

УДК 624.072.221

*ТАМРАЗЯН АШОТ ГЕОРГИЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
советник РААСН,*

*tamrazian@mail.ru*

*ОРЛОВА МАРИНА АНАТОЛЬЕВНА, аспирант,*

*orlovamaria\_na@mail.ru*

*Московский государственный строительный университет,  
129337, г. Москва, Ярославское ш., 26*

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ТРЕЩИНАМИ**

Представлены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с различными типами нормальных и горизонтальных трещин. Приведены примеры диаграмм деформирования материалов и прогибов балок в зависимости от относительного изгибающего момента, а также формулы для расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов с трещинами. Дан анализ влияния нормальных и горизонтальных трещин на деформации материалов и прогибы железобетонных балок.

**Ключевые слова:** железобетонные балки; деформации; трещины; прогибы; напряженно-деформированное состояние.

*ASHOT G. TAMRAZYAN, DSc, Professor, RAACS Adviser,*

*tamrazian@mail.ru*

*MARINA AN. ORLOVA, Research Assistant,*

*orlovamaria\_na@mail.ru*

*Moscow State University of Civil Engineering,*

*26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia*

### **STRESS-STRAIN STATE OF CONCRETE BENDING ELEMENTS WITH CRACKS**

The paper presents research results on the stress-strain state of reinforced concrete beams with different types of normal and horizontal cracks. The diagrams of the material deformations and deflections are given depending on the relative bending moment. The paper presents formulas for strength design of bending reinforced concrete elements with cracks. The analysis of normal and horizontal cracks is given in relation to their effect on the material deformation and deflection.

**Keywords:** reinforced concrete beams; deformation; crack; deflection; stress-strain state.

В железобетонных конструкциях в процессе изготовления, транспортировки, монтажа и эксплуатации могут возникнуть различные дефекты и повреждения, вызванные влиянием нагрузок и неблагоприятных внешних факторов,

а также нарушением нормальных условий эксплуатации и технологии изготовления [1–3]. Дефекты влияют на эксплуатационные качества конструкций: моменты трещинообразования, ширину раскрытия и глубину трещин, несущую способность, прогибы, а также на характер разрушения [4]. С целью установления влияния нормальных трещин в растянутой зоне и локальных горизонтальных трещин в бетоне сжатой зоны на напряженно-деформированное состояние изгибаемых элементов статической нагрузкой до разрушения испытано 20 серий железобетонных балок, отличающихся параметрами и количеством трещин, процентом армирования сечения и прочностью бетона. Общий вид установки для испытания балок представлен на рис. 1. Одновременно с целью выявления влияния трещин и физико-механических свойств материалов на прочность и деформативность балок испытывались опытные образцы без дефектов, имеющие аналогичные размеры и характеристики материалов [5]. Схема испытаний и расположения измерительных приборов: тензодатчиков на арматуре и бетоне (Тs и Тb), прогибомеров (П) и индикаторов часового типа (И) – приведена на рис. 2.



Рис. 1. Установка для испытания балок

Средние деформации бетона определялись как среднеарифметические из показаний тензодатчиков, расположенных на одном уровне по высоте сечения. Из приведенных графиков деформаций материалов и прогибов (рис. 3–5) видно, что соблюдается прямолинейная зависимость между деформациями и изгибающими моментами на различных этапах нагружения.

