

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.012.454

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-1-150-163

Д.Н. СМЕРДОВ,

Сибирский государственный университет путей сообщения

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ РЕЛАКСАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, РАБОТАЮЩИХ В СОСТАВЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НАГРУЗОК

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния перепада температур на работу изгибаемых железобетонных конструкций, внешне армированных полимерными композиционными материалами, на основе углеродных волокон, длительно находящихся под воздействием статических нагрузок.

Построены кривые релаксации и напряжений полимерных композиционных материалов для испытанных серий образцов.

На основе полученных экспериментальных данных сделан вывод о влиянии перепада температур на работу длительно нагруженных изгибаемых железобетонных конструкций с внешним армированием полимерными композиционными материалами на основе углеродных волокон.

Ключевые слова: углеродное волокно; полимерный композиционный материал; углеродные ленты; нетканые полотна из плетеных волокон; композитные углепластиковые ламели; сетки с пропиткой стирол-бутадиеновой композицией; углеродные анкерные жгуты; двухкомпонентные эпоксидные связующие; несущая способность; модуль упругости, или модуль Юнга; внешнее армирование; прогибы; железобетонный элемент; прочность; жесткость; деформация; напряженно-деформированное состояние; релаксация; предел прочности; балка; арматура.

Для цитирования: Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования влияния температурной релаксации и напряжения полимерных композиционных материалов, работающих в составе изгибаемых железобетонных элементов, при длительном воздействии нагрузок // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 1. С. 150–163.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-1-150-163

D.N. SMERDOV,
Siberian State Transport University

TEMPERATURE AND STRESS RELAXATION OF POLYMER COMPOSITES OPERATING IN BENDING CONCRETE ELEMENTS UNDER CONSTANT LOAD

Purpose: The temperature and stress effects on the operation of concrete elements made of polymer composites and evaluation of their temperature and stress relaxation. **Design/methodology/approach:** Modern approach to bridge structure design and mathematical statistics of the experimental data processing. **Research findings:** Temperature relaxation and stress-strain curves are suggested for carbon fiber polymer composites in reinforced concrete elements under constant load. **Practical implications:** Initial data for adjusting the formulas of the ultimate limited stress for calculating reinforced concrete structures strengthening with polymer composite materials. **Originality/value:** The temperature drop effect must be considered in the operation of polymer composites in bending concrete elements.

Keywords: carbon fiber; polymer composite; carbon ribbon; bonded fabric; composite carbon fiber lamellas; two-component epoxy binder; load bearing capacity; Young's modulus; reinforcement; bending; concrete element; strength; stiffness; stress-strain state; relaxation; strength limit; beam.

For citation: Smerdov D.N. Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya temperaturnoi relaksatsii i napryazheniya polimernykh kompozitsionnykh materialov, rabotayushchikh v sostave izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, pri dlitel'nom vozdeistvii nagruzok [Temperature and stress relaxation of polymer composites operating in bending concrete elements under constant load]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 1. Pp. 150–163.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-1-150-163

Полимерные композиционные материалы – это пластики, армированные высокопрочными волокнами, которые при определенной температуре эксплуатации могут изменять свои свойства. Величина коэффициента температурного расширения α , $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, для углеродных волокон отрицательная и варьируется в пределах $-0,6 \dots -1,45 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. При этом коэффициент температурного расширения α , $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, для арматурной стали арматуры класса А400 и бетона положительный и лежит в интервале от $5,5$ до $14,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Соответственно при нагреве углеродные волокна укорачиваются, а прямолинейные элементы из стали и бетона удлиняются. Разница между фактической температурой эксплуатации и температурой, при которой осуществлялось внешнее армирование железобетонных конструкций мостов полимерными композиционными материалами, может вызывать в них релаксацию или напряжение при действии длительных постоянных нагрузок за счет противоположности знаков коэффициентов температурного расширения материалов. Требуется исследовать влияние температурно-силовых факторов на работу железобетонных конструкций мостов с элементами из полимерных композиционных материалов с оценкой их релаксации и напряжения. В целом проблемам применения полимерных композиционных

материалов в железобетонных конструкциях зданий и сооружений различного назначения, а также мостов посвящены труды [1–18].

Исследования влияния температурно-силовых факторов на работу железобетонных конструкций с элементами из полимерных композиционных материалов были начаты в 2016 г. при финансировании ООО «Нанотехнологический центр композитов»¹ в «Испытательном центре технических средств железнодорожного транспорта» (ИЦ ТСЖТ) Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС). Опытными образцами служили изгибаемые железобетонные элементы с внешним армированием композиционными материалами CarbonWrap®. Для внешнего армирования образцов использовались углеродные ленты, нетканые полотна из плоских волокон, композитные углепластиковые ламели, сетки с пропиткой стирол-бутадиеновой композицией, углеродные анкерные жгуты, а также двухкомпонентные эпоксидные связующие, применяемые при температуре от –60 до +110 °С.

