

Оценка прочности железобетона при кручении

С.Х. Байрамуков, С.С. Дюрменова

Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия, Черкесск

Аннотация: предложен новый подход к решению проблемы оценки прочности железобетона при кручении. Основная идея этой теории заключается в том, что кручение вызывает изгиб элемента в плоскости, проходящей под углом 45° . Решена проблема оценки прочности стержневых железобетонных элементов при кручении. Разработка методики расчета прочности железобетонных элементов при кручении позволило перейти к решению проблемы прочности при изгибе с кручением.

Ключевые слова: исследование, арматура, прочность, трещина, изгиб, кручение, железобетон, элемент, отверстие, балка.

В обозримом будущем железобетон станет основным материалом в практике современного строительства[1]. Предложен новый подход к решению проблемы оценки прочности железобетона при кручении в исследовании [2], проведенным Касаевым Д.Х. Основная идея этой теории заключается в том, что кручение вызывает изгиб элемента в плоскости, проходящей под углом 45° .

Такая концепция основывается на том, что при кручении плиты (рис. 1.1, а) имеет место именно такое напряженное состояние.

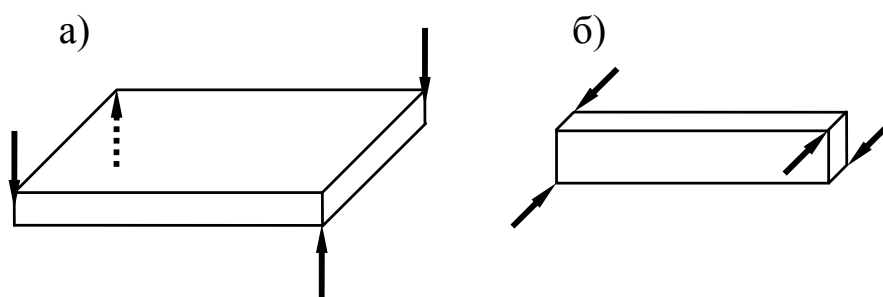


Рис. 1.1 Кручение плиты и балки

При уменьшении одного из габаритных размеров по отношению к другому как в плитных конструкциях, так в балочных элементах (рис. 1.1, б), практически сохраняет характер внешнего воздействия.

Такой подход позволяет принять расчетную схему, представленную на рис. 1.2, которая в дальнейшем реализована на основе следующих предпосылок и допущений:

- сечения плоские до силового воздействия, остаются плоскими и после;
- продольная и поперечная арматура работают на растяжение, а бетон на сжатие;
- трещины пересекают элемент по плоскости перпендикулярной широким граням и под углом 45° относительно горизонтальных граней;
- напряжение в бетоне в момент разрушения достигает призмочной прочности;
- ширина раскрытия наклонной трещины, пересекающей широкую грань, одинакова по всей длине;
- крутящие пары прикладываются на расстоянии не менее $1,5 h$ друг от друга;
- сопротивление бетона растяжению на концах трещин не учитывается;
- арматура претерпевает те же деформации, что и окружающий бетон;
- усилия в арматуре представляются в виде равномерно распределенных силовых интенсивностей продольного и поперечного армирования, определяемые соответственно по формулам:

$$q_s = \frac{\sigma_s \cdot A_{s.tot}}{2 \cdot (h_s + b_s)} ; \quad (1)$$

$$q_w = \frac{\sigma_w \cdot a_w}{S} . \quad (2)$$

Крутящий момент, согласно принятой расчетной схемы (рис. 1.2), относительно оси, проходящей через точку приложения равнодействующей сжимающих напряжений в бетоне N_b , определяется из выражения

$$\cos 45^\circ T = N_s b_o \eta, \quad (3)$$

где $b_0\eta$ - плечо внутренней пары сил, определяемое как произведение рабочей ширины сечения b_0 и эмпирического параметра η ;

$$N_s = N \cos \left[45^\circ - \arcsin \frac{q_w}{q} \right], \quad (4)$$

где $N = h_s q / \sin 45^\circ$; $q = \sqrt{q_s^2 + q_w^2}$ – силовая интенсивность армирования.

