами производств.

## TRANSFORMED STRAIN-STRESS CURVES OF CONCRETE UNDER THE STATIONARY CYCLIC LOADING

**Y. Maskalkova**

Belarusian-Russian University, Mogilev, Republic of Belarus

e-mail: [julia43@tut.by](mailto:julia43@tut.by)

*The article presents the experimental studies results of changes in the strength and deformation characteristics of concrete as a result under the stationary cyclic loading. Corrected strain-stress curves are obtained for normal weight aggregate concrete, steel fiber reinforced concrete, waste foundry sand concrete.*

**Keywords:** concrete, strain-stress curve, low-cycle loading, normal weight aggregate concrete, steel fiber reinforced concrete, waste foundry sand concrete.

**Введение.** Понимание механических свойств и энергетической эффективности бетона при циклическом нагружении является актуальной задачей в разных отраслях строительства [1–4]. Помимо прочего, некоторыми учеными были разработаны модели, позволяющие прогнозировать поведение бетона при циклическом нагружении [5, 6]. Однако все исследования направлены на изучение только одного вида бетона в определенном диапазоне прочностей, и предлагаемые математические модели не могут быть адаптированы для бетонов других видов. На сегодняшний день кроме широко применяемого в строительстве традиционного бетона на плотных заполнителях, широкое применение также находят альтернативные виды бетонов, например, сталефибробетон [7, 8] и бетон с использованием отходов литейно-металлургических производств в качестве мелкого заполнителя при полной и частичной замене песка в рецептуре бетонной смеси [9, 10].

Предметом исследования являлись призмы и цилиндры, изготовленные из бетонов трех видов: традиционный бетон нормальной прочности с использованием гранитного щебня и карьерного песка в качестве заполнителей, сталефибробетон на основе традиционного бетона на плотных заполнителях с дисперсным армированием стальной фиброй треугольного сечения, бетон с использованием отходов литейно-металлургических производств в качестве мелкого заполнителя (ОМП-бетон).

Цель исследования – предложить описание трансформированной диаграммы деформирования для исследуемых видов бетона путем корректировки параметрических точек диаграммы с учетом уровня малоциклового нагружения и специфических свойств бетона.

**Экспериментальная часть.** Общеизвестно, что прочностные характеристики бетона при сжатии изменяются в результате приложения циклических нагрузок по сравнению с монотонным нагружением до разрушения [11].

Для выявления особенностей изменения параметрических точек диаграммы состояния была составлена программа испытания опытных образцов, включающая следующие режимы нагружения:

1. циклическое нагружение среднего уровня ( $\eta_{top} = 0,6-0,7$ );
2. циклическое нагружение высокого уровня ( $\eta_{top} = 0,8-0,85$ );
3. изменение уровня циклического нагружения со среднего на высокий (с  $\eta_{top} = 0,6-0,7$  до  $\eta_{top} = 0,8-0,85$ );
4. изменение уровня циклического нагружения на более высокий с последующим возвращением к предыдущему уровню ( $\eta_{top} = 0,6-0,7$ , изменение на одном из средних циклов до  $\eta_{top} = 0,9$ ).

Режимы нагружения опытных образцов на примере 10-и циклов нагружения с разрушением на 11-м цикле схематично представлены на рисунке 1.

