

УДК 69.07

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.161.2016.76751>

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ОТ УСАДКИ БЕТОНА В РЕБРАХ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

Ассист. А. Н. Сироменко, старш. препод. Е. С. Седышев (ХНУГХ им. А. Н. Бекетова)

РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА УТВОРЕННЯ ТРІЩИН ВІД УСАДКИ БЕТОНУ У РЕБРАХ МОНОЛІТНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЕРЕКРИТТІВ

Асист. А. М. Сіроменко, старш. викл. Є. С. Сєдишев (ХНУМГ ім. О. М. Бекетова)

ESTIMATION OF SHRINKAGE CRACKING OF CONCRETE IN THE RIBS OF MONOLITHIC CONCRETE FLOOR SLABS

Assist. A. Siromenko, senior lecturer E. Sedyshev

В работе дана методика определения напряжений, вызывающих усадочные трещины в монолитных железобетонных балках перекрытий вследствие стесненных деформаций и нарушения технологии бетонных работ.

Так как учет только нормальных напряжений, в рассматриваемой задаче, не дает действительной картины трещинообразования и завышает трещиностойкость железобетонного элемента на усадочные напряжения и деформации, в методику включен также учет напряжений сдвига по контакту плиты и ребра.

Ключевые слова: монолитные железобетонные перекрытия, стесненная усадка, трещинообразование.

В роботі дана методика визначення напружень, що викликають усадочні тріщини в монолітних залізобетонних балках перекриттів унаслідок обмежених деформацій і порушення технології бетонних робіт.

Так як врахування тільки нормальних напружень, в розглянутій задачі, не дає дійсної картини утворення тріщин і завищує тріщиностійкість залізобетонного елементу на усадочні напруги і деформації, в методиці враховуються також напруження зсуву по контакту плити і ребра.

Ключові слова: монолітні залізобетонні перекриття, обмежена усадка, утворення тріщин.

This paper describes methods of determination of stresses which cause shrinkage cracks in the monolithic reinforced concrete beams of slabs. These cracks appear because straitened conditions restrain the free deformation and violation of concreting technology. Increasing the ratio of reinforcement leads to increased tensile stresses during concrete shrinkage. If stresses reach the strength of the concrete tensile appear shrinkage cracks.

The calculations show that taking into account only the normal stresses in the problem, does not give a true picture of cracking and fracture of reinforced concrete element inflates to shrinkage stress and strain, so the method of calculation enabled the shear stress on the contact plate and the ribs.

Keywords: monolithic reinforced concrete floor slab, restrained shrinkage, cracking.

Введение. Усадка железобетона доставляет строителям немало беспокойств. В зависимости от условий эксплуатации строительных зданий и сооружений нормами [1] допускается использование железобетонных конструкций с усадочными трещинами при обеспечении условий, при которых эти деструкции не влияют на надлежащую работу конструкций. Таким образом, исследователи сталкиваются с задачей по оценке величины раскрытия трещин и определения их влияния на работу конструкций.

Анализ последних исследований и публикаций. Строительные бетоны при твердении могут сокращаться в объеме или укорачиваться по трем измерениям (подвергаются усадке). Усадка бетона зависит от ряда причин: количества и вида цемента (больше при большем расходе цемента, высокоактивные и глиноземистые цементы дают большую усадку); количества воды на затворение цемента (больше при большем В/Ц); крупности заполнителя (на мелкозернистом песке усадка больше); применения гидравлических добавок и ускорителей твердения; влажности окружающей среды [2-9].

Так, при обследовании недостроенного остова бескаркасного монолитного жилого дома [10] в поперечных стенах-диафрагмах были обнаружены вертикальные трещины, которые, как выяснилось, были усадочными. Появились они в результате стесненной усадки, по причине нарушений организации бетонных работ (бетонирования, ухода за распалубленными конструкциями).

Японские исследователи в своей работе [11] показали появление внутренних напряжений в стенах, превышающих предел трещинообразования, из-за стесненной усадки. Согласно расчетной модели, ограничителями свободных деформаций усадки стеновых элементов являлись балки, между которыми они находились.

Определение цели и задачи исследования. В строительной практике появление усадочных трещин – это нередкое явление, перед проектировщиками стоит задача определить значение растягивающего напряжения, в условиях стесненной усадки, выявить границы трещинообразования. Авторы исследования поставили перед собой задачу определения возможности трещинообразования в ребрах монолитных железобетонных перекрытий с учетом напряжений сдвига по контакту плиты и ребра. Учет только нормальных напряжений в рассматриваемой задаче не даст достаточно надежной оценки трещинообразования и завысит трещиностойкость железобетонного элемента на усадочные напряжения и деформации.

