

DOI: 10.15593/2409-5125/2024.01.02

УДК 691.32

Б.И. Пинус, И.Г. Корнеева

Иркутский национальный исследовательский технический университет

ОБОБЩЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ С УЧЕТОМ УСТАЛОСТНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КОМПОЗИТОВ

Рассматривается вопрос учета нестационарных внешних воздействий в течение жизненного цикла цементно-матричных обычных и фиброармированных (полипропилен) композитов. Предлагается их моделировать эквивалентным по функциональным последствиям количеством «базовых» (регламентированных) циклов. Экспериментально подтверждена приемлемость использования параметра динамики энергии внутреннего сопротивления композитов в качестве коэффициентов приведения случайного спектра ожидаемых воздействий к расчетному «базовому» эквиваленту. Анализируется среднецикловая (удельная) изменяемость в процессе монотонного сжатия с постоянной скоростью деформирования различных показателей внутреннего сопротивления в процессе «приспособляемости» к цикловым воздействиям различной амплитуды. Установлены неоднозначность кинетики воздействия и нормативных параметров деформационного отклика, высокая чувствительность и сравнительная тождественность изменения энергетических показателей. Подтверждена повышенная усталостная сопротивляемость фибросодержащих композитов.

Ключевые слова: усталость, критерии сопротивления, обобщение воздействий.

Проектирование железобетонных конструкций в соответствии с нормативными требованиями должно исключать вероятность «... пластического, вязкого и усталостного разрушения»¹ в течение эксплуатационного периода жизненного цикла. Их практическая реализация состоит в выполнении формализованных функциональных связей усилий и сопротивления, параметры которых принимаются в виде детерминируемых нормативных значений. Такой подход ограничивает возможности учета изменения свойств материалов и их структуры вследствие образования и накопления локальных повреждений под влиянием внешних воздействий флуктуационной интенсивности и частоты². То есть не анализируются последствия взаимодействия среды и конструкции как факторов усталостной деградации,

¹ СП 63.13330-2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М., 2012.

² ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований, п.п. 11.1, 11.5. – М., 2014.

подтверждаемой многочисленными данными технического мониторинга и научных исследований [1–5].

Различная природа и случайный характер нестационарных воздействий, неоднозначность инициируемых ими последствий, их взаимозависимость затрудняют функциональную формализацию рассматриваемых процессов [6–12]. Становится целесообразным косвенный учет подобных явлений посредством системного моделирования с соблюдением тождественности сопутствующих изменений показателей эксплуатационной пригодности. Одним из вариантов такого подхода является приведение спектра нестационарных воздействий к эквивалентному (по последствиям) количеству условных «базовых» циклов – возможно, стандартизированных. Экспериментально-аналитическое обоснование условий обобщения внешних воздействий является целевой задачей настоящего исследования.

Методика исследования. В качестве исходных используются следующие условия и предпосылки:

1) внешние воздействия моделируются циклами «нагрузка – разгрузка» различной амплитуды и нулевой асимметрии;

2) отклик композитов рассматривается как случайный временной процесс с кумулятивными последствиями, кинетика которого зависит от интенсивности нагружения (σ_{\max});

3) «базовым» принимается цикл с $\sigma_{\max} = 0,6R_b$ как соответствующий экспериментально установленному пределу линейного накопления усталостных повреждений [13];

4) чувствительность различных параметров композитов к изменению интенсивности нагружения в цикловом режиме оценивается по среднецикловым (удельным) значениям на этапе относительной стабилизации состояния (приспособляемости) [13].

Динамические испытания проводились на призматических образцах ($100 \times 100 \times 400$ мм) зрелого (более 60 дней) возраста, изготовленных:

а) из обычного бетона (Ц : П : Щ : В = 1 : 1,42 : 3,31 : 0,55) при расходе цемента 380 кг/м^3 – серия «ОБ»;

б) фибробетона аналогичного состава с 1,5 % объемным содержанием полипропиленовых волокон диаметром 0,8 и длиной 40 мм – серия «ФБ».

Расход всех компонентов и их фракционный состав рассчитаны с учетом условий оптимальности по критериям деформационного взаи-

модействия фибр [14]. Технология изготовления, твердения и хранения соответствовали стандартным требованиям и рекомендациям.

Цикловым воздействиям предшествовала калибровочная ультразвуковая выбраковка и контрольные испытания в монотонном сжатии до разрушения (табл. 1).

