

УДК 624.142

**ВЛИЯНИЕ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР
НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
СТАЛЕБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ БАЛОК**

**THE EFFECT OF ALTERNATING TEMPERATURES
ON THE STRESS STATE
OF BENDING REINFORCED STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAMS**

А.Д. ИСТОМИН
A.D. ISTOMIN

**(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет)
(Moscow State (National Research) University of Civil Engineering)
E-mail: nauka.07@mail.ru**

Одним из путей повышения эффективности и качества железобетонных конструкций является разработка и внедрение новых строительных

конструкций, использование которых обеспечивает снижение материалоемкости и стоимости. К таким эффективным конструкциям относятся сталебетонные конструкции. С целью выявления особенностей работы изгибаемых сталебетонных элементов с внешним армированием при знакопеременных температурах проведены экспериментальные исследования, результаты которых по прочности и деформативности представлены в данной статье.

One of the ways to improve the efficiency and quality of concrete structures is the development and introduction of new building structures, the use of which provides the reduction of material and cost. To such effective structures are steel-concrete composite construction. With the aim of identifying features of the operation of bendable steel-concrete composite elements with external reinforcement under alternating temperatures experimental studies, the results of which are strength and deformability is presented in this article.

Ключевые слова: сталебетон, балка, циклы, замораживание-оттаивание, влажность, деформации, прогиб, прочность, нагрузка.

Keywords: steel-concrete, beam, cycles, freezing-thawing, humidity, deformations, deflection, strength, load.

Одним из важнейших направлений ускорения развития промышленности строительных конструкций является создание и применение эффективных конструкций высокой надежности, малой металлоемкости и трудоемкости [1...7]. Всем этим требованиям отвечают сталебетонные конструкции с внешним армированием, применение которых в строительстве постоянно растет как в России, так и за рубежом [8...10].

Сталебетонные конструкции должны удовлетворять требованиям по безопасности, по эксплуатационной пригодности и по долговечности. Современные нормы России устанавливают требования к проектированию сталежелезобетонных конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в диапазоне изменения температур от 50 до -60°C (СП 266.1325800.2016 Конструкции сталежелезобетонные). При этом остается открытым вопрос об учете влияния воздействия знакопеременных температур на работу сталебетонных конструкций [11], [12]. В связи с этим проведены экспериментальные исследования по влиянию циклических замораживаний и оттаиваний (ЦЗО) на работу сталебетонных элементов с внешней стальной оболочкой. При этом исследовалось влияние ЦЗО на изме-

нение прочности сцепления между металлической оболочкой и бетоном при сжатии; влияние ЦЗО на работу изгибаемых сталебетонных элементов с внешней стальной оболочкой.

Для определения сцепления между бетоном и металлом в качестве опытных образцов были приняты сталебетонные призматические элементы, конструктивное решение которых представлено на рис. 1 (схема испытания сталебетонного элемента для определения сцепления).

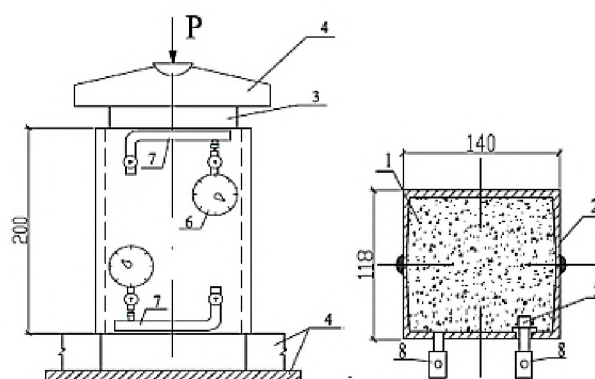


Рис. 1

Замораживание до -50°C и оттаивания до 15°C сталебетонных призм производили в возрасте 28 суток. После соответствующей

щего числа циклов замораживания - оттаивания определяли прочность сцепления бетона со стальной оболочкой. Смещение бетонного ядра (1) относительно металлической оболочки (2) определяли индикаторами часового типа (6, 7). Результаты исследований по изменению прочности сцепления между стальной оболочкой и бетоном в условиях циклических замораживаний и оттаиваний при числе циклов замораживания-оттаивания, равном марке бетона по морозостойкости, представлены на рис. 2 (прочность сцепления бетона со стальной оболочкой).