В результате обработки опытных данных формула (3) с учетом эмпирической компоненты η приобрела вид:

$$T = \frac{0.80}{1 + 2\xi_T} b_0 h_s q (1 + \varphi) \sqrt{\frac{1 + \varphi^2}{1 + \varphi^4}}, \quad (5)$$

$$\text{где } \varphi = q_w / q_s; \quad \xi_T = \sqrt{\xi_s^2 + \xi_w^2}; \quad \xi_s = \frac{\sigma_s A_{s.tot}}{R_b b h}; \quad \xi_w = \frac{2\sigma_w a_w}{R_b b s}.$$

ξ_s , ξ_w - механические коэффициенты продольного и поперечного армирования соответственно, характеризующие отношения ресурсов прочности сечения арматуры на растяжение к ресурсам прочности бетона на сжатие в продольном и поперечном направлении, комплексно учитывающие влияние прочности стали, бетона, степени продольного и поперечного армирования на несущую способность элемента при кручении. По своей сути механический коэффициент армирования – это относительная высота сжатой зоны бетона.

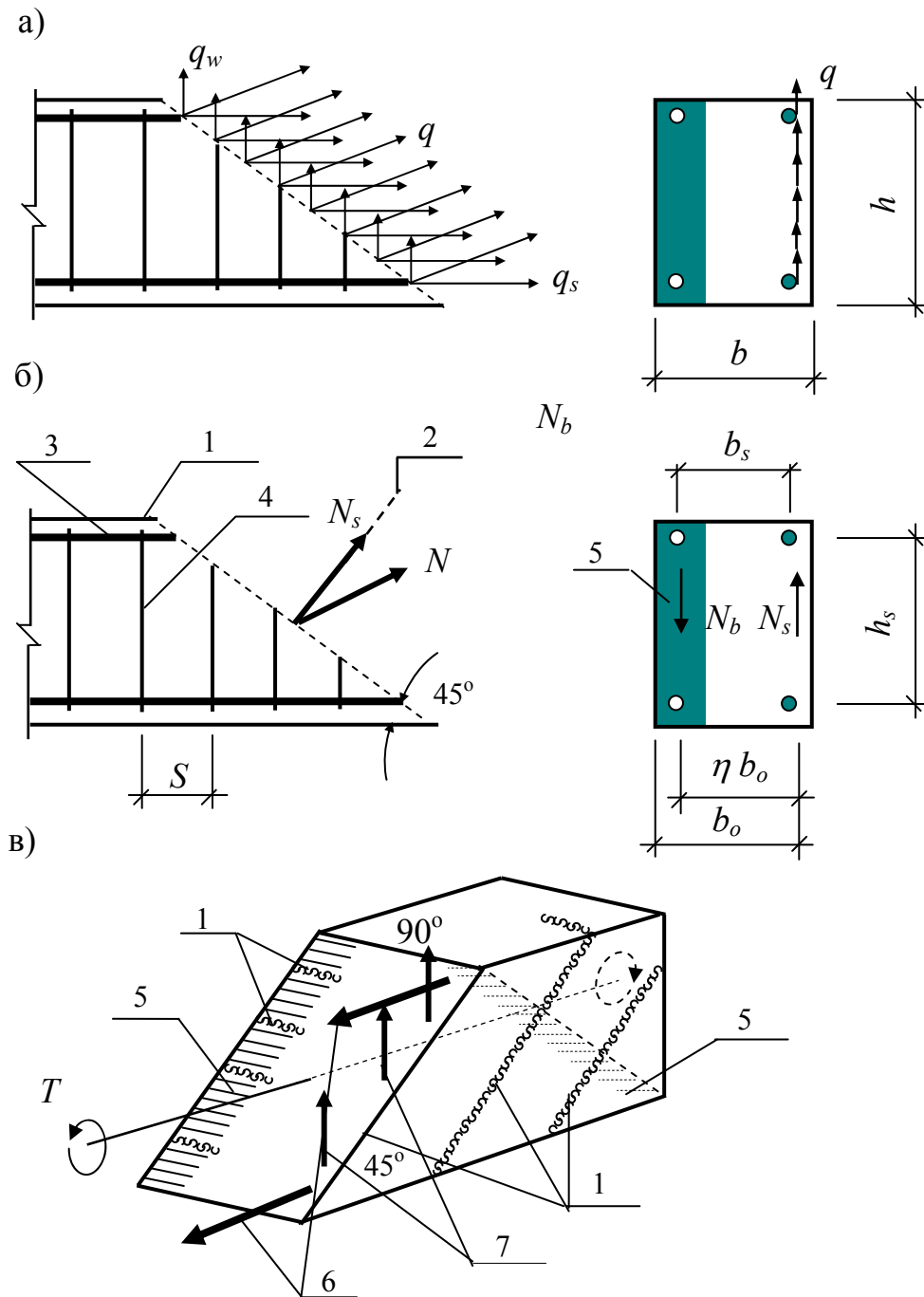


Рис. 1.2. Расчетная схема, принятая при выводе формулы прочности при кручении [2] а - силовые интенсивности армирования; б - приложение нормальных сил; в – схема излома в аксонометрии; 1 - направление трещин; 2 – нормаль к направлению трещины; 3, 4 – стержни продольной и поперечной арматуры; 5 - сжатая зона бетона; 6, 7 – усилия в продольной и поперечной арматуре

Дальнейшие исследования позволили распространить формулу (5) для оценки прочности элементов с асимметричным продольным армированием, с армированием многосрезными хомутами, а также были определены оптимальные границы армирования при кручении. Формула (5) приобрела универсальность после того, как она оказалась приемлемой для оценки крутильной прочности элементов коробчатого, кольцевого, круглого, таврового и двутаврового сечений. Таким образом, была комплексно решена проблема оценки прочности стержневых железобетонных элементов при кручении [3,4].