Для испытаний подготавливались две группы образцов: контрольные и основные. Контрольные образцы подвергались испытаниям на прочность в лабораторных условиях до наступления предельного состояния. Основные образцы подвергались воздействию температурно-силовых факторов при заданном постоянном контролируемом усилии. Все усиленные образцы делились на серии в зависимости от их конструкции и примененных в них материалов усиления. Железобетонные конструкции, усиленные композиционными (композитными) материалами, с разбивкой на серии представлены в табл. 1. Железобетонные конструкции усиливались на действие изгибающего момента по нижней грани на всю ширину ребра, как показано на рис. 1: серии «ЖБ-Л» – в два слоя лентами CarbonWrap® Tape 230/300, серии «ЖБ-ПП» – неткаными плоскими полотнами Spread Tape 500/250), серии «ЖБ-С» – углеродными сетками CarbonWrap® Grid 600/1000 с устройством углеродных анкерных жгутов CarbonWrap® Anchor D12 и серии «ЖБ-ЛАМ» – углепластиковыми ламелями CarbonWrap® Lamel HS 14/50 с устройством U-образных обойм в приопорных зонах из лент CarbonWrap® Tape 230/300.

Испытания контрольных и основных образцов производились на специально изготовленном стенде, установленном непосредственно в климатическую камеру. При заданном постоянном контролируемом усилии усиленных полимерными композиционными материалами элементов конструктивные элементы подвергались замораживанию до –60, –40, –20, 0 °С и нагреву до +20, +40, +60, +90, +110 °С в климатической камере Techno 7010Wi объемом 10 м³. При заданных условиях внешних воздействующих механических и температурных факторов конструктивные элементы выдерживались в течение 2–3 ч до достижения в образцах заданной температуры и стабилизации относительных деформаций в элементах внешнего армирования и вертикальных прогибов. На протяжении каждого этапа температурно-силового воздействия фиксировались непрерывно во времени общие деформации образцов,

¹ ООО «НЦК» является совместным предприятием Фонда инфраструктурных и образовательных программ (ГК РОСНАНО) и компании DowAksa Advanced Composites Holdings BV (Dow Chemical).

относительные деформации элементов внешнего армирования полимерными композиционными материалами и уровень нагружения при помощи индуктивного датчика перемещения WA-200 (ДП), тензометрических датчиков деформаций (ТД) и мессдозы в составе измерительного комплекса Spider8. В процессе испытаний с целью оценки набора и стабилизации температуры образцов контролировалось распределение температуры по поверхности конструктивных элементов с помощью тепловизора TESTO 881 и измерителя-регулятора температуры 2ТРМ0 с термопарой сопротивления ДТС-224. В качестве примера на рис. 2 показан вид основных образцов при испытаниях на воздействие температурно-силовых факторов.