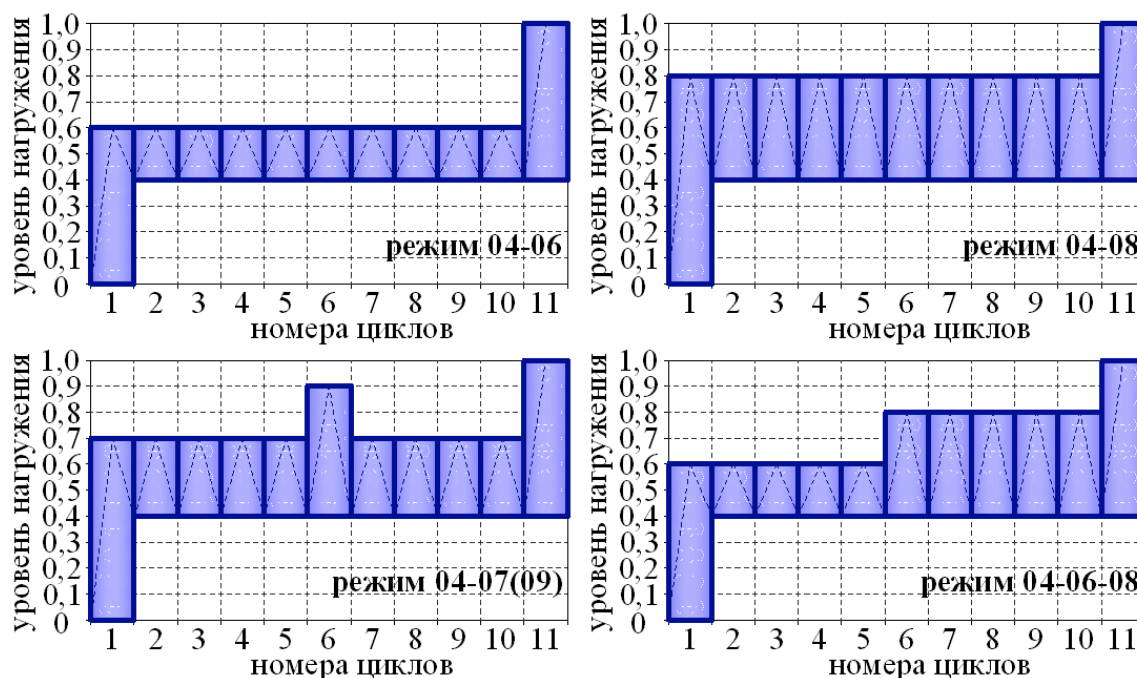


Рисунок 1. – Режимы приложения малоциклового нагружения к опытным образцам

Опытные образцы изготавливались в виде призм с размерами 150×150×600 мм и цилиндров диаметром 150 мм, высотой 300 мм. Образцы формовались из бетона, изготовленного на ОАО «Могилёвжелезобетон», со следующим составом бетонной смеси: Ц: П : Щ = 1 : 1,8 : 5,2, В/Ц = 0,7 (Ц – цемент, П – песок, Щ – щебень, В/Ц – водоцементное отношение). Использовался портландцемент марки М500 производства ОАО «Красносельскстройматериалы», г. Гродно. Модуль крупности песка составил  $M_{кр} = 1,16$ , насыпная плотность – 1460 кг/м<sup>3</sup>, истинная плотность – 2570 кг/м<sup>3</sup>. Процент фибрового армирования сталефибробетона по объему –  $\rho_{fv} = 0,5\%$ .

Эмпирически было установлено, что с повышением уровня нагружения прочность бетона снижается. В связи с этим при разработке аналитического описания трансформированной диаграммы состояния представлялось целесообразным использовать корректирующий коэффициент  $\gamma_{c,cyc}$ , который учитывал бы неблагоприятное влияние циклически меняющейся нагрузки. Для высокопрочных бетонов снижение прочности может быть менее значительным, чем для бетонов низких классов, в связи с более высокими границами микротрещинообразования, что подразумевает более высокий уровень малоциклового приспособляемости.

Если при определении  $\gamma_{c,cyc}$  учесть верхний уровень микротрещинообразования  $\eta_{cr}^V$ , тогда формула для расчёта данного коэффициента может быть универсальной и применимой для бетонов различных видов и классов.

Исключение составляют материалы, которые остаются стабильными при воздействии малоциклового нагружения. В частности для сталефибробетона коэффициент условий работы можно принять равным 1,0 ( $\gamma_{c,cyc} = 1,0$ ), поскольку прочность сталефибробетона ввиду наличия металлической фибры не снижается, а несколько увеличивается. Однако такое увеличение незначительно и может быть отнесено к погрешности прессового оборудования, соответственно, не должно учитываться в расчете.