Рис. 2

Из рис. 2 видно, что в сталебетонных образцах, бетон которых имеет меньшую влажность, наблюдается постепенное снижение прочности сцепления бетона с металлом на всем интервале испытаний. Прочность сцепления металла с бетоном при влажности 4,5% уменьшается на 13%, а при влажности бетона 7,0% – увеличивается на 4%. Это объясняется тем, что в менее влажном бетоне приток влаги к границе раздела между бетоном и металлом недостаточен для создания новых и восстановления разрушенных в ходе ЦЗО адгезионных связей. По результатам испытаний ста-

лебетонных призм получено выражение для определения прочности сцепления τ_F при числе циклов замораживания и оттаивания, соответствующем марке бетона по морозостойкости:

$$\tau_F = 0,45e^{0,12 \cdot W} \tau_0, \quad (1)$$

где W – относительная весовая влажность бетона, %; τ_0 – прочность сцепления бетона с металлом до ЦЗО в МПа.

В качестве изгибаемых опытных образцов были приняты сталебетонные балки размером 120x200x2200 мм. Опытный образец в виде сварной металлической балки коробчатого сечения, заполненного бетоном (1), представлен на рис. 3 (сталебетонная балка и схема ее нагружения).

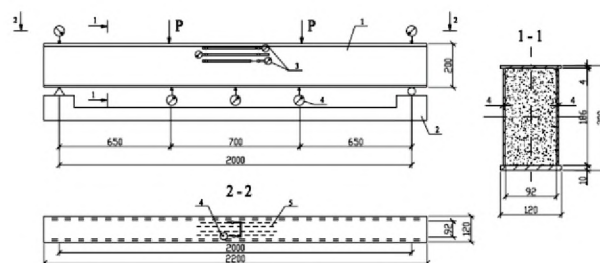


Рис. 3

В возрасте 28 суток балки подвергали циклическому замораживанию до -50°C и оттаиванию до 15°C . После 15, 30 и 45 циклов замораживания и оттаивания сталебетонные балки испытывали в нормальных условиях до разрушения. Перед испытанием балки оборудовали тензорезисторами и индикаторами часового типа (3,4,5). Деформативно-прочностные характеристики бетона представлены в табл. 1.

Таблица 1

Количество циклов С	R_b , МПа	$\frac{R_{b,c}}{R_{b,0}}$	$E_b \cdot 10^{-4}$, МПа	$\frac{E_{b,c}}{E_{b,0}}$	$\epsilon_{b0} \cdot 10^5$	$\frac{\epsilon_{b0,c}}{\epsilon_{b0,0}}$	W, %
0	17	1,00	3,66	1,00	200	1,0	6,94
45	7,8	0,46	0,80	0,22	540	2,7	6,92

Из представленных результатов видно, что после 45 циклов замораживания-оттаивания призмная прочность и модуль упругос-

ти бетона снижаются соответственно на 54 и 78%. При этом деформация сжатия в вершине диаграммы увеличилась в 2,7 раза.

Деформативно-прочностные характеристики стали металлической оболочки, полученные в результате испытаний отобранных образцов, оказались следующими: предел текучести $R_y = 305$ МПа, временное сопротивление $R_{\text{т}} = 435$ МПа, модуль упругости $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа.