Таблица 1

Показатели прочности и деформативности в исходном состоянии

Серия	Призмная прочность R_b , МПа	Модуль упругости E_b , ГПа	Уровень границы микроразрушений*		Деформации, %**	
			R_{crc}^o	R_{crc}^v	ε_0	ε_{max}
ОБ	43,57	26,58	0,47	0,87	0,13	2,47
ФБ	35,79	22,61	0,32	0,74	0,48	2,60

Примечание: * – в долях от R_b ; ** – пиковые деформации.

Динамические испытания проведены с использованием автоматизированного комплекса Instron 5989 по специально разработанной программе:

- с постоянством скорости деформирования 0,04 мм/с;
- точностью нагружения 1 кН;
- непрерывной записью диаграмм σ – ε с точностью $1 \cdot 10^{-5}$ ед., модуля упругости и затрачиваемой энергии на этапах нагрузки и разгрузки;
- контролем поперечных, продольных и объемных деформаций;
- определением площади петли гистерезиса (S_p) и остаточных деформаций (ε_{res}).

Уровень максимальных напряжений находился в диапазоне $\eta = 0,6$ – $0,9$ при нулевой асимметрии. Фиксация контролируемых параметров велась через 10 циклов воздействий при максимальной базе испытаний $N = 300$.

Результаты испытаний и их обсуждение. В табл. 2 представлены данные динамики различных контролируемых параметров деформационного отклика композитов на циклические воздействия свыше условно принятого «базового» уровня. Ввиду существенных различий откликов на изменения амплитуды циклового воздействия, анализ чувствительности контролируемых параметров внутреннего сопротивления ведется отдельно для опытных составов композитов.

Таблица 2

Относительное (к «базовому») изменение показателей воздействия
и отклика композитов

Серия	Уровень нагружения σ_{\max}		Изменение деформаций					
	абсолютный	относительный	в исходном состоянии			циклическом процессе*		
			ε_0	$\varepsilon(\eta)$	ε'_0	$\varepsilon'(\eta)$	ε_{res}	$\varepsilon(\eta)$
	0,6	1	1	1	1	1	1	1
ОБ	0,7	1,17	1,33	1,31	1,12	1,28	2,41	2,46
	0,8	1,34	1,52	1,59	1,47	1,82	3,6	2,93
	0,9	1,51	1,61	1,72	1,58	2,64	3,62	3,02
ФБ	0,7	1,17	1,03	1	0,76	1,57	1,05	1,04
	0,8	1,34	1	0,95	0,75	2,37	1,05	1,25
	0,9	1,51	1	1,57	1,22	6,8	3,25	2,08

Примечание: * – на этапе стабилизации состояния.

Начальное нагружение призм серии «ОБ» характеризуется незначительным (10–18 %) превышением динамики показателей деформационного отклика над уровнем роста напряжений. Но при $\sigma_{\max} \geq R_{cr}$ происходит резкое увеличение поперечных деформаций, свидетельствующее о формировании критических магистральных трещин. Это подтверждается кратным возрастанием полных и необратимых (ε_{res}) деформаций в установившемся циклическом режиме.

Что касается фибробетонов, то их поведение при нагружениях рассматриваемого диапазона η характеризуется практической стабильностью показателей продольных и поперечных деформаций. Снижение остаточных ε'_0 при $\eta \leq 0,8$ сменяется умеренным ростом при больших нагрузках. Одновременно происходит преобладающая динамика абсолютных поперечных деформаций. Предположительно это объяснимо влиянием фиброволокон, замедляющих раскрытие трещин, и структурной трансформацией за счет сдвиговых микродеформаций на начальных перепадах напряженно-деформированного состояния (НДС) [15–20]. Последнее подтверждается тождественной динамикой остаточных деформаций в цикловом режиме.

В связи с установленными существенными различиями динамики воздействия и отдельных параметров инициируемого отклика проведено сравнение кинетики нагружения и энергетических затрат, расхо-

двумя на упругое W_e и необратимое деформирование в полном цикле воздействия W_p (табл. 3, рисунок).