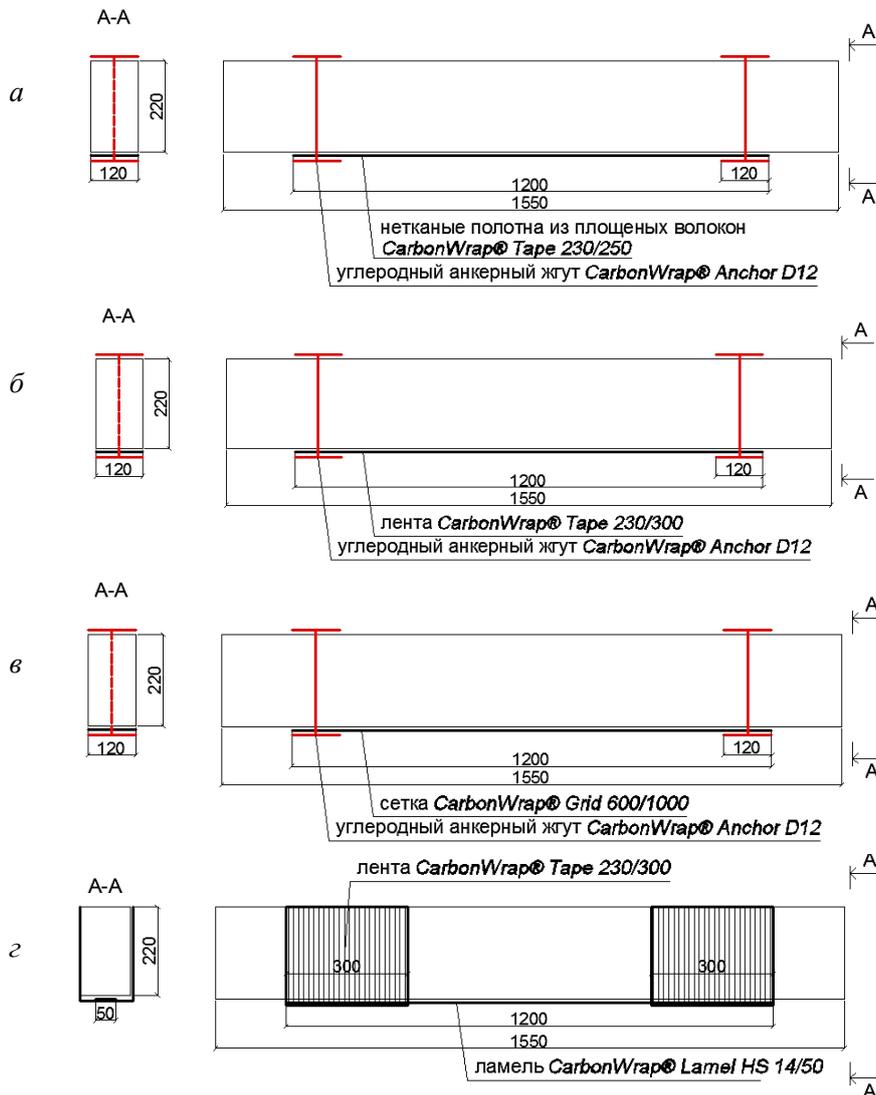


Рис. 1. Вид усиленных железобетонных образцов:
 а – ЖБ-ПП; б – ЖБ-Л; в – ЖБ-С; г – ЖБ-ЛИАМ



Рис. 2. Испытания основных образцов на одновременное воздействие температуры и внешней длительной статической нагрузки на примере серии «ЖБ-ПП» в интервале температур:

a – от -60 до $+40$ °С; *b* – от $+60$ до $+110$ °С

Для анализа процесса изменения напряженно-деформированного состояния опытных образцов с элементами внешнего армирования при воздействии на них температурно-силовых факторов в табл. 1 и 2 представлены сведения о фактических величинах уровня нагружения серий опытных образцов $P_{\text{факт}}$ и относительных деформаций элементов усиления ε_f при действии соответствующих нагрузок и температур. А для оценки релаксации и напряжения полимерных композиционных материалов в табл. 1 и 2 показаны величины остаточных деформаций $\varepsilon_{f\text{ост}}$ при снятии статических нагрузок с опытных образцов.

Таблица 1

Результаты испытаний опытных образцов на действие температурно-силовых факторов в диапазоне температур от -60 до $+40$ °С

№ п/п	Серия	Температура, °С	Прогиб, мм	$P_{80\%}$, кН	$P_{\text{факт}}$, кН	ε_f , $1 \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{f\text{ост}}$, $1 \cdot 10^{-6}$
1	ЖБ-Л	20	5,92	118	117	3831,81	1151,52
		40				4162,11	
		0				3686,43	
		-20				3300,22	
		-40				3235,69	
		-60				3013,49	
2	ЖБ-ПП	20	7,90	108	104	7415,72	Наступило предельное состояние
		40				7831,26	
		0				7636,26	
		-20				7023,36	
		-40				6824,09	
		-60				6671,52	

Окончание табл. 1

№ п/п	Серия	Температура, °С	Прогиб, мм	$P_{80\%}$, кН	$P_{факт}$, кН	ε_f , $1 \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{fост}$, $1 \cdot 10^{-6}$
3	ЖБ-С	20	7,82	67	65	5953,84	1101,93
		40				6223,66	
		0				6088,84	
		-20				5951,12	
		-40				5805,01	
		-60				5762,28	
4	ЖБ-ЛАМ	20	9,13	194	195	5346,00	1066,15
		40				5321,25	
		60				5600,05	
		0				5332,65	
		-20				5137,15	
		-40				5013,15	
		-60				4836,15	

Таблица 2

Результаты испытаний опытных образцов на действие температурно-силовых факторов в диапазоне температур от +20 до +110 °С