По результатам исследований для определения коэффициента, учитывающего изменение прочности бетона, получена следующая зависимость при  $\eta_{top} < 1,0$ :

$$\gamma_{c,cyc} = \frac{1}{0,97\sqrt{\eta_{cr}^V} - 0,3\ln\eta_{top}} \quad (1)$$

Коэффициент условий работы  $\gamma_{c,cyc}$  может быть понижающим или повышающим в зависимости от режима нагружения: при низких ( $\eta_{top} \leq \eta_{cr}^V$ ) и средних ( $\eta_{cr}^0 \leq \eta_{top} < \eta_{cr}^V$ ) уровнях циклической нагрузки коэффициент является повышающим; при высоких уровнях ( $\eta_{top} > \eta_{cr}^V$ ) – понижающим. Зависимость (1) обеспечивает удовлетворительную сходимость с эмпирическими данными (отклонение в пределах 10 %). Результаты сравнения приведены на гистограмме (рисунок 2).

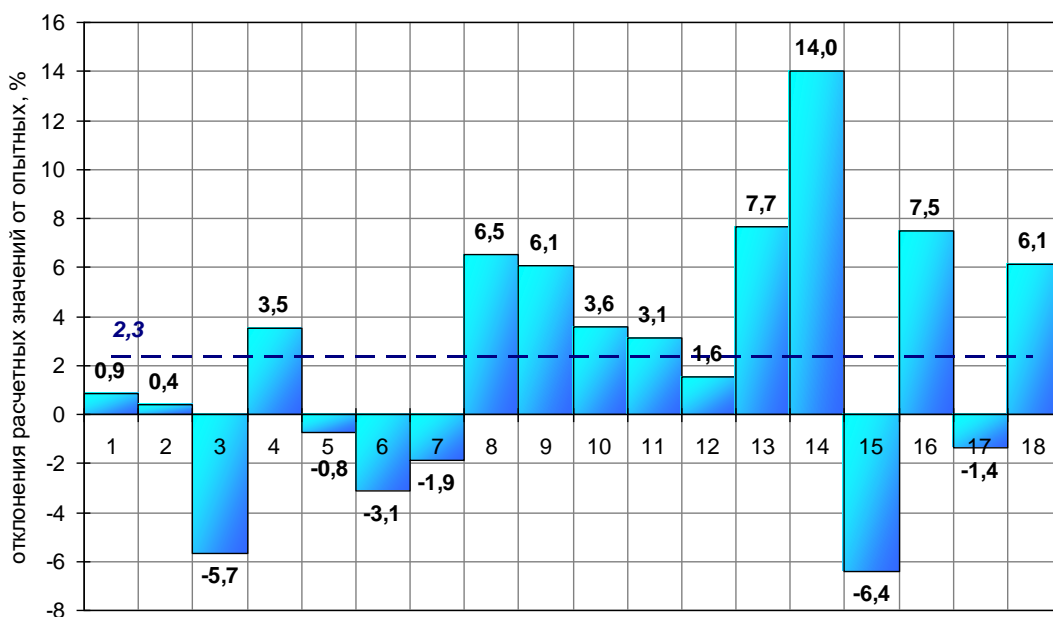


Рисунок 2. – Сравнение расчетных и опытных значений коэффициента условий работы  $\gamma_{c,cyc}$ : значения 1-10 – для бетона нормального веса на плотных заполнителях; значения 11-18 – для ОМП-бетона

Введение коэффициента  $\gamma_{c,cyc}$  позволяет определить прочность бетона при малоцикловых нагрузках различных уровней:

$$f_{c,cyc} = \frac{f_c}{\gamma_{c,cyc}} \quad (2)$$

По уточненному значению предела малоцикловой прочности  $f_{c,cyc}$  по могут быть определены относительные деформации  $\epsilon_{c1,cyc}$ , соответствующие пиковой точке трансформированной диаграммы деформирования бетона:

$$\epsilon_{c1,cyc} = 0,7f_{c,cyc}^{0,31} \leq 2,8\% \quad (3)$$

На основании эмпирических данных Sargin, Popovics в работе [12] зависимость для определения предельных деформаций традиционного бетона нормального веса получена, исходя из соотношения  $\epsilon_{cu}/\epsilon_{c1}$ :

$$\epsilon_{cu,cyc} = \left(1 + \frac{20}{f_{c,cyc}}\right) \cdot \epsilon_{c1,cyc} \leq 3,5\% \quad (3)$$

Очевидно, что ввиду особенностей деформирования ОМП-бетона данная зависимость не обеспечивает получение корректных значений, т. к. высокое значение  $\eta_{cr}^y$  обуславливает хрупкий характер разрушения. Поэтому значение предельных деформаций ОМП-бетона будет меньшим по сравнению с традиционным бетоном [13]:

$$\epsilon_{cu,cyc}^{ОМП} = \left(1 + \frac{16}{f_{c,cyc}^{ОМП}}\right) \cdot \epsilon_{c1,cyc}^{ОМП} \leq 3,2\% \quad (4)$$

Общий вид трансформированной диаграммы деформирования при малоцикловом нагружении по сравнению с традиционной диаграммой при монотонном нагружении приведен на рисунке 3.