Таблица 3

К оценке изменения энергетических затрат цикла

Серия	Уровень нагружения		Показатели циклового отклика					Энергия цикла		Коэффициент изменения	
	η	сравнительный	σ_{max} , МПа	$\varepsilon^*(\eta)$, ‰	W_{ps} , Па·мм/мм	ε^*_{res} , ‰	ε^*_{e2} , ‰	полная W	упругая W_e	$\frac{W_i}{W_{эк}}$	$\frac{W_i}{W_{р3}}$
ОБ	0,6	1	26,2	128	965	34	94	2197	1232	1	1
	0,7	1,17	30,6	156	1321	47	109	2989	1668	1,35	1,37
	0,8	1,34	35	192	1720	64	128	3961	2241	1,82	1,78
	0,9	1,51	39,4	228	2225	98	130	4837	2803	2,28	2,31
ФБ	0,6	1	21,4	144	733	57	87	1664	931	1	1
	0,7	1,17	25	166	1137	66	100	2382	1245	1,34	1,55
	0,8	1,34	28,5	185	1229	72	113	2834	1605	1,72	1,68
	0,9	1,51	32,0	192	1884	86	106	3574	1690	1,82	2,57

Примечание: * – соответствует увеличению фактических значений в 10^5 .

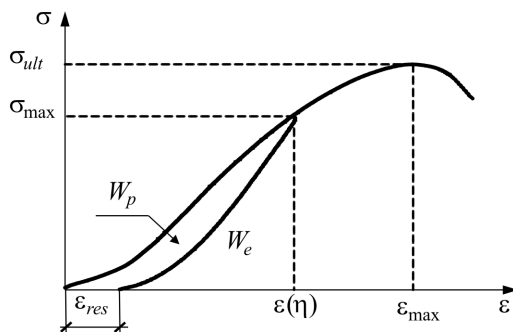


Рис. Расчетная модель энергетических затрат

При этом затрачиваемая энергия W рассматривается как обобщенный показатель отклика образцов на внешнее воздействие, упругая составляющая которого равна

$$W_e = 0,5\sigma_{max} (\varepsilon(\eta) - \varepsilon_{res}),$$

а на структурное деформирование расходуется энергия W_p , численно равная площади петли гистерезиса.

Необходимо отметить, что в отличие от рассмотренной ранее динамики деформативных показателей изменения энергетических параметров с увеличением интенсивности циклового нагружения однозначны для композитов обеих серий. При этом доля энергии, расходуемой на необратимые структурные трансформации, практически одинакова (56–58 %) на всем исследуемом диапазоне воздействий. Ее постоянство позволяет предполагать возможность использования коэффициентов изменения энергетических затрат в качестве параметров обобщения спектра случайных воздействий к эквивалентным, «базовым», тождественным по усталостным последствиям.

Выводы. Проектный прогноз усталостных изменений сопротивления бетонов (фибробетонов) возможен посредством обобщения спектра ожидаемых воздействий к соответствующему количеству «базовых», эквивалентных по последствиям.

В качестве коэффициентов приведения могут использоваться показатели соотношения энергетических затрат «базовой» и рассматриваемой амплитуд цикла.

Библиографический список

1. Берг, О.Я. Физические основы прочности бетона и железобетона / О.Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.
2. Каранфилов, Т.С. Статистический анализ экспериментальных данных и определение расчетных сопротивлений бетона на выносливость / Т.С. Каранфилов, Н.С. Клепикова // Прочность и деформативность бетона специальных железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1972. – 191 с.
3. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
4. Корчинский, И.Л. Прочность строительных материалов при динамических нагружениях / И.Л. Корчинский. – М.: Стройиздат 1966. – 212 с.
5. Маилян, Л.Р. Работа бетона и арматуры при многократно повторных нагружениях / Л.Р. Маилян. – Нальчик, 1984. – 55 с.
6. Москвитин, В.В. Циклическое нагружение элементов конструкций / В.В. Москвитин. – М.: Наука, 1981. – 344 с.
7. Расторгуев, Б.С. Основные положения рекомендаций к нормам проектирования конструкций на действие малоциклового кратковременных и длительных нагрузок / Б.С. Расторгуев // Методы расчета и конструирования железобетонных конструкций. – М.: Минск. гос. строит. ун-т, 1996.
8. Cao, V.V. A model for damage analysis of concrete / V.V. Cao, H.R. Ronagh // Advances in Concrete Construction. – 2013. – Vol. 1, no. 2. – P. 187–200.
9. Fathima, K.M.P. A thermodynamic framework for the evolution of damage in concrete under fatigue / K.M.P. Fathima, J.M.C. Kishen // Archive of Applied Mechanics. – 2015. – No. 85 (7). – P. 921–936. DOI: 10.1007/s00419-015-1001-z
10. Experimental study on dynamic damage evolution of concrete under multi-axial stresses / J.Y. Chen, Z.X. Zhang, H.W. Dong, J. Zhu // Engineering Failure Analysis. – 2011. – No. 18. – P. 1784–1790.