№ п/п	Серия	Температура °С	Прогиб, мм	$P_{80\%}$, Н	$P_{факт}$, Н	ε_f , $1 \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{fост}$, $1 \cdot 10^{-6}$
1	ЖБ-Л-НТ+	20	5,66	118494	117558	3431,75	1068,86
		60				3430,52	
		90				3607,73	
		110				3706,76	
2	ЖБ-ПП-НТ+	20	6,97	108006	108406	6933,21	690,80
		60				7273,21	
		90				7479,46	
		110				7531,29	
3	ЖБ-С-НТ+	20	6,73	66881	66641	5520,48	405,52
		60				5599,23	
		90				5734,23	
		110				6029,23	

По результатам испытаний основных образцов по показаниям тензометрических датчиков деформаций были определены нормальные напряжения в полимерных композиционных материалах и для изучения закономерности релаксации и напряжений в усиленных конструкциях построены графики изменения во времени нормальных напряжений в элементах усиления, которые представлены на рис. 3, 4.

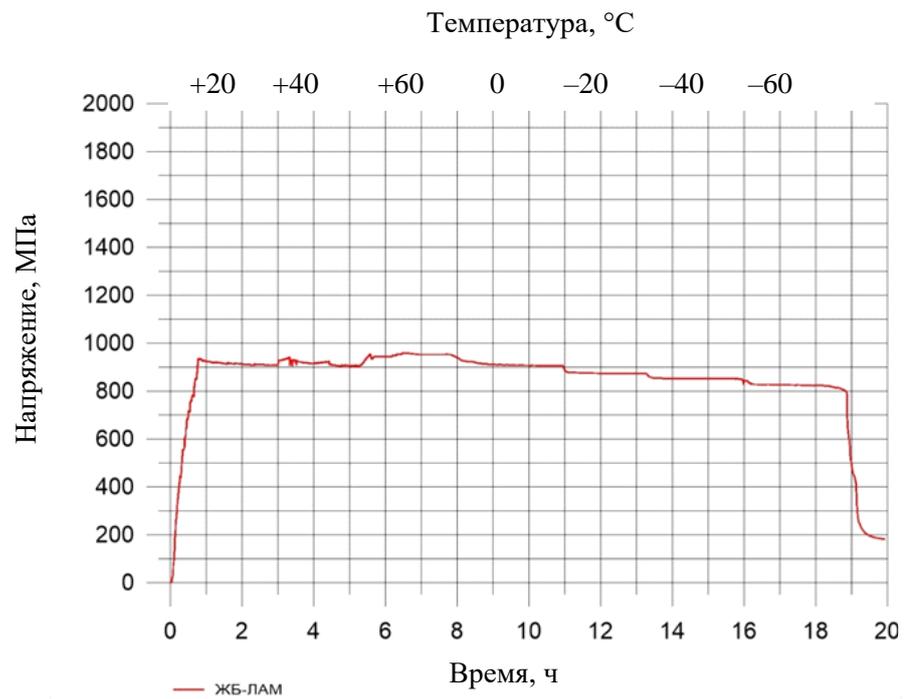
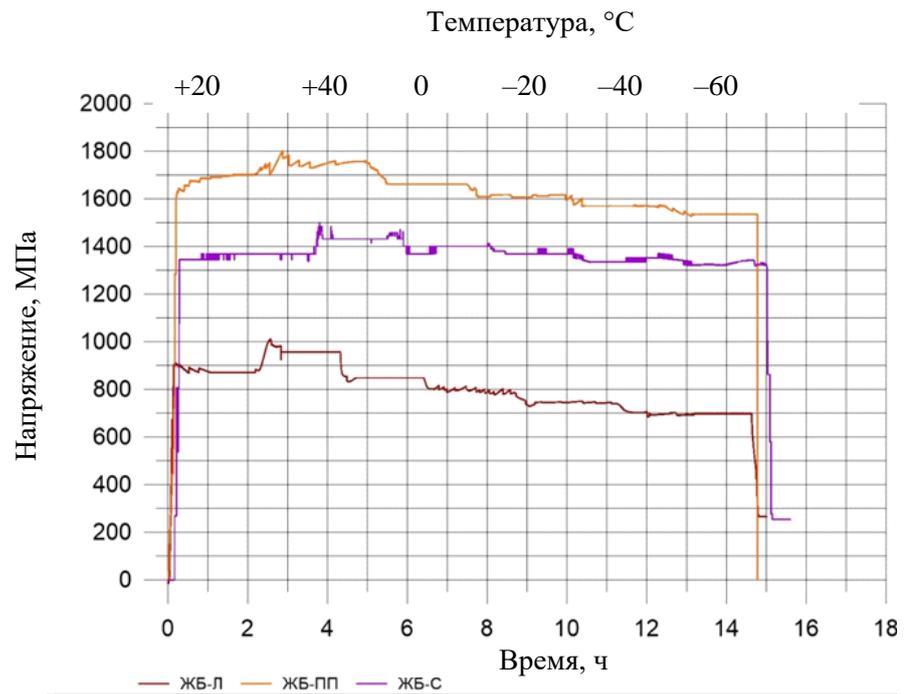