Разработка методики расчета прочности железобетонных элементов при кручении позволило перейти к решению проблемы прочности при изгибе с кручением. Для этого был использован известный подход - построение графиков или поверхностей взаимодействия [5]. Исследования показали, что при изгибе с кручением предельная область может быть ограничена ломаной линией с расчетными условиями:

- при интенсивном изгибе с кручением, когда $T_m \leq 0,5T$ принимается

$$M_T = M; \quad (6)$$

- при изгибе с кручением, когда $M_T / M \geq 0,5$ и $T_m / T \geq 0,5$,

$$M_T / M = 1,5 - T_m / T \quad (7)$$

или $T_m / T = 1,5 - M_T / M; \quad (8)$

- при интенсивном кручении с изгибом, когда $M_T < 0,5 M$,

$$T_m = T. \quad (9)$$

Для случая загрузки элемента кручением, изгибом и поперечной силой к формулам (1...9) для учета влияния поперечной силы добавляются условия:

- при $Q_T / Q < 0,5$,

$$T_m = T;$$

(10)

- при $Q_T / Q \geq 0,5$ и $T_M / T \geq 0,5$,

$$Q_T / Q + T_M / T = 1,5; \quad (11)$$

- при $T_M / T < 0,5$,

$$Q_M / Q. \quad (12)$$

Использование большого количества опытных результатов позволило осуществить проверку надежности расчетных формул [6].

Поведение железобетонных балок с отверстиями, подверженных кручению и изгибу с кручением были впервые исследованы в работах [7,8,9,10].

В работе [8,10] предлагается модель расчета прочности железобетонных балок с круглыми отверстиями при изгибе с кручением.

