

## Теоретико-эмпирические исследования особенностей работы железобетонных стержней на кручение

*В.Ф. Акопян, А.Ф. Акопян, М.О. Онуфриев, И.А. Бергер, В.А. Янке, В.Н.  
Гапонов, И.Н. Паламарчук.*

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** Рассматриваются теоретические основы конструирования железобетонных валов круглого сечения. Приведены результаты испытаний круглых железобетонных стержней на кручение. Проведен анализ результатов. Установлено влияние видов поперечного армирования на прочность и деформативность образцов.

**Ключевые слова:** кручение стержней, крутящий момент, вал, железобетон, армирование, натурные испытания, конструирование железобетонных валов, поперечное армирование.

### Введение

Анализ экспериментальных и теоретических исследований конструкций, подверженных кручению показал, что отсутствуют данные по конструктивным решениям для круглых сечений железобетонных валов. Этот вопрос рассмотрен в данной работе.

### Теоретическая часть

Стержень будет жестко закреплен с одного конца и свободен с другого. Следовательно, получаем консоль, на которую действует только крутящий момент [1-3].

На Рис. 1 показана схема стержня, работающего на кручение. В сечении вала возникают только касательные напряжения, из этого можно сделать вывод, что сечение вала работает на чистый сдвиг [4].

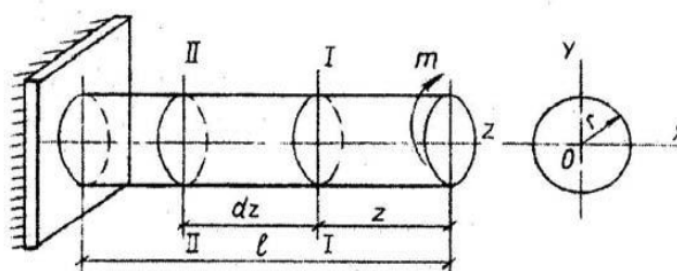


Рис. 1 – Стержень, работающий на кручение (вал)

Формула касательных напряжений круглого вала:

$$\tau = \frac{M_{кр}}{I_p} \rho, \quad (1)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение в поперечном сечении вала;  $M_{кр}$  – крутящий момент;  $I_p$  – полярный момент инерции сечения;  $\rho$  – радиус сечения.

Из этой формулы можно сделать вывод, что напряжение меняется по линейному закону пропорционально расстоянию от центра сечения.

Информация по расчету и конструированию круглых железобетонных сечений в актуальной нормативной документации отсутствует.

Обратимся к трудам Генри Джон Коузена, австралийского ученого, изучавшего свойства железобетона, в том числе при работе на кручение.

Его исследования показали, что можно значительно увеличить прочность конструкции при применении арматуры, устанавливаемой в направлении главных растягивающих напряжений. Таким образом, был сделан вывод, что наиболее эффективным видом армирования является установка спирали под углом  $45^\circ$  к оси элемента [5,6].

Коэном был предложен вариант расчета армирования для круглых стержней с применением спиральной арматуры (Рис. 2), где  $u$  – шаг арматуры,  $X_1$  – диаметр арматурного каркаса.

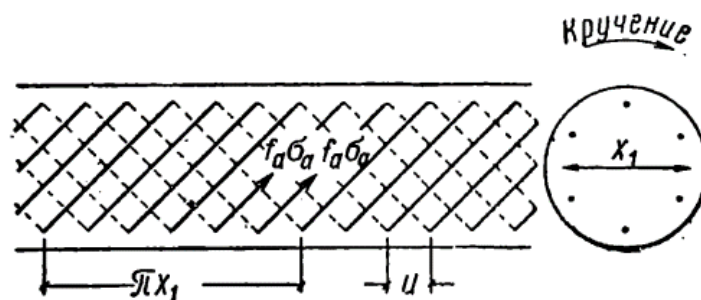


Рис. 2 – Железобетонный стержень круглого сечения со спиральным армированием

Растягивающее усилие в спирали будет представлять собой следующее равенство:

$$N_p = \sigma_a f_a , \quad (2)$$

где  $N_p$  – растягивающее усилие в спирали;  $\sigma_a$  – напряжение в спирали;  $f_a$  – площадь поперечного сечения спирали.

Длина одного витка спирали:

$$l = \pi X_1 , \quad (3)$$

где  $l$  – длина одного витка спирали;  $X_1$  – диаметр одного витка спирали.

Количество непрерывных спиралей:

$$n = \frac{\pi X_1}{u} , \quad (4)$$

где  $n$  – количество непрерывных спиралей;  $u$  – шаг арматуры.