Рис. 3. Кривые релаксации и напряжения полимерных композиционных материалов для серий образцов

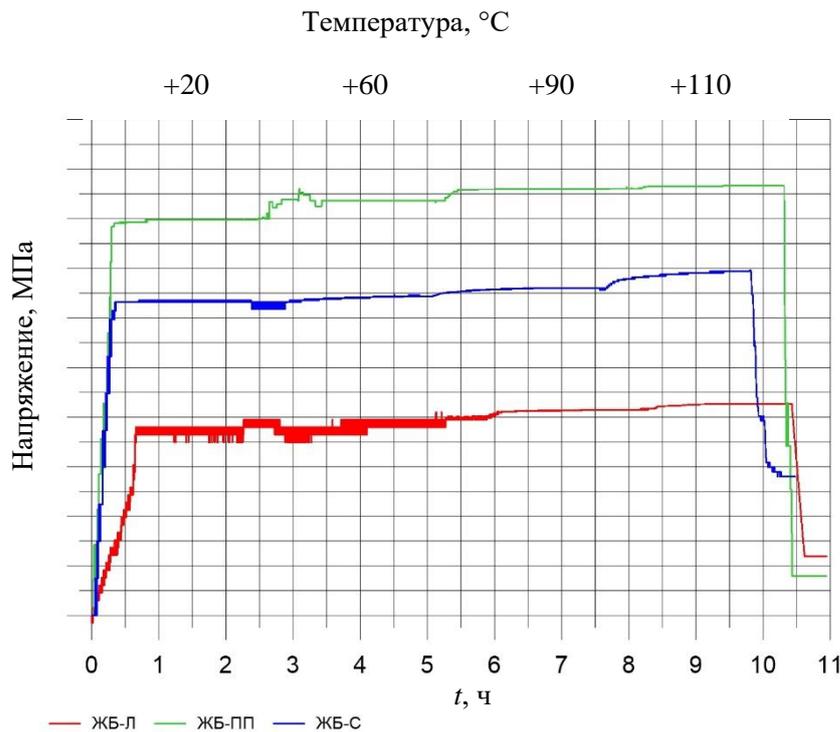


Рис. 4. Кривые напряжения полимерных композиционных материалов для серий образцов со связующими с повышенной температурой стеклования

В табл. 1 и 2: $P_{80\%}$ – требуемый уровень контролируемого нагружения основных образцов при испытании на температурно-силовые факторы; $P_{факт}$ – фактический уровень контролируемого длительного нагружения основных образцов при испытании на температурно-силовые факторы; ε_f – величины относительных деформаций в композиционных материалах при фактическом уровне нагружения и температуре образцов; $\varepsilon_{f\text{ост}}$ – величины остаточных относительных деформаций в композиционных материалах после воздействия температурно-силовых факторов в принятом диапазоне воздействий при полной их разгрузке.

В ходе испытаний конструктивных элементов, усиленных полимерными композиционными материалами, на температурно-силовые факторы было установлено, что у одного образца серии «ЖБ-ПП» при охлаждении его до температуры -60 °C наступило предельное состояние в результате разрыва полотна из плетеных углеродных волокон в середине пролета балки, как показано на рис. 5. Образцы других серий назначенный режим температурно-силового воздействия выдерживали, и, соответственно, предельного состояния в них не наступало. Однако у некоторых конструктивных элементов после их испытания на температурно-силовые воздействия были обнаружены повреждения в элементах усиления в виде отслоения лент CarbonWrap® Tape и ламелей CarbonWrap® Lamel HS – образцы серий «ЖБ-Л» и «ЖБ-ЛАМ».

Обнаруженные повреждения образцов с элементами усиления проиллюстрированы фотографиями на рис. 6.