11. Gopalaratnam, V.S. Failure Mechanisms and Fracture of Fiber Reinforced Concrete Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications / V.S. Gopalaratnam, S.P. Shah // SP-105. – Detroit: American Concrete Institute, 1987. – P. 1–25.
12. Isojeh, B. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression / B. Isojeh, M. El-Zeghayar, F.J. Vecchio // *Aci Materials Journal*. – 2017. – No. 114 (2). – P. 225–235. DOI: 10.14359/51689477
13. Павлинов, В.В. Надежность железобетонных конструкций при кратковременных цикловых нагрузениях: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Павлинов. – М.: Моск. гос. строит. ун-т, 2000. – 23 с.
14. Рабинович, Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов / Ф.Н. Рабинович // Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. – М.: АСВ, 2011. – 639 с.
15. Сорокин, Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е.С. Сорокин. – М.: Госстройиздат, 1960. – 253 с.
16. Пановко, Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем / Я.Г. Пановко. – М.: Госиздат физ.-мат. литературы, 1960. – 196 с.
17. Baktheer, A. Classification and evaluation of phenomenological numerical models for concrete fatigue behavior under compression / Baktheer A., Chudoba R. // *Construction and Building Materials*. – 2019. – No. 221 (1). – P. 661–677. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.022
18. Banthia, N. Fracture Toughness of Micro-Fiber Reinforced Cement Composites / N. Banthia, J. Sheng // *Cement and Concrete Composites*. – 1996. – No. 18. – P. 251–269.
19. Haar, C. von der. A strain model for fatigue loaded concrete / C. von der Haar, S. Marx // *Structural Concrete*. – 2017. – Vol. 19 (2). – P. 463–471. DOI: 10.1002/suco.201700029
20. A study on the simulation method for fatigue damage behavior of reinforced concrete structures / J. Liang, X. Nie, M. Masud [et al.] // *Engineering Structures*. – 2017. – No. 150. – P. 25–38.

References

1. Berg O.Ya. Fizicheskie osnovy` prochnosti betona i zhelezobetona [The physical foundations of the strength of concrete and reinforced concrete]. Moscow, Gosstroyizdat, 1962, 96 p.
2. Karanfilov T.S., Klepikova N.S. Statisticheskij analiz `eksperimental`ny`x danny`x i opredelenie raschetny`x soprotivlenij betona na vy`noslivost` [Statistical analysis of experimental data and determination of calculated concrete resistance for endurance] *Prochnost` i deformativnost` betona special`ny`x zhelezobetony`x konstrukcij*. Moscow, Stroyizdat, 1972, 191 p.
3. Karpenko N.I. Obshhie modeli mexaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow, Stroyizdat, 1996, 416 p.
4. Korchinsky I.L. Prochnost` stroitel`ny`x materialov pri dinamicheskix zagruzheniyax [Strength of building materials under dynamic loads]. Moscow, Stroyizdat 1966, 212 p.
5. Mailyan L.R. Rabota betona i armatury` pri nemnogokratno povtorny`x nagruzheniyax [The work of concrete and reinforcement under slightly repeated loads]. Nalchik, 1984, 55 p.
6. Moskvitin V.V. Ciklicheskoe zagruzhenie e`lementov konstrukcij [Cyclic loading of structural elements]. Moscow, Nauka, 1981, 344 p.
7. Rastorguev B.S. Osnovny`e polozheniya rekomendacij k normam proektirovaniya konstrukcij na dejstvie malociklovyy`x kratkovremenny`x i dlitel`ny`x nagruzok [The main provisions of the recommendations to the standards of design of structures for the action of low-cycle short-term and long-term loads] *Metody` rascheta i konstruirovaniya zhelezobetony`x konstrukcij*. Moscow, Moskovskij gosudarstvenny`j stroitel`ny`j universitet, 1996.
8. Cao V.V., Ronagh H.R. A model for damage analysis of concrete. *Advances in Concrete Construction*, 2013, Vol. 1, no. 2, pp. 187-200.
9. Fathima K.M.P., Kishen J.M.C. A thermodynamic framework for the evolution of damage in concrete under fatigue. *Archive of Applied Mechanics*, 2015, no 85 (7), pp.921-936. DOI.org/10.1007/s00419-015-1001-z