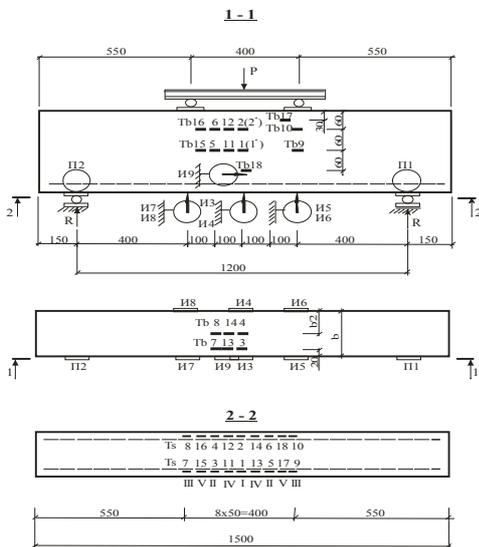


Рис. 2. Схема испытаний и расположения измерительных приборов

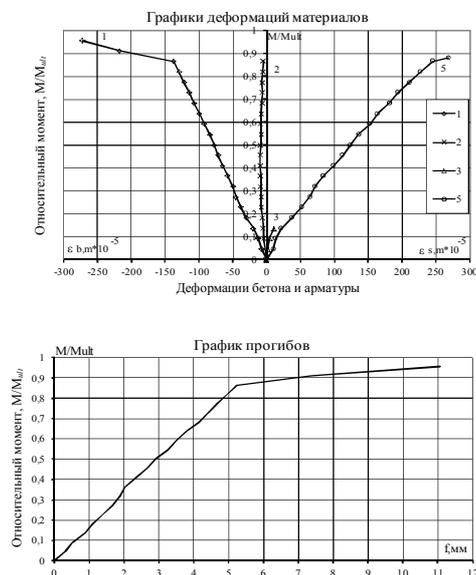


Рис. 3. Графики деформирования балки Б 4-1-1 с нормальными трещинами

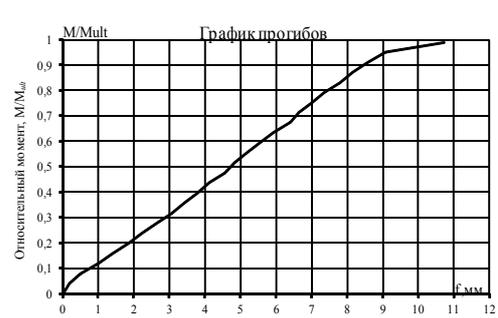
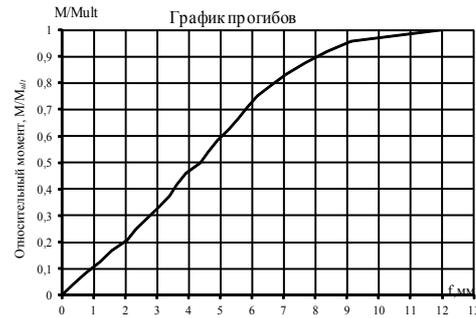
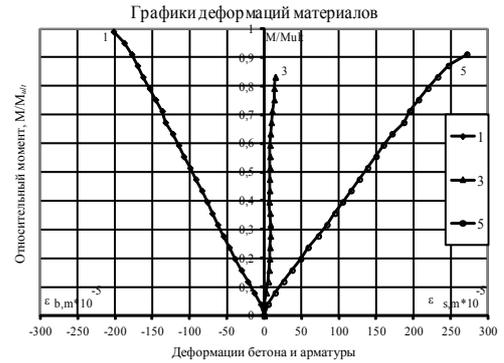


Рис. 4. Графики деформирования балки Б 5-1-1 с горизонтальными трещинами

Рис. 5. Графики деформирования балки Б 6-1-1 с нормальными и горизонтальными трещинами

Однако в зависимости от уровня нагружения эти графики имеют различные углы наклона к оси деформаций, свидетельствующие о снижении модуля деформаций материалов при увеличении значения изгибающего момента. На первых этапах нагружения до начала развития или образования нормальных трещин изменение прогибов и деформаций материалов с ростом внешней нагрузки имеет линейный характер, т. е. прогибы, а также деформации бетона и арматуры возрастают пропорционально увеличению нагрузки. Эта стадия представлена начальным прямолинейным участком на диаграмме деформаций и прогибов и соответствует упругой работе бетона и арматуры. Причем деформации растянутой арматуры и бетона сжатой грани развиваются синхронно. А угол наклона участка на графике прогибов зависит от наличия нормальных трещин и от количества растянутой арматуры: чем ее меньше, тем незначительнее рост прогибов элементов на начальном этапе нагружения. Небольшой перелом на графике и плавный переход в следующий участок, без резкого нарастания прогиба, соответствуют началу развития и образования новых трещин в растянутой части, а также появлению неупругих деформаций бетона. Этот перелом более выражен в диаграммах среднеармированных элементов. В диаграммах элементов с большим содержанием растянутой арматуры наблюдается плавный переход, без резкого нарастания прогиба.

С началом развития трещин рост деформаций бетона и арматуры также увеличивается. Усилия в сечениях с трещинами воспринимаются арматурой

и растянутым бетоном над трещиной, а на участках между трещинами – бетоном и арматурой совместно. Деформации арматуры растут практически линейно до достижения стадии предела текучести в среднеармированных балках, после чего развитие деформаций резко увеличивается. Также наблюдается рост деформаций бетона, причем более интенсивно деформации бетона развиваются в среднеармированных элементах и менее интенсивно в сильноармированных балках. Это объясняется тем, что в среднеармированных элементах, в отличие от сильноармированных, развиваются значительные неупругие деформации арматуры и трещины в бетоне.