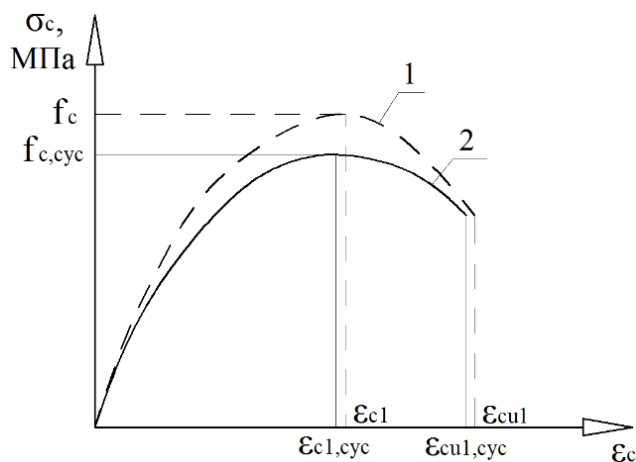
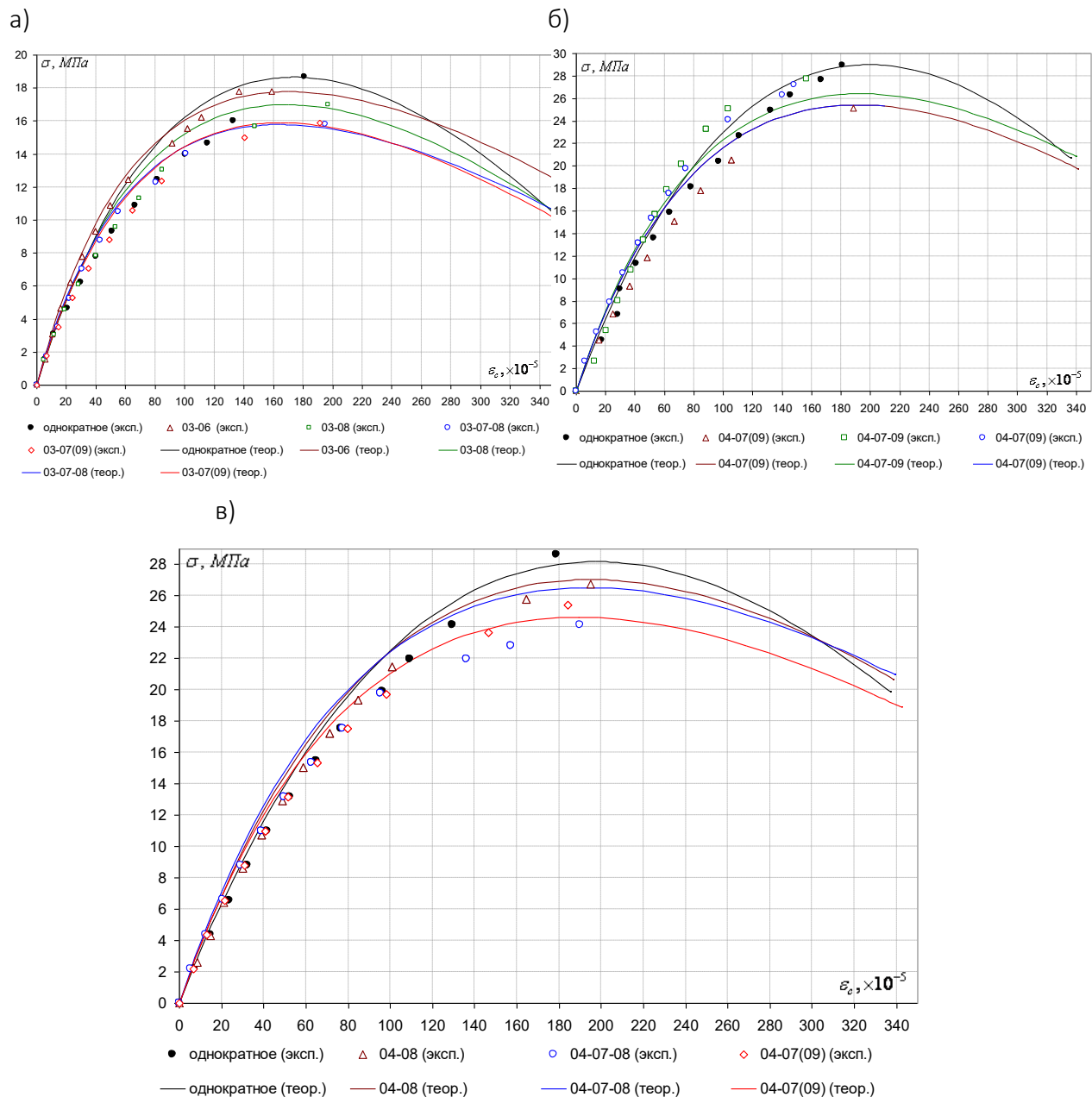