Крутящие моменты в этих исследованиях для форм разрушения 1, 2, 3 предлагается определять соответственно по формулам

$$T_1 = 2 \cdot M_{01} \cdot K_1 \cdot \left(\sqrt{\frac{I}{\mathfrak{R}^2} + \frac{r_1}{K_1}} - \frac{I}{\mathfrak{R}} \right); \quad (13)$$

$$T_2 = 2 \cdot \sqrt{M_{01} \cdot K_2 \cdot (M_{01} \cdot R_2 + M_{p2})}; \quad (14)$$

$$T_3 = 2 \cdot M_{01} \cdot K_1 \cdot \left(\sqrt{\frac{I}{\mathfrak{R}^2} + \frac{r_3}{K_1}} - \frac{I}{\mathfrak{R}} \right), \quad (15)$$

$$\text{где } K_1 = \frac{I}{I + 2 \cdot \alpha} \cdot \left[r + \frac{(r + r') \cdot \alpha}{2 \cdot (I + 2 \cdot \alpha)} \right]; \quad K_2 = \frac{I}{I + 2 \cdot \alpha} \cdot \left(r' + \frac{r}{I + 2 \cdot \alpha} \right);$$

$$r = \frac{a_w \cdot \sigma_{wy} \cdot 0,9 \cdot b_1 \cdot h_1}{s \cdot M_{01}}; \quad r' = \frac{a_w \cdot \sigma_{wy} \cdot 0,9 \cdot b_1 \cdot h_1'}{s \cdot M_{01}}; \quad r_1 = \frac{M_{p1} + M_{01}}{M_{01}};$$

$$r_3 = \frac{M_{p3} + R_3 \cdot M_{01}}{M_{01}}; \quad R_2 = \frac{M_{02}}{M_{01}}; \quad R_3 = \frac{M_{03}}{M_{01}}; \quad \alpha = h / b; \quad \mathfrak{R} = T / M;$$

a_w и σ_{wy} – площадь сечения и предел текучести поперечной арматуры; b_1 и h_1 – ширина и высота длинных хомутов; h_1' – общая длина вертикального участка коротких хомутов в расчетном сечении на одной стороне балки; b и h

– ширина и высота балки; M_{01} , M_{02} , M_{03} – моменты при положительном, боковом и отрицательном изгибе; M_{p1} , M_{p2} , M_{p3} – моменты от усилия предварительного напряжения в верхней, боковой и нижней части балки.

При этом авторы исследований [8,10] считают, что наиболее эффективной и точной ту модель расчета, в которой величина T имеет наименьшее значение, т. е. по наименьшему значению T устанавливается фактическая форма разрушения и предельный крутящий момент.

Отмечено, что с увеличением размеров отверстия несущая способность балок снижается. В связи с этим рекомендуется усилить зону отверстия дополнительными диагональными стержнями.

Исследования [7,9] посвящены изучению балок с короткими и длинными отверстиями при кручении и изгибе с кручением.

Предел прочности при кручении половины бетонного (неармированного) сечения балки в зоне отверстия определяется по формулам

$$T_p = 6 \cdot (b_l^2 + 10) \cdot h_l \cdot \sqrt[3]{R_b}, \text{ где } b_l \geq 100 \text{ мм}$$

$$T_p = 14,3 \cdot h_l \cdot \sqrt[3]{b_l^5 \cdot R_b}, \text{ где } 50 \text{ мм} < b_l < 100 \text{ мм}$$

b_l и h_l – ширина и высота сечения половины балки в зоне отверстия.