Усилия, возникающие в сечении:

$$N_p \sin 45^\circ = N \cos 45^\circ , \quad (5)$$

$$N_p = N , \quad (6)$$

где  $N_p$  – растягивающее усилие в арматуре;  $N$  – сжимающее усилие в бетоне.

Запишем уравнение момента, возникающего в кольцевом сечении каркаса, образованного арматурой и воспринимающегося всеми стержнями при радиусе, равном  $\frac{1}{2X_1}$ :

$$M_{к.а} = n(N_p \sin 45^\circ + N \cos 45^\circ) \frac{1}{2} X_1, \quad (7)$$

где  $M_{к.а}$  – момент, возникающий в кольцевом сечении арматурного каркаса.

$$M_{к.а} = \frac{nN_p X_1}{\sqrt{2}}, \quad (8)$$

$$M_{к.а} = \frac{\sigma_a f_a \pi X_1^2}{u\sqrt{2}}, \quad (9)$$

Выразим отсюда площадь поперечного сечения спирали:

$$f_a = \frac{\sqrt{2}u \cdot M_{к.а}}{\sigma_a \pi X_1^2}, \quad (10)$$

Используя формулы Коэна, вычислим площади поперечного армирования для крутящего момента 1 т·м [7,8].

### Практическая часть

С целью проверки железобетона на прочность от крутящего момента был проведен эксперимент.

Для экспериментальной части использовались контрольные образцы, имеющие следующие характеристики:

- Железобетонные стержни круглого сечения 160 мм в диаметре;
- Арматура продольная диаметром 8 мм класса А500С;
- Арматура поперечная в виде спирали с шагом витков 30 мм;
- Бетон класса В20.

Для сравнения приняты три вида поперечной арматуры: диаметром 6 мм класса А500С, диаметром 6 мм класса А240 и канат диаметром 6 мм.

На концах образцы имеют квадратное сечение размерами 250x250 мм для жесткого защемления концов. Для закрепления с одного края использована железобетонная стена с подготовленным отверстием для установки образцов, с другой стороны установлены металлическая стойка и специальный ключ с рычагом. С помощью рычага осуществлялась передача нагрузки, для создания крутящего момента в образце (Рис. 3).

Для измерения перемещений было установлено 3 индикатора часового типа по ГОСТ 577-68: вблизи рычага, у закрепления в стенд и посередине образца.



Рис. 3 – Вид стенда для испытаний с установленным на образец рычагом

На Рис. 4 представлен график зависимости деформаций от нагрузки для образца №3 (с поперечной арматурой гладкого профиля диаметром 6 мм класса А240).

Таблица № 1

Порядок нагружения образца №3

	Номер загрузки										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Масса, кг	27,12	27,11	27,17	27,16	27,22	27,54	27,72	27,16	27,17	27,15	27,20
Момент, кг·м	54,2	108,5	162,8	217,2	271,6	326,6	372,1	426,4	480,8	535,1	589,5

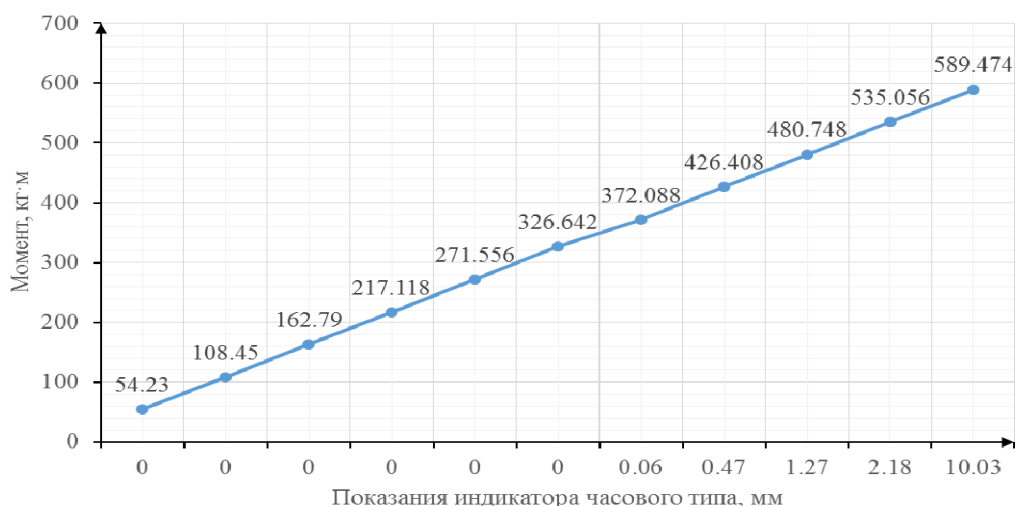


Рис. 4 – График зависимости деформаций от нагрузки (образец №3)

Во всех случаях защитный слой бетона был полностью разрушен. Интересно отметить поведение арматурного каркаса и бетона, который был обжат. Бетон внутри контура каркаса не имел трещин. Можно предположить, что бетон обжимался арматурой, которая выполняла функцию обоймы, что позволило ему сохраниться [9,10].