На графике прогибов отмечается новый перелом и рост прогибов, когда в бетоне сжатой зоны и в растянутой арматуре интенсивно возрастают напряжения. В этот момент наблюдается переориентация направления движения трещин, а также формируются локальные зоны разрушения в балках с нормальными трещинами, и происходит рост горизонтальных трещин в балках с нормальными и горизонтальными трещинами. Необходимо добавить, что на стадии разрушения прогибы среднеармированных балок достигали значительных величин и стали визуально заметными. В сильноармированных балках с невысокой прочностью бетона не было визуально заметных прогибов. Кроме того, после снятия внешней нагрузки сильноармированные балки и балки с невысокой прочностью бетона вернулись в первоначальное положение. Дальнейшее деформирование сопровождается дроблением бетона сжатой зоны. Деформации бетона достигают предельной величины с одновременным увеличением деформаций растянутой арматуры.

Как видно из графиков, деформации материалов и прогибы балок развиваются с различной интенсивностью на всем протяжении испытаний. А наличие изломов на графике прогибов свидетельствует о снижении жесткости железобетонных балок при увеличении уровня нагружения. Совместное рассмотрение графиков развития прогибов и деформаций материалов показывает, что снижение жесткости происходит, в основном, по растянутой зоне вследствие снижения модуля деформаций бетона и развития нормальных трещин.

В качестве примера в табл. 1 представлены фактические и расчетные значения прогибов некоторых балок.

Развитие прогибов опытных образцов железобетонных балок происходит в зависимости от количества и параметров начальных трещин, прочности бетона и степени армирования сечения. Для образцов балок с нормальными трещинами серии 4 с шагом трещин в зоне чистого изгиба  $l_{crc} = 100$  мм деформации бетона сжатой зоны были наибольшими, и, как следствие, при одинаковых уровнях нагружения балки этой серии имели наибольшее значение прогибов.

Увеличение степени армирования сечения приводило к увеличению жесткости зоны чистого изгиба и, как следствие, к уменьшению прогибов по сравнению с прогибами среднеармированных элементов при одинаковых относительных значениях изгибающего момента. Так, при одинаковых значениях внешних нагрузок прогибы балок серии 3 были меньше, чем у балок серии 2, имеющих такие же прочность бетона, шаг и глубину проникновения нормальных трещин, но отличающихся процентом армирования сечения. Для

балок с локальными горизонтальными трещинами увеличение длины и количества трещин приводило к некоторому уменьшению жесткости зоны чистого изгиба и, как следствие, к увеличению прогибов при одинаковых относительных значениях изгибающего момента.

Таблица 1

**Развитие деформаций балок с нормальными  
и горизонтальными трещинами на различных уровнях нагружения**

№ серии	Наименование балок	Схема дефектов	Материалы			Значения прогибов балок в середине пролета, мм		Этап нагружения М/М <sub>ult</sub>
			$d_s, \text{мм}$	$A_s, \text{см}^2$	$R_b, \text{МПа}$	экспериментальное $f_{exp}$	расчетное $f_{calc} = s \cdot l_0^2 (\varepsilon_{bm} + \varepsilon_{sym}) / h_0$	
2	Б 2-1-1		20	5,98	37	4,62	4,3	0,65
3	Б 3-1-1					7,12	8,84	0,65
4	Б 4-1-1		14	3,1		4	4,8	0,65
5	Б 5-1-1		20	5,98		5,26	4,8	0,65
6	Б 6-1-1					6,17	4,36	0,65
10	Б 6-2-2		19			5,3	5,94	0,65
							7,3	8,6

Прочность бетона также оказывает влияние на деформативность балок с трещинами. Так, для образцов балок с нормальными и горизонтальными трещинами серии 6 деформации бетона сжатой зоны были больше, чем в балках серии 10, и, как следствие, при одинаковых уровнях нагружения балки этой серии имели большее значение прогибов. В табл. 2 приведены значения средних деформаций материалов на различных этапах нагружения для некоторых балок.