Рис. 5. Вид основных образцов серии «ЖБ-ПП», потерявших несущую способность в процессе испытания на воздействие температурно-силовых факторов

a



б



Рис. 6. Вид образцов с повреждениями элементов усиления после воздействия на них температурно-силовых факторов:
a – серия «ЖБ-Л»; *б* – серия «ЖБ-ЛАМ»

В табл. 3 и 4 представлены результаты определения экспериментальных данных величин фактических нормальных напряжений σ_f и σ_{ft} в элементах внешнего армирования от действия нагрузок и температур, рассчитанных по результатам измерения относительных деформаций в композиционных материалах с учетом соответствующих модулей упругости. В табл. 3 и 4 σ_f – вели-

чина нормальных напряжений в композиционных материалах при фактическом уровне нагружения и температуре образцов; σ_{ft} – величина нормальных напряжений в композиционных материалах от действия температуры, определяемая по формуле

$$\sigma_{ft} = \sigma_f - \sigma_{f,+20\text{ }^{\circ}\text{C}},$$

где $\sigma_{f,+20\text{ }^{\circ}\text{C}}$ – величина нормальных напряжений в композиционных материалах при фактическом уровне нагружения и температуре образцов +20 °С.

Таблица 3

Величина нормальных напряжений в элементах СВА при действии температурно-силовых факторов в диапазоне температур от –60 до +40 °С

№ п/п	Серия	Температура, °С	Прогиб, мм	$P_{80\%}$, кН	$P_{\text{факт}}$, кН	Модуль упругости, ГПа	σ_f , МПа	σ_{ft} , МПа
1	ЖБ-Л	20	5,92	118	117	230	881,32	+75,97
		40					957,29	
		0					-188,21	
		-20						759,05
		-40						744,21
		-60						693,10
2	ЖБ-ПП	20	7,9	108	104	230	1705,62	+95,57
		40					1801,19	
		0					-171,17	
		-20						1615,37
		-40						1569,54
		-60						1534,45
3	ЖБ-С	20	7,82	67	65	230	1369,38	+62,06
		40					1431,44	
		0					-44,06	
		-20						1368,76
		-40						1335,15
		-60						1325,32
4	ЖБ-ЛАМ	20	9,13	194	195	170	908,82	+43,19
		40					904,61	
		60					952,01	
		0					-86,67	
		-20						873,32
		-40						852,24
		-60						822,15

Таблица 4

**Величина нормальных напряжений в элементах СВА
при действии температурно-силовых факторов в диапазоне температур
от +20 до +110 °С**

№ п/п	Серия	Температура, °С	Прогиб, мм	$R_{80\%}$, Н	$R_{факт}$, Н	Модуль упругости, ГПа	σ_f , МПа	σ_{fi} , МПа
1	ЖБ-Л-НТ+	20	5,66	118494	117558	230	789,30	+63,25
		60					789,02	
		90					829,78	
		110					852,55	
2	ЖБ-ПП-НТ+	20	6,97	108006	108406	230	1594,64	+137,56
		60					1672,84	
		90					1720,28	
		110					1732,20	
3	ЖБ-С-НТ+	20	6,73	66881	66641	230	1269,71	+117,01
		60					1287,82	
		90					1318,87	
		110					1386,72	

В результате проведенных экспериментальных исследований подтверждено влияние температурно-силовых факторов на изменение напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций, усиленных композиционными материалами. За счет разницы коэффициентов температурного расширения углеродных волокон и материалов, из которых изготавливаются усиливаемые конструкции – бетон и металлическая арматура, возникают дополнительные относительные деформации при перепаде температур, которые при определенном уровне загруженности усиленных конструкций могут способствовать наступлению в них предельного состояния или появлению в элементах усиления дефектов и повреждений. Охлаждение усиленных конструкций относительно температуры, при которой осуществляется их усиление, наоборот, снимает часть нормальных напряжений в композиционном материале за счет противоположного знака коэффициента температурного расширения относительно бетона и металлической арматуры. Влияние релаксации и напряжений полимерных композиционных материалов, работающих в составе железобетонных элементов, требуется учитывать при определении несущей способности указанных элементов соответствующими расчетными формулами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белуцкий И.Ю., Сим А.Д. Специфика проектирования, изготовления конструкций, напряженно-армированных низко модульной композитной арматурой // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 54. С. 38–45.