Основная часть исследования. В железобетонных конструкциях стальная арматура из-за сцепления с бетоном становится внутренней связью и препятствует свободной усадке бетона. В бетоне и арматуре возникают собственные уравновешенные напряжения (растяжение в бетоне и сжатие в арматуре). Средние деформации растяжения в бетоне (ε_{sht}) можно вычислить по разности свободных линейных деформаций усадки бетона (ε_{shc}) и стесненной усадки армированного элемента (ε_{shs}) [13]

$$\varepsilon_{sht} = \varepsilon_{shc} - \varepsilon_{shs} . \quad (1)$$

Средние растягивающие напряжения в бетоне, подсчитанные через тангенциальный модуль деформаций,

$$\sigma_{sht} = \varepsilon_{sht} \cdot E_c \cdot \nu_{ct} , \quad (2)$$

где ν_{ct} - коэффициент упругопластических деформаций бетона при растяжении. Если растягивающее напряжение в бетоне приближается к пределу прочности, то среднее опытное значение $\nu_{ct} = 0,5$ [13].

Наибольшие значения растягивающих напряжений находятся в зоне контакта с арматурой. Деформации ε_{shs} для арматуры упругие и в ней возникают сжимающие напряжения

$$\sigma_s = \varepsilon_{shs} \cdot E_s. \quad (3)$$

Уравнение равновесия внутренних усилий в элементе при двусторонней симметричной арматуре

$$\sigma_{shs} \cdot A_c = \sigma_s \cdot A_s \text{ или } \sigma_{shs} = \sigma_s \cdot \rho_s, \quad (4)$$

где $\rho_s = A_s / A_c$ - коэффициент армирования продольной арматурой.

После подстановки в уравнение (4) значений напряжений и деформаций из (1, 2 и 3) можно найти значение средних растягивающих напряжений в бетоне

$$\sigma_{shs} = \frac{\varepsilon_{shc} \cdot E_s}{1/\rho_s + \alpha_s/\nu_{ct}}, \quad (5)$$

где $\alpha_s = E_s / E_{ck}$.

Свободную линейную деформацию ε_{shc} усадки бетона можно определить опытным путем или рассчитать по методике п. 3.1.3.8 ДСТУ [12] с учетом деформации усадки при высыхании ε_{cd} и деформации внутренней усадки ε_{ca} , которая развивается в процессе твердения бетона

$$\varepsilon_{shc} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}. \quad (6)$$

При этом следует отметить, что значение условного размера поперечного сечения h_0 в формулу (3.8) п. 3.1.3.8 [12] следует подставлять в сантиметрах, а не в миллиметрах. Тогда величина линейной деформации усадки будет соответствовать опытным данным [15].

При усадке железобетона с увеличением коэффициента армирования возрастают растягивающие напряжения и при достижении ими прочности на растяжение бетона f_{ctk} возникают усадочные трещины. Положение п. 2.2.2.6 ДБН [1] о критерии образования трещин по достижении деформации крайнего растянутого волокна бетона в сечении предельного значения $\varepsilon_{ctu} = \frac{2 \cdot f_{ctm}}{E_{ck}}$, на

наш взгляд, значительно завышает трещиностойкость при усадочных деформациях в бетоне и для таких задач неприменимо. Вопрос о критерии образования усадочных трещин в железобетонных элементах требует дополнительных исследований.

В этой работе рассмотрим систему, состоящую из железобетонных плиты и ребра, при действии напряжений от усадки железобетона и напряжений при изгибе балки таврового сечения от собственного веса конструкции. Длина расчетного блока конструкции принимается равной шагу усадочных трещин S_r , который можно определить по п. 5.3.4.3 ДСТУ [12] или опытным путем (рис. 1).

Напряжения растяжения в полке сечения при стесненной усадке элемента можно определить по формуле (5), как для симметрично армированного железобетонного элемента. Напряжения растяжения на уровне центра тяжести арматуры ребра можно определить по формуле (1.28) [13], как для одностороннего несимметричного армирования

$$\sigma_{shs} = \frac{2,25 \cdot \varepsilon_{shc} \cdot E_s}{1/\rho_s + 2,25\alpha_s/\nu_{ct}}. \quad (7)$$

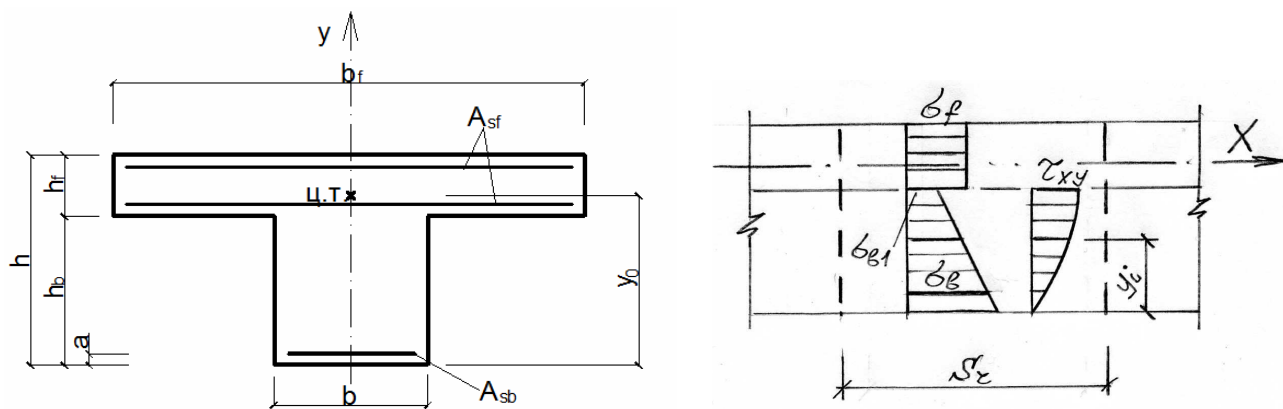


Рис. 1. Схема к определению в железобетонном элементе таврового сечения усадочных напряжений