Принимая параболические кривые взаимодействия при кручении с изгибом и кручении со сдвигом, авторы этих работ, предлагают описывать поверхность взаимодействия зависимостями (рис. 1.3)

$$\left[\frac{T_{ub}}{T_{uo}} \right]^2 + \left[\frac{M}{M_{uo}} \right]^2 = 1 \quad (16)$$

$$\left[\frac{T}{T_{ub}} \right]^2 + \left[\frac{V}{V_{cb}} \right]^2 = 1 \quad (17)$$

$$V_{cb} = b \cdot d \cdot (1,9 \cdot \sqrt{R_b} + 2500 \cdot \rho \cdot V \cdot d / M) \leq 3,5 \cdot b \cdot d \cdot \sqrt{R_b} \quad (18)$$

где T_{Ub} и T_{UO} – предельные крутящие моменты при изгибе с кручением и чистом кручении соответственно; M и M_{UO} – изгибающий момент и предельный момент сечения половины балки; V и V_{cb} – сила сдвига и сопротивление срезу при совместном действии сдвига и изгиба; b и d – ширина и рабочая высота сечения половины балки; ρ – коэффициент упрочнения при растяжении.

Как отмечают авторы, приложенному крутящему моменту противостоит кручение в двух половинках балки и сформированное парой поперечных сил сдвига.

$$T_a = 2 \cdot T + 2 \cdot r \cdot V_{tr}, \quad (19)$$

где r – расстояние от центра кручения до центра половины балки; V_{tr} – поперечный сдвиг.

Анализ, проведенный авторами исследований [7,9], показал, что эффект сплошной балки может быть выражен следующим образом

$$SBE = \Delta T \cdot \lambda \cdot F_w, \quad (20)$$

где $\Delta T = T_8 - T_a(l_o \rightarrow 0)$; $\lambda = (l_f - l_o)/l_f$; $F_w = \sqrt[3]{2 \cdot b \cdot w}$;

$l_f = 2 \cdot b_l + h_l$;

w – ширина балок с учетом отверстия; T_8 – Предельный крутящий момент для сплошной части сечения балки.

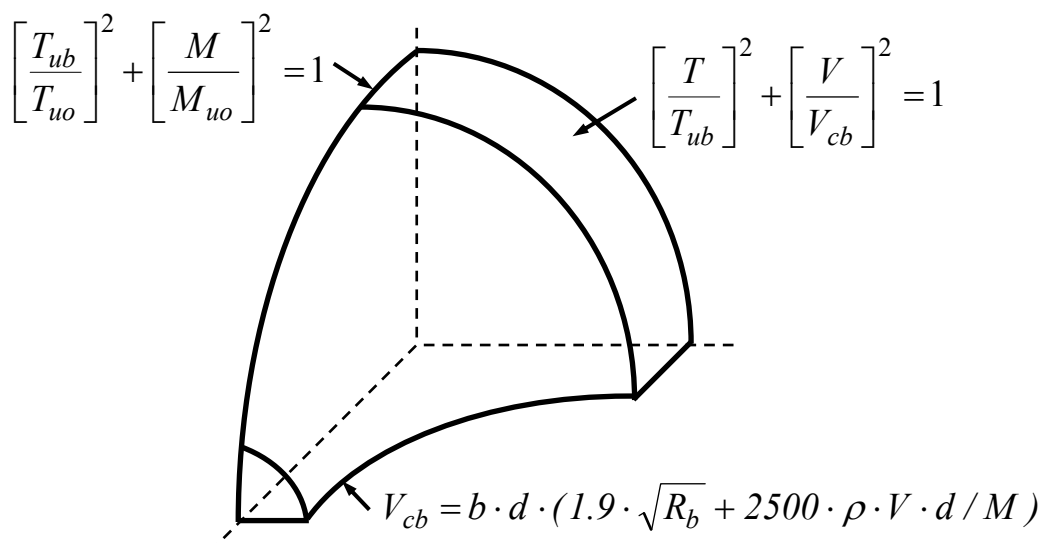


Рис. 1.3 Поверхность взаимодействия для кручения, сдвига и момента
Скорректированный предел прочности для балок с коротким отверстием определялся по формуле:

$$T_{aa} = T_a + SBE \quad (21)$$

При этом авторы считают, что представленное уравнение удовлетворительно оценивает прочность балок с длинными отверстиями, а для балок с короткими отверстиями уравнение было модифицировано на основе полученных экспериментальных данных.