10. Chen J.Y., Zhang Z.X., Dong H.W., Zhu J. Experimental study on dynamic damage evolution of concrete under multi-axial stresses. *Engineering Failure Analysis*, 2011, no. 18, pp. 1784-1790.
11. Gopalaratnam V.S., Shah S.P. Failure mechanisms and fracture of fiber reinforced concrete fiber reinforced concrete properties and applications. *SP-105*, Detroit, American Concrete Institute, 1987, pp. 1-25.
12. Isojeh B, El-Zeghayar M, Vecchio F.J. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression. *ACI Materials Journal*, 2017, no. 114 (2), pp. 225-235. DOI: 10.14359/51689477
13. Pavlinov V.V. Nadezhnost' zhelezobetonny'x konstrukcij pri kratkovremenny'x ciklovyy'x zagruzheniyax [Reliability of reinforced concrete structures during short-term cyclic loads]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2000, 23 p.
14. Rabinovich F.N. Kompozity' na osnove dispersno-armirovanny'x betonov. Voprosy' teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstrukcii [Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, construction]. Moscow, Associaciya stroitel'ny'x vuzov, 2011, 639 p.
15. Sorokin E.S. K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyax uprugix sistem [On the theory of internal friction during vibrations of elastic systems]. Moscow, Gosstroyizdat, 1960, 253 p.
16. Panovko Ya.G. Vnutrennee trenie pri kolebaniyax uprugix sistem [Internal friction during vibrations of elastic systems]. Moscow, Gosizdat fiziko-matematicheskoy literatury', 1960, 196 p.
17. Baktheer A., Chudoba R. Classification and evaluation of phenomenological numerical models for concrete fatigue behavior under compression. *Construction and Building Materials*, 2019, no. 221 (1), pp. 661-677. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.022
18. Banthia N., Sheng J. Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 1996, no. 18, pp. 251-269.
19. Von der Haar C., Marx S. A strain model for fatigue loaded concrete. *Structural Concrete*, 2017, Vol. 19 (2), pp. 463-471. DOI: 10.1002/suco.201700029
20. Liang J., Nie X., Masud M. et al. A study on the simulation method for fatigue damage behavior of reinforced concrete structures. *Engineering Structures*, 2017, no. 150, pp. 25-38.

B. Pinus, I. Korneeva

GENERALIZATION OF NONSTATIONARY EXTERNAL INFLUENCES TAKING INTO ACCOUNT FATIGUE CHANGES IN COMPOSITES

The issue of design forecasting of fatigue behavior of conventional and fiber reinforced concrete is considered by reducing the expected spectrum of random external influences to a conditional (equivalent in response effects) "basic" one. The average cycle (specific) variability in the process of monotonous compression with a constant rate of deformation of various internal resistance indicators in the process of "adaptability" to cyclic influences of various amplitudes is analyzed. The ambiguity of the kinetics of the impact and the normative parameters of the deformation response, high sensitivity and comparative identity of changes in energy parameters are established. The increased fatigue resistance of fiber-containing composites has been confirmed.

Keywords: fatigue, resistance criteria, generalization of impacts.

Пинус Борис Израилевич (Иркутск, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного производства, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, 664074, ул. Лермонтова, 83, e-mail: pinus@istu.edu).

Корнеева Инна Геннадьевна (Иркутск, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, 664074, ул. Лермонтова, 83, e-mail: kornee-inna@yandex.ru).

Boris Pinus (Irkutsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Production, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., 664074, Irkutsk, e-mail: pinus@istu.edu).

Inna Korneeva (Irkutsk, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Production, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., 664074, Irkutsk, e-mail: kornee-inna@yandex.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Поступила: 05.02.2024

Одобрена: 25.02.2024

Принята к публикации: 11.03.2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Пинус, Б.И. Обобщение нестационарных внешних воздействий с учетом усталостных изменений композитов / Б.И. Пинус, И.Г. Корнеева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2024. – № 1. – С. 28–36. DOI: 10.15593/2409-5125/2024.01.02

Please cite this article in English as: Pinus B., Korneeva I. Deformation response as a criterion of fatigue changes in cement composites. *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development*, 2024, no. 1, pp. 28-36. DOI: 10.15593/2409-5125/2024.01.02