2. *Смердов Д.Н., Яцук М.О.* Экспериментальные исследования несущей способности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных преднапряженными полимерными композиционными материалами // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. № 3 (55). С. 72–83.
3. *Селиванова Е.О., Смердов Д.Н.* Экспериментальные исследования ползучести в композиционных материалах, усиливающих изгибаемые железобетонные элементы // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. № 2 (33). С. 95–99.
4. *Смердов Д.Н., Клементьев А.О.* Расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, с использованием нелинейной деформационной модели материалов // Науковедение : интернет-журнал. 2017. Т. 9. № 1. С. 34.
5. *Плевков В.С., Балдин И.В., Невский А.В.* К определению расчетных напряжений в стальной и углекомпозитной арматуре нормальных сечений железобетонных элементов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (60). С. 96–113.
6. *Бокарев С.А., Смердов Д.Н.* Полимерные композиционные материалы в транспортном строительстве // Транспорт Урала. 2016. № 1 (48). С. 24–30.
7. *Неволин Д.Г., Смердов М.Н., Смердов Д.Н.* Экспериментальные исследования несущей способности железобетонных конструкций горнотехнических зданий и сооружений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 8. С. 138–142.
8. *Неволин Д.Г., Клементьев А.О., Смердов Д.Н., Смердов М.Н.* Методика расчета изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерными композиционными материалами // Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С. 98–101.
9. *Клементьев А.О., Смердов Д.Н., Смердов М.Н.* Экспериментальные исследования прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, армированных в сжатой и растянутой зоне неметаллической композиционной арматурой // Транспорт Урала. 2014. № 4 (43). С. 50–55.
10. *Бокарев С.А., Костенко А.Н., Смердов Д.Н., Неровных А.А.* Экспериментальные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами // Науковедение : интернет-журнал. 2013. № 3 (16). С. 168.
11. *Бокарев С.А., Власов Г.М., Неровных А.А., Смердов Д.Н.* Коэффициенты надежности для композиционных материалов, применяемых для усиления железобетонных элементов мостовых конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2 (35). С. 222–229.
12. *Бокарев С.А., Смердов Д.Н., Неровных А.А.* Методика расчета по прочности сечений эксплуатируемых железобетонных пролетных строений, усиленных композитными материалами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 10 (622). С. 63–74.
13. *Бокарев С.А., Смердов Д.Н.* Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 2 (614). С. 112–124.
14. *Бокарев С.А., Смердов Д.Н.* Нелинейный анализ железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных композитными материалами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 2 (27). С. 113–125.
15. *Бокарев С.А., Смердов Д.Н.* Исследование влияния многократного замораживания и оттаивания на изменение несущей способности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Транспорт Урала. 2010. № 3 (26). С. 98–104.
16. *Бокарев С.А., Устинов В.П., Яшинов А.Н., Смердов Д.Н.* Усиление пролетных строений с использованием композитных материалов // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 6. С. 30–31.
17. *Klementev A.O., Smerdov D.N.* Indicators of Reliability of Artificial Structures with Elements Made of Polymer Composite Materials at all Stages of their Life Cycle on the Basis of Risk Assessment // Transportation Research Procedia. 2017. V. 20. P. 624–629.

18. Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Reinforced Concrete Elements Strengthened by Pre-stressed Fibre-reinforced Polymer (FRP) // *Transportation Research Procedia*. 2021. V. 54. P. 157–165.