Таблица 2

**Деформации арматуры и бетона**

Наименование балок	Этап нагружения $M/M_{ult}$	Средние деформации бетона $\varepsilon_{bm} \cdot 10^{-5}$ на расстоянии $a$ от крайнего сжатого волокна			Средние деформации растянутой арматуры в зоне чистого изгиба $\varepsilon_{sm} \cdot 10^{-5}$ (5)	Прочность балки по бетону сжатой зоны $R_b^{v,h}$ , МПа
		$a = 0$ (1)	$a = 60$ мм (2)	$a = 120$ мм (3)		
Б 2-1-1	0,32	-31,9	-15,4	1,1	82,68	18,57
	0,635	-81,4	-22	-	176	
	0,89	-232,1	-	-	255,38	
Б 3-1-1	0,32	-66	-18	-6,6	75,35	28,14
	0,646	-147,4	-50	-6,6	154,4	
	0,93	-273,9	-95	-2,2	316,25	
Б 4-1-1	0,363	-57,7	-8,8	-	83,6	18,15
	0,636	-99,6	-8,3	-	163,9	
	0,863	-137,5	-5,2	-	245,3	
	0,91	-217,3	-	-	272,4	
Б 5-1-1	0,33	-76,63	-	15,4	93,5	26,6
	0,625	-155,5	-	13,2	172,7	
	0,875	-244,9	-	13,75	289	
	0,92	-269,9	-	10,45	-	
Б 6-1-1	0,356	-69,85	-	7,7	94,78	27,3
	0,634	-122,6	-	8,25	171,42	
	0,832	-162,5	-	14,85	232,47	
	0,95	-187,8	-	-	271,5	
Б 6-2-2	0,36	-97,9	-	-	81,95	21,7
	0,629	-158,8	-	-	147,95	
	0,921	-257,8	-	-	230,45	
	0,99	-294,8	-	-	298,1	

Также в качестве примера в табл. 2 приведены теоретические значения прочности балок с нормальными и горизонтальными трещинами  $R_b^{v,h}$ :

$$R_b^{v,h} = \frac{K_{IIIC}}{D\sqrt{\pi \cdot l_{cr}}} k_h \cdot k_v, \quad (1)$$

где  $k_v$  – эмпирический коэффициент, определяемый по интерполяции, в зависимости от суммарной длины нормальных трещин  $\Sigma l_{cr}$ , количества нормальных

трещин  $n$ , высоты сечения балки  $h$  и процента армирования сечения  $\mu$ ;  $k_n$  – эмпирический коэффициент, определяемый по интерполяции, в зависимости от суммарной длины горизонтальных трещин  $\Sigma l_{cr}$ , количества горизонтальных трещин по высоте сжатой зоны  $n$  и длины зоны чистого изгиба балки  $l$  [7].

Согласно [8],  $D$  вычисляется по формуле

$$D = (\sin \alpha' - \varphi \cdot \cos \alpha') \cos \alpha', \quad (2)$$

где  $\varphi = 0,8$  – коэффициент трения бетона;  $\alpha'$  – угол сдвига бетона.

Критическая суммарная длина условных нормальных макротрещин [9]

$$l_{cr} = \frac{K_{IC}^2}{\pi \cdot R_{bt,ser}^2}, \quad (3)$$

где  $R_{bt,ser}$  – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению;  $K_{IC}$ ,  $K_{IIC}$  – критические коэффициенты интенсивности напряжений [10];  $K_{IC}$  определяется по формуле [11]

$$K_{IC} = k_0 \cdot R_{bt,ser} \sqrt{d_s}, \quad (4)$$

где  $k_0 = 4$  – эмпирический коэффициент [11];  $d_s$  – максимальный диаметр крупного заполнителя;  $R_{bt,ser}$  – сопротивление бетона осевому растяжению.

$$\frac{K_{IIC}}{K_{IC}} \approx 3. \quad (5)$$

В результате анализа проведенных исследований выявлено, что деформации материалов и прогибы элементов увеличиваются при понижении степени армирования сечения, при уменьшении расстояния между нормальными трещинами, а также при увеличении количества или размеров начальных трещин. При этом на развитие прогибов балок оказывает влияние в большей степени процент армирования сечения и в незначительной степени прочность бетона, количество и вид трещин. Глубина проникновения нормальных трещин практически не влияет на характер развития прогибов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тамразян, А.Г. Бетон и железобетон – взгляд в будущее / А.Г. Тамразян // Вестник МГСУ. – 2014. – № 4. – С. 181–189.
2. Тамразян, А.Г. Обеспечение качества сборных железобетонных конструкций на стадии изготовления / А.Г. Тамразян, И.В. Дудина // Жилищное строительство. – 2001. – № 3. – С. 8.
3. Тамразян, А.Г. Рациональное распределение жесткости плит по высоте здания с учетом работы перекрытия на сдвиг / А.Г. Тамразян, Е.А. Филимонова // Вестник МГСУ. – 2013. – № 11. – С. 84–90.
4. Тамразян, А.Г. Расчет элементов конструкций при заданной надежности и нормальном распределении нагрузки и несущей способности / А.Г. Тамразян // Вестник МГСУ. – 2012. – № 10. – С. 109–115.
5. Орлова, М.А. Испытания железобетонных балок с начальными трещинами. Ч. 1. Постановка и проведение эксперимента / М.А. Орлова // Жилищное строительство. – 2010. – № 8. – С. 39–42.
6. Орлова, М.А. Испытания железобетонных балок с начальными трещинами. Часть 2. Результаты эксперимента / М.А. Орлова // Жилищное строительство. – 2010. – № 9. – С. 38–42.
7. Тамразян, А.Г. К остаточной несущей способности железобетонных балок с трещинами / А.Г. Тамразян, М.А. Орлова // Жилищное строительство. – 2015. – № 6. – С. 32–34.