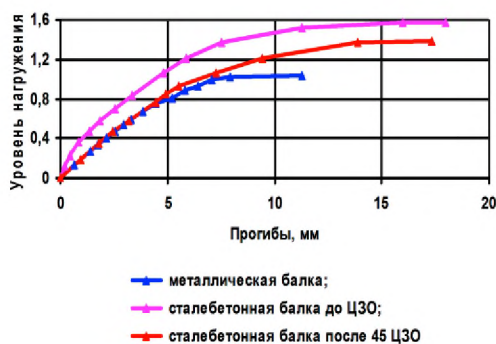


Рис. 4

Результаты испытаний балок в виде графиков "уровень поперечного нагружения (P/P_{ult}) – прогибы в середине пролета" представлены на рис.4. Из рисунка видно, что сталебетонные балки, испытанные в нормальных условиях до ЦЗО, имеют меньшие прогибы по сравнению с металлическими балками. Это говорит о том, что бетонное ядро в сталебетонных балках активно участвует в работе и воспринимает значительную часть усилий, вплоть до исчерпания несущей способности. В сталебетонных балках, испытанных после 45 циклов замораживания-оттаивания до уровня нагружения $P/P_{\text{ult}} = 0,7$, прогибы практически совпадают с прогибами металлических балок. Далее прогибы в металлических балках начинают расти быстрее, и при нагрузке 80 кН ($P/P_{\text{ult}} = 1,0$) наблюдается значительное увеличение прогибов без приращения нагрузки. Сопротивление сталебетонных балок при этом продолжает увеличиваться. Сопоставляя данные результаты с результатами испытаний бетона, можно сделать вывод, что повышенная деформативность бетона, приобретенная им вследствие ЦЗО, приводит к тому, что на первом этапе работы сталебетонных балок (до $P/P_{\text{ult}} = 0,7$) практически всю нагрузку

воспринимает металлическая оболочка. Далее, вследствие проявления пластических деформаций в наиболее напряженных волокнах сжатой металлической полки, происходит перераспределение усилий с металла на бетон. При этом чем больше пластические деформации в металле, тем интенсивнее участвует в работе сталебетонной балки бетон сжатой зоны.

Несущая способность сталебетонных балок до и после ЦЗО оказалась больше металлической балки соответственно в 1,52 и 1,37 раз. За разрушающую нагрузку принималась нагрузка, при которой наблюдался значительный рост прогибов при незначительном увеличении нагрузки. Таким образом, совместная работа бетона с металлом в условиях ЦЗО в диапазоне, ограниченном экспериментом, сохраняется на всем интервале нагружения, вплоть до разрушения.

Расчет несущей способности опытных сталебетонных балок проводили по формуле:

$$M_{\text{ult}} = 0,5R_b b x^2 + R_y [W_{\text{pl}} + (r - x)^2 2t_w], \quad (2)$$

где $W_{\text{pl}} = 2S_{0,5}$ – пластический момент сопротивления стальной оболочки в виде коробчатого сечения; b – ширина поперечного сечения бетонного ядра сжатой зоны; t_w – толщина стенки стальной оболочки; $S_{0,5}$ – статический момент половины сечения стальной оболочки относительно ее геометрической оси; r – расстояние от сжатой грани сечения до центра тяжести стальной оболочки.

При этом высоту сжатой зоны бетонного ядра определяли по формуле:

$$x = \frac{4R_y r t_w}{R_b b + 4R_y t_w}. \quad (3)$$

Сравнение опытных значений несущей способности сталебетонных балок и рассчитанных по формуле (2) показало, что расхождение лежит в пределах $\pm 5\%$, что подтверждает приемлемость приведенных формул для расчета прочности сталебетонных балок с внешней стальной оболочкой.

ВЫВОДЫ

1. При числе циклов замораживания-оттаивания, равном марке бетона по морозостойкости, прочность сцепления металла с бетоном при влажности 4,5% уменьшается на 13%, а при влажности бетона 7,0% увеличивается на 4%.

2. Несущая способность сталебетонных балок до и после 45 циклов замораживания-оттаивания оказалась больше металлической балки соответственно в 1,52 и 1,37 раз.

3. Несущая способность сталебетонных балок после 45 циклов замораживания-оттаивания снизилась на 10% по сравнению со сталебетонными балками, испытанными до ЦЗО.

4. Напряженно-деформированное состояние изгибаемых сталебетонных элементов необходимо оценивать с учетом изменения деформативно-прочностных свойств бетона в результате циклического замораживания-оттаивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А.П., Голосов В.Н. Состояние и перспективы развития конструкций с внешним армированием // Бетон и железобетон. – 2007, №9. С.28...29.
2. Айрумян Э.Л., Румянцева И.А. Армирование монолитной железобетонной плиты перекрытия стальным профилированным настилом // Промышленное и гражданское строительство. – 2007, №4. С.25...27.
3. Филатов В.Б., Жильцов Ю.В. Особенности работы и эффективное использование жесткой поперечной арматуры железобетонных балок // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012, том 14, №4(5). С.1325...1328.
4. Воронков Р.В. О внешнем листовом армировании // Промышленное и гражданское строительство. – 2006, №5. С.19...20.
5. Тамразян А.Г. К задачам мониторинга риска зданий и сооружений // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2013, № 3 (170). С. 19...21.
6. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Расчет внецентренно-сжатых железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку // Строительство: наука и образование. – 2013, № 4. С.2.
7. Тамразян А.Г. Рекомендации к разработке требований к живучести зданий и сооружений // Вестник МГСУ. – 2011. № 2-1. С. 77...83.
8. Алмазов В.О., Арутюнян С.Н. Проектирование сталежелезобетонных плит перекрытий по Ев-