REFERENCES

1. Belutskii I.Yu., Sim A.D. Spetsifika proektirovaniya, izgotovleniya konstruktssii, napryazhenno-armirovannykh nizkomodul'noi kompozitnoi armaturoi [Design and fabrication of structures reinforced by low-modulus composite]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2020. No. 54. Pp. 38–45. (rus)
2. Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Eksperimental'nye issledovaniya nesushchei sposobnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh prednapryazhennymi polimernymi kompozitsionnymi materialami [Load-bearing capacity of bending concrete elements reinforced with pre-stressed polymer composites]. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2019. No. 3 (55). Pp. 72–83. (rus)
3. Selivanova E.O., Smerdov D.N. Eksperimental'nye issledovaniya polzuchesti v kompozitsionnykh materialakh, usilivayushchikh izgibaemye zhelezobetonnye elementy [Creep in composite materials reinforcing bending concrete elements]. *Akademicheskii vestnik UralNIIproekt RAASN*. 2017. No. 2 (33). Pp. 95–99. (rus)
4. Smerdov D.N., Klement'ev A.O. Raschet po prochnosti sechenii, normal'nykh k prodol'noi osi izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov s kombinirovannym armirovaniem metallicheskoj i polimernoi kompozitsionnoi armaturoi, s ispol'zovaniem nelineinogo deformatsionnoi modeli materialov [Strength analysis of cross-sections normal to longitudinal axis of bending concrete elements with combined metal and polymer composite reinforcement using non-linear deformation model]. *Naukovedenie*. 2017. V. 9. No. 1. P. 34. (rus)
5. Plevkov V.S., Baldin I.V., Nevskii A.V. K opredeleniyu raschetnykh napryazhenii v stal'noi i uglekompozitnoi armature normal'nykh sechenii zhelezobetonnykh elementov [Estimated stresses in steel and carbon reinforced composite rebar of normal sections in concrete structures]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 1 (60). Pp. 96–113. (rus)
6. Bokarev S.A., Smerdov D.N. Polimernye kompozitsionnye materialy v transportnom stroitel'stve [Polymer composites in transport construction]. *Transport Urala*. 2016. No. 1 (48). Pp. 24–30. (rus)
7. Nevolin D.G., Smerdov M.N., Smerdov D.N. Eksperimental'nye issledovaniya nesushchei sposobnosti zhelezobetonnykh konstruktssii gornotekhnicheskikh zdaniy i sooruzhenii [Bearing capacity of reinforced concrete structures in mining buildings]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2015. No. 8. Pp. 138–142. (rus)
8. Nevolin D.G., Klement'ev A.O., Smerdov D.N., Smerdov M.N. Metodika rascheta izgibaemykh betonnykh elementov, armirovannykh polimernymi kompozitsionnymi materialami [Calculation methodology for bending concrete elements reinforced with polymer composites]. *Transport Urala*. 2015. No. 3 (46). Pp. 98–101. (rus)
9. Klement'ev A.O., Smerdov D.N., Smerdov M.N. Eksperimental'nye issledovaniya prochnosti i deformativnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, armirovannykh v szhatoi i rastyanutoi zone nemetallicheskoj kompozitsionnoi armaturoi [Strength and deformability of bending concrete elements reinforced in compressed and stretched zones by non-metallic composite]. *Transport Urala*. 2014. No. 4 (43). Pp. 50–55. (rus)
10. Bokarev S.A., Kostenko A.N., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Eksperimental'nye issledovaniya pri ponizhennykh i povyshennykh temperaturakh zhelezobetonnykh obraztsov, usilennykh polimernymi kompozitsionnymi materialami [Experimental investigation at low and elevated temperatures of concrete elements reinforced with polymer composites]. *Naukovedenie*. 2013. No. 3 (16). 168 p. (rus)
11. Bokarev S.A., Vlasov G.M., Nerovnykh A.A., Smerdov D.N. Koeffitsienty nadezhnosti dlya kompozitsionnykh materialov, primenyaemykh dlya usileniya zhelezobetonnykh elementov mostovykh konstruktssii [Safety factor of composite materials reinforcing concrete elements of bridges]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 2 (35). Pp. 222–229. (rus)

12. Bokarev S.A., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Metodika rascheta po prochnosti sechenii ekspluatiruemykh zhelezobetonnykh proletnykh stroenii, usilennykh kompozitnymi materialami [Strength analysis of operating concrete superstructures reinforced with composite materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2010. No. 10 (622). Pp. 63–74. (rus)
13. Bokarev S.A., Smerdov D.N. Eksperimental'nye issledovaniya izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh kompozitnymi materialami [Experimental studies of composite bending concrete elements]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2010. No. 2 (614). Pp. 112–124. (rus)
14. Bokarev S.A., Smerdov D.N. Nelineyniy analiz zhelezobetonnykh izgibaemykh konstruksii, usilennykh kompozitnymi materialami [Non-linear analysis of bending concrete structures reinforced with composite materials]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2010. No. 2 (27). Pp. 113–125. (rus)
15. Bokarev S.A., Smerdov D.N. Issledovanie vliyaniya mnogokratnogo zamorazhivaniya i ottaivaniya na izmenenie nesushchei sposobnosti i deformativnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh kompozitnymi materialami [Effect of repeated freezing and thawing on bearing capacity and deformability of bending concrete elements reinforced with composite materials]. *Transport Urala*. 2010. No. 3 (26). Pp. 98–104. (rus)
16. Bokarev S.A., Ustinov V.P., Yashnov A.N., Smerdov D.N. Usilenie proletnykh stroenii s ispol'zovaniem kompozitnykh materialov [Span reinforcement by composite materials]. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2008. No. 6. Pp. 30–31. (rus)
17. Klementev A.O., Smerdov D.N. Indicators of reliability of artificial structures with elements made of polymer composite materials at all stages of their life cycle on the basis of risk assessment. *Transportation Research Procedia*. 2017. V. 20. Pp. 624–629.
18. Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Reinforced concrete elements strengthened by pre-stressed fibre-reinforced polymer. *Transportation Research Procedia*. 2021. V. 54. Pp. 157–165.

Сведения об авторе

Смердов Дмитрий Николаевич, канд. техн. наук, ст. научный сотрудник, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук 191, DNSmerdov@mail.ru

Authors Details

Dmitriy N. Smerdov, PhD, Senior Research Assistant, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, DNSmerdov@mail.ru