Литература

1. Байрамуков С.Х., Дюрменова С.С. Трещиностойкость железобетонных элементов со сквозными отверстиями при кручении и при кручении с изгибом // Инженерный вестник Дона, 2013, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1592 .
2. Касаев Д.Х. Прочность элементов железобетонных конструкций при кручении и изгибе с кручением. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 2001.-176 с.
3. Касаев Д.Х. Прочность элементов прямоугольного сечения при кручении // Бетон и железобетон. -1987. - №12 – С.23.
4. Касаев Д.Х., Дудов М.Б., Дюрменова С. С. Прочность железобетонных балок с круглыми отверстиями при кручении //Сборник материалов III

международной научно-практической конференции «Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов». – Пенза, 2001. – С. 9-11.

5. Дюрменова С.С. Прочность железобетонных балок со сквозными отверстиями при интенсивном кручении: Дис...канд. техн. наук.- Ростов-на-Дону, 2006.-125 с.

6. Косенко Е.Е., Косенко В.В., Черпаков А.В. К вопросу о влиянии геометрических размеров на прочностные характеристики арматурных сталей // Инженерный вестник Дона, 2010, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/318.

7. Daniel H. R., McMullen A. E. Torsion in Concrete Beams containing an Opening//Journal of The Structural Division. 1977. Vol. 105. N. ST3. PP. 607-617.

8. Mansur M. A., Paramasivam P. Reinforced Concrete Beams with small Opening in Bending and Torsion //ACI Journal. 1984. - N. 81. - PP. 180-185.

9. McMullen E., Daniel H. R. Torsional Strength of Longitudinally Reinforced Beams Containing an Opening //ACI Journal. 1975. - N. 72-29. PP. 415-420.

10. Wafa F., Hasnat Abul, Akhtaruzzaman Ali A. Prestressed Concrete Beams with Opening under and Bending //Journal of Structural Engineering – ASCE. 1989. - N. 11. Vol. 115. PP. 2727-2739.

References

1. Bayramukov S. H., Durmanova S.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1592.

2. Kasaev D. H. Prochnost' jelementov zhelezobetonnyh konstrukcij pri kruchenii i izgibe s krucheniem [Elements of Strength of concrete structures in torsion and bending with torsion]. Rostov n/D: Izd-vo Growth. University press, 2001. 176 p.

3. Kasaev D. H. elements of Strength of rectangular section in torsion. Concrete and reinforced concrete. 1987. No. 12 p. 23.



4. Kasaev D.H., Dudov M.B., Djurmenova S. S. Sbornik materialov III mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Problemy stroitel'stva, inzhenernogo obespechenija i jekologii gorodov». Penza, 2001. pp. 9-11.
5. Durmanova. S.S. Prochnost' zhelezobetonnyh balok so skvoznymi otverstijami pri intensivnom kruchenii: Dis...kand. tehn. nauk. [Strength of reinforced concrete beams with through holes during intensive torsion: Dis...Cand. tech. Sciences.] Rostov-on-don, 2006, 125 p.
6. Kosenko E. E., Kosenko V.V., Cherpakov A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2010, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/318.
7. Daniel G. R., A. E. McMullen Torsion in concrete beams containing openings journal of the structural division. 1977. Vol. 105. N. St3. pp. 607 - 617.
8. Mansour M. P. * Brush concrete beams with small opening in bending and Torsion. ACI journal. 1984. N. 81. PP. 180-185.
9. McMullen E., Daniel, H. R. resistance to twisting of longitudinally reinforced beams containing an opening. ACI journal. 1975. N. 72-29. pp. 415-420.
10. Wafa F., Hasnat Abul Ali A. Akhtaruzzaman prestressed concrete beams with opening Under and bending, journal of structural engineering. ASCE. 1989. N. 11. Vol. 115. pp. 2727-2739.