8. Пирадов, К.А. Теоретические и экспериментальные основы механики разрушения бетона и железобетона / К.А. Пирадов. – Тбилиси : Энергия, 1998. – 355 с.
9. Серых, Р.Л. Конструкции из шлакощелочного бетона / Р.Л. Серых, В.А. Пахомов. – М. : Стройиздат, 1988. – 160 с.
10. Определение критического коэффициента интенсивности напряжений бетона и железобетона при поперечном сдвиге / К.А. Пирадов, Е.А. Гузеев, Т.Л. Мамаев [и др.] // Бетон и железобетон. – 1995. – № 5. – С 18–20.
11. Пересыпкин, Е.Н. Расчет стержневых железобетонных элементов / Е.Н. Пересыпкин. – М. : Стройиздат, 1988. – 168 с.

## REFERENCES

1. Tamrazyan A.G. Beton i zhelezobeton - vzglyad v budushchee. [Concrete and reinforced concrete – prospect]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2014. No. 4. Pp. 181–189. (rus)
2. Tamrazyan A.G., Dudina I.V. Obespechenie kachestva sbornyykh zhelezobetonnykh konstruksii na stadii izgotovleniya. [Quality improvement of ferroconcrete prefabricated constructions at production stage]. *Housing Construction*. 2001. No 3. Pp. 8. (rus)
3. Tamrazyan A.G., Filimonova E.A. Ratsional'noe raspredelenie zhestkosti plit po vysote zdaniya s uchetom raboty perekrytiya na sdvig [Rational stiffness distribution of slabs depending on shear strain]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2013. No. 11. Pp. 84–90. (rus)
4. Tamrazyan A.G. Raschet elementov konstruksii pri zadannoi nadezhnosti i normal'nom raspredelenii nagruzki i nesushchei sposobnosti. [Design element calculation at preset reliability and normal load and bearing capacity distribution]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2012. No. 10. Pp. 109–115. (rus)
5. Orlova M.A. Ispytaniya zhelezobetonnykh balok s nachal'nymi treshchinami. Chast' 1. Postanovka i provedenie eksperimenta. [Reinforced concrete beam tests with initial cracks. Part 1. Experimental]. *Housing Construction*. 2010. No. 8. Pp. 39–42. (rus)
6. Orlova M.A. Ispytaniya zhelezobetonnykh balok s nachal'nymi treshchinami. Chast' 2. Rezultaty eksperimenta. [Test of reinforced concrete beams with cracks Part 2. Results of experiment]. *Housing Construction*. 2010. No. 9. Pp. 38–42. (rus)
7. Tamrazyan A.G., Orlova M.A. K ostatochnoi nesushchei sposobnosti zhelezobetonnykh balok s treshchinami [Residual bearing capacity of reinforced concrete beams with cracks]. *Housing Construction*. 2015. No. 6. Pp. 32–34. (rus)
8. Piradov K.A. Teoreticheskie i eksperimental'nye osnovy mekhaniki razrusheniya betona i zhelezobetona [Theoretical and experimental bases of fracture mechanics of concrete and reinforced concrete]. Tbilisi : Energia Publ., 1998. 355 p. (rus)
9. Serykh R.L., Pakhomov V.A. Konstruksii iz shlakoshchelochного бетона [Lime-slag concrete structures]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1988. 160 p. (rus)
10. Piradov K.A., Guzeev E.A., Mamaev T.L., Abdulaev K.U. Opredelenie kriticheskogo koeffitsienta intensivnosti napryazhenii betona i zhelezobetona pri poperechnom sdvige [Stress intensity factor of concrete and reinforced concrete at lateral shear]. *Beton i zhelezobeton*. 1995. No. 5. Pp 18–20. (rus)
11. Peresyypkin E.N. Raschet stержnevyykh zhelezobetonnykh elementov [Strength analysis of axial ferroconcrete elements]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1988. 168 p. (rus)