рокоду 4 и Российским рекомендациям // Вестник МГСУ. – 2015, №8. С.51...65.

9. Мирсаяпов И.Т., Замалиев Ф.С., Замалиев Э.Ф. Учет податливости контакта слоев при расчете прочности и малоциклового выносливости сталежелезобетонных элементов // Известия КазГАСУ. – 2010, № 2 (14). С.126...131.

10. Cifuentes H., Medina F. Experimental study on shear bond behavior of composite slabs according to Eurocode 4 // Journal of Constructional Steel Research. – Vol. 82, 2013. P. 99...110.

11. Истомин А.Д., Кудрявцев А.В. Работа статически неопределимых железобетонных элементов в условиях отрицательных температур // Промышленное и гражданское строительство. – 2016, №7. С.51...55.

12. Истомин А.Д. Деформации ползучести бетона при сжатии в условиях малоциклового силового и температурного нагружения // Вестник МГСУ. – 2011, №2(1). С.142...144.

REFERENCES

1. Vasilev A.P., Golosov V.N. Sostoyanie i perspektivy razvitiya konstrukcij s vneshnim armirovaniem // Beton i zhelezobeton. – 2007, №9. S.28...29.
2. Ajrumyan E.L., Rumyanceva I.A. Armirovanie monolitnoj zhelezobetonnoj plity perekrytiya stalnym profilirovannym nastilom // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 2007, №4. S.25...27.
3. Filatov V.B., Zhilcov Yu.V. Osobennosti raboty i effektivnoe ispolzovanie zhestkoj poperechnoj armatury zhelezobetonnyh balok // Izv. Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2012, tom 14, №4(5). S.1325...1328.
4. Voronkov R.V. O vneshnem listovom armirovanii // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 2006, №5. S.19...20.
5. Tamrazyan A.G. K zadacham monitoringa riska zdaniy i sooruzhenij // Stroitelnye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka. – 2013, № 3 (170). S.19...21.
6. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Raschet vnecentrenno-szhatyh zhelezobetonnyh elementov na kratkovremennuyu dinamicheskuyu nagruzku // Stroitelstvo: nauka i obrazovanie. – 2013, № 4. S.2.
7. Tamrazyan A.G. Rekomendacii k razrabotke trebovanij k zhivuchesti zdaniy i sooruzhenij // Vestnik MGSU. – 2011. № 2-1. S. 77...83.
8. Almazov V.O., Arutyunyan S.N. Proektirovanie stalezhelezobetonnyh plit perekrytij po Evrokodu 4 i Rossijskim rekomendacijam // Vestnik MGSU. – 2015, №8. S.51...65.
9. Mirsayapov I.T., Zamaliev F.S., Zamaliev E.F. Uchet podatlivosti kontakta sloev pri raschete prochnosti i malociklovoj vynoslivosti stalezhelezobetonnyh elementov // Izvestiya KazGASU. – 2010, №2 (14). S.126...131.
10. Cifuentes H., Medina F. Experimental study on shear bond behavior of composite slabs according to Eu-

rocode 4 // Journal of Constructional Steel Research. – Vol. 82, 2013. P. 99...110.

11. Istomin A.D., Kudryavcev A.V. Rabota staticheski neopredelimyh zhelezobetonnyh elementov v usloviyah otricatelnyh temperatur // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 2016, №7. S.51...55.

12. Istomin A.D. Deformacii polzuchesti betona pri szhatii v usloviyah malociklovogo silovogo i temperaturnogo nagruzheniya // Vestnik MGSU. – 2011, №2(1). S.142...144.

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций НИМГСУ. Поступила 06.04.18.