В ходе испытаний было разрушено 6 образцов. Результаты испытаний представляют большой интерес для изучения данной тематики и находятся в стадии обработки.

### Литература

1. Торяник П.Ф., Вахненко П.Ф., Фалеев Л.В. и др. Расчёт железобетонных конструкций при сложных деформациях. М.: Стройиздат, 1974. 298 с.
2. Боровских А.В. Силовое сопротивление пространственных железобетонных конструкций в условиях эксплуатации. М.: Ассоциации строительных вузов, 2011. 281 с.
3. Улицкий И.И., Ривкин М.В., Самолетов М.В., Дыховичный А.А., Френкель М.М., Кретов В.И. Железобетонные конструкции (расчет и конструирование). 3-е изд. Киев: Будівельник, 1972. 990 с.
4. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: Ассоциации строительных ВУЗов, 2004. 472 с.

5. Маекawa К., Okamura H., Pimanmas A. Non-Linear Mechanics of Reinforced Concrete. 1st изд. London: CRC Press, 2003. 768 p.
6. Байрамукова С.Х., Дюрменовой С.С. Оценка прочности железобетонна при кручении. М.: Ассоциации строительных ВУЗов, 2004. 472 с.
7. Коуэн Дж. Г. Кручение в обычном и предварительно напряженном железобетоне. М: Стройиздат, 1972. 95 с.
8. Sozen M.A., Ichinose T. and Pujol S. Principles of Reinforced Concrete Design. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. 295 с.
9. Малахова А.Н. Армирование железобетонных конструкций. М.: МИСИ-МГСУ, 2015. 129 с.
10. Мандриков А.П. Примеры расчета железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1979. 419 с.

### References

1. Toryanik P.F., Vakhnenko P.F., Faleev L.V. i dr. Raschet zhelezobetonnykh konstruksiy pri slozhnykh deformatsiyakh [Calculation of reinforced concrete structures with complex deformations]. М.: Stroyizdat, 1974. 298 p.
2. Borovskikh A.V. Silovoe soprotivlenie prostranstvennykh zhelezobetonnykh konstruksiy v usloviyakh ekspluatatsii [Power resistance of spatial reinforced concrete structures in operating conditions]. М.: Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2011. 281 p.
3. Ulitskiy I.I., Rivkin M.V., Samoletov M.V., Dykhovichnyy A.A., Frenkel' M.M., Kretov V.I. Zhelezobetonne konstruksii (raschet i konstruirovaniye) [Reinforced concrete structures (calculation and design)]. 3-e izd. Kiev: Budivel'nik, 1972. 990 p.
4. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Raschetne modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona [Calculation models of strength resistance of reinforced concrete]. М.: Assotsiatsii stroitel'nykh VUZov, 2004. 472 p.
5. Маекawa К., Okamura H., Pimanmas A. Non-Linear Mechanics of Reinforced Concrete. 1st изд. London: CRC Press, 2003. 768 p.
6. Bayramukova S.Kh., Dyurmenovoy S.S. Otsenka prochnosti zhelezobetonna pri kruchenii [Strength assessment of reinforced concrete during torsion]. М.: Assotsiatsii stroitel'nykh VUZov, 2004. 472 p.





7. Kouen Dzh.G. Kruchenie v obychnom i predvaritel'no napryazhennom zhelezobetone [Torsion in ordinary and prestressed concrete]. M: Stroyizdat, 1972. 95 p.
8. Sozen M.A., Ichinose T. and Pujol S. Principles of Reinforced Concrete Design. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. 295 p.
9. Malakhova A.N. Armirovaniye zhelezobetonnykh konstruktsiy [Reinforcement of reinforced concrete structures]. M.: MISI-MGSU, 2015. 129 p.
10. Mandrikov A.P. Primery rascheta zhelezobetonnykh konstruktsiy. M.: Stroyizdat, 1979. 419 p.