Рисунок 3. – Традиционная (1) и трансформированная (2) диаграммы деформирования бетона

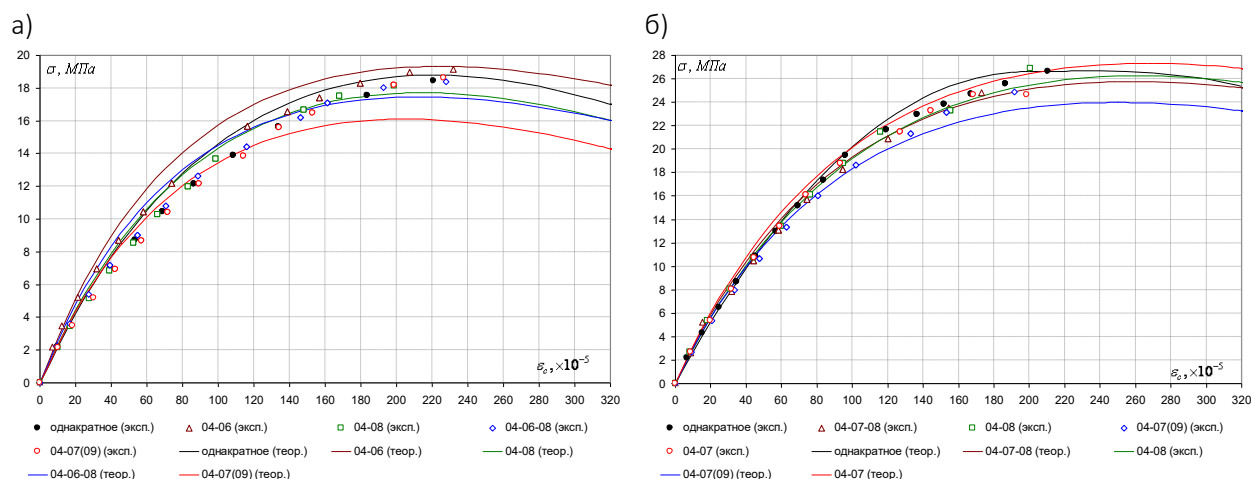
Экспериментально доказано, что малоцикловое нагружение не влияет на прочностные и деформативные характеристики сталефибробетона, т. е. нет необходимости в корректировке диаграммы.

На рисунках 4 и 5 показаны опытные точки восходящих ветвей диаграмм деформирования и теоретические кривые полных диаграмм деформирования традиционного бетона нормального веса и ОМП-бетона при малоцикловом нагружении различных уровней (опытные кривые построены по предложенной методике с корректировкой параметрических точек, теоретические кривые – согласно положениям СП 5.03.01 и Eurocode-2).



а) –  $f_{cm}=18,7$  МПа;  $f_{c,cube,m}=23,3$  МПа; б) –  $f_{cm}=28,2$  МПа;  $f_{c,cube,m}=36,1$  МПа;  
в) –  $f_{cm}=29,0$  МПа;  $f_{c,cube,m}=36,7$  МПа

Рисунок 4. – Теоретические кривые и опытные точки диаграмм деформирования бетона нормального веса при малоцикловом нагружении



а) –  $f_{cm}=18,8$  МПа;  $f_{fc,cube,m}=24,5$  МПа; б) –  $f_{cm}=26,6$  МПа;  $f_{fc,cube,m}=32,8$  МПа

Рисунок 5. – Теоретические кривые и опытные точки диаграмм деформирования ОМП-бетона при малоцикловом нагружении

**Заключение.** В ходе исследований получены трансформированные диаграммы деформирования бетона при сжатии, которые могут быть применены в расчетных моделях сопротивления сечений, нормальных к продольной оси железобетонного элемента, при выполнении проверок предельных состояний несущей способности в условиях действия малоцикловых нагрузок при уровнях нагружения  $\eta \approx 0,4-0,6$ ;  $0,4-0,8$  со скачком до  $\eta \approx 0,9$  на одном из средних циклов. Трансформация диаграмм деформирования основана на применении аналитической зависимости, приведенной в СП 5.03.01 и Eurocode-2, и введении частного коэффициента  $\gamma_{c,cyc}$ , учитывающего влияние малоциклового нагружения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Romanov, A.N. Damage accumulation and limit states under the low-cycle loading of structural softening steel / A.N. Romanov // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Vol. 142, Article 106836. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106836>.
- Zhang, D. Study on Mechanical Properties and Damage Evolution of High-Porosity Concrete under Cyclic Loading and Unloading / Dong Zhang et. al. // Advances in Civil Engineering. – 2021. – No 2021(4):1-8. – 8 p. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6594889>.
- Fang, L. Transformation of an Industrial Zone into an Urban Park: Reconstruction of Buildings / Liu Fang, Yu. G. Maskalkova // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – Voronezh: VSTU, 2024. – No 1 (61). – Pp. 110–119. – DOI: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2024.61.1.010>.
- Fardoun, H. Earth concrete under cyclic loadings: Stress-strain curves and damage assessment by means of acoustic emission and digital image correlation techniques / Hassan Fardoun, Jacqueline Saliba, Nadia Saiyouri // Mechanics Research Communications. – 2023. – Vol. 131, Article 104158. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2023.104158>.
- Aslani, F. Stress-strain model for concrete under cyclic loading / Farhad Aslani, Raha Jowkarmeimandi // Magazine of Concrete Research. – 2012. – No 64(8), Paper 1100120. – P. 673–685. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/macrcr.11.00120>.
- Wan, P. A Strain Rate-Dependent Damage Evolution Model for Concrete Based on Experimental Results / Peng Wan, Xiaoyan Lei, Bin Xu, Hui Song // Advances in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 2021, Article ID 6643263. – 8 p. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6643263>.
- Salem, N. Steel fibre-reinforced concrete: review / Nehme Salem, Abeidi AYMAN // Journal of Silicate Based and Composite Materials. – 2023. – Vol. 75, No. 1. – 25 p. – DOI: <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2023.03>.

8. Błaszczyński, T. Steel Fibre Reinforced Concrete as a Structural Material / Tomasz Błaszczyński, Marta Przybylska-Fałek // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 122. – P. 282–289. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.037>.
9. Jawad, A. Waste Foundry Sand in Concrete Production Instead of Natural River Sand: A Review / Jawad Ahmad et. al. // Materials. – 2022. – No 15 (7), Article 2365. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15072365>.
10. García, G. Systematic review on the use of waste foundry sand as a partial replacement of natural sand in concrete / Gilberto García, René Cabrera, Julio Rolón, Roberto Pichardo, Carlos Thomas // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 430, Article 136460. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136460>.
11. Семенюк, С. Д. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом и малоцикловом нагружениях : моногр. / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Москалькова. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2017. – 274 с. : ил. ISBN 978-985-492-177-8. – URL: <http://e.biblio.bru.by/handle/1212121212/4996>.
12. Тур, В.В. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций : моногр. / В.В. Тур, Н.А. Рак. – Брест: Издательство БГТУ, 2003. – 252 с.
13. Гладков, Д.И. Физико-химические основы прочности бетона и роль технологии в ее обеспечении. – Белгород: БГТУ им. В.Т. Шухова, 2004. – 293 с.