Касательные напряжения на контакте ребра и полки определим, как и в работе [16], из условия равновесия стержня в пределах полки на длине расчетного блока

$$\sigma_f \cdot A_f = \tau_{xy} \cdot b \cdot S_r,$$

отсюда

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_f \cdot b_f \cdot h_f}{b \cdot S_r}, \quad (8)$$

где $\sigma_f = \sigma_{shf}$ по формуле (5) – средние растягивающие напряжения в полке от усадки бетона.

Нормальные напряжения в ребре на контакте с полкой определим из условия равновесия стержня в пределах ребра на длине расчетного блока

$$\frac{\sigma_b + \sigma_{b1}}{2} \cdot b \cdot (h_b - a) = \tau_{xy} \cdot b \cdot S_r,$$

отсюда

$$\sigma_{b1} = \frac{2 \cdot S_r \cdot \tau_{xy}}{h_b - a} - \sigma_b, \quad (9)$$

где $\sigma_b = \sigma_{shb}$ по формуле (7) – растягивающие напряжения на уровне рабочей арматуры в ребре от усадки бетона.

По высоте сечения ребра допускаем линейное распределение нормальных напряжений и параболическое для касательных напряжений

$$\sigma_{bi} = \sigma_b \left[1 - \frac{(y_i - a)(\sigma_b - \sigma_{b1})}{\sigma_b (h_b - a)} \right], \quad (10)$$

$$\tau_{xyi} = \tau_{xy} \sqrt{y_i / h_b}, \quad (11)$$

где y_i – координата по высоте от нижней грани ребра.

Суммарные нормальные напряжения по высоте ребра

$$\sigma_{xi} = \sigma_{bi} + \sigma_{ci}, \quad (12)$$

где нормальные напряжения по высоте ребра

$$\sigma_{ci} = \frac{M_g \cdot (y_0 - y_i)}{I_x}, \quad (13)$$

где M_g – изгибающий момент в расчетном сечении при действии нагрузок от собственного веса перекрытия;

I_x – момент инерции расчетного таврового сечения элемента;

y_0 – координата центра тяжести таврового сечения от нижней грани ребра.

Условие прочности ребра при сложных деформациях для бетона, как хрупкого материала, примем по теории прочности Мора (формула 5.61 [17])

$$0,5 \cdot \sigma_{xi} (1 - \chi) + 0,5 \cdot (1 + \chi) \sqrt{\sigma_{xi}^2 + 4\tau_{xyi}^2} \leq f_{ctk}. \quad (14)$$

где $\chi = f_{ctk} / f_{ck}$ – соотношение прочностей на растяжение и на сжатие для расчетного класса бетона.

Если условие (14) соблюдается, то усадочные трещины не образуются.

В качестве примера по разработанной методике рассчитаны балки на трещинообразование от усадочных деформаций. Исследования проводились в недостроенном монолитном каркасном здании с сеткой колонн 6х6 м по ул. О. Яроша в г. Харькове. При техническом обследовании в балках подкрепления контура (рис. 2) монолитных

железобетонных плит перекрытия с консольными участками вылетом 2,3 м выявлены усадочные трещины.

Эти трещины нормальные к продольной оси балок, расположены в их пролете и ветвятся на всю высоту ребра. В большинстве случаев количество усадочных трещин варьируется от 1 до 4 шт. (рис. 3), но также встречаются конструкции с количеством трещин 5...9 шт. Шаг трещин в основном соответствует проектному шагу хомутов 200...250 мм. Проектный класс бетона для монолитного перекрытия С20/25.

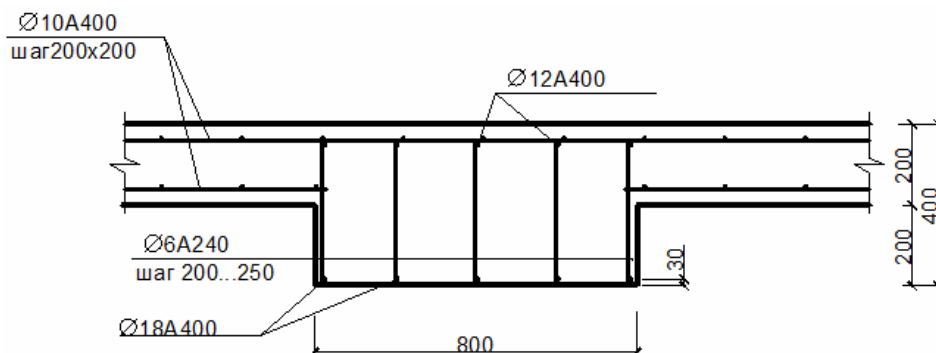


Рис. 2. Сечение балки монолитного перекрытия и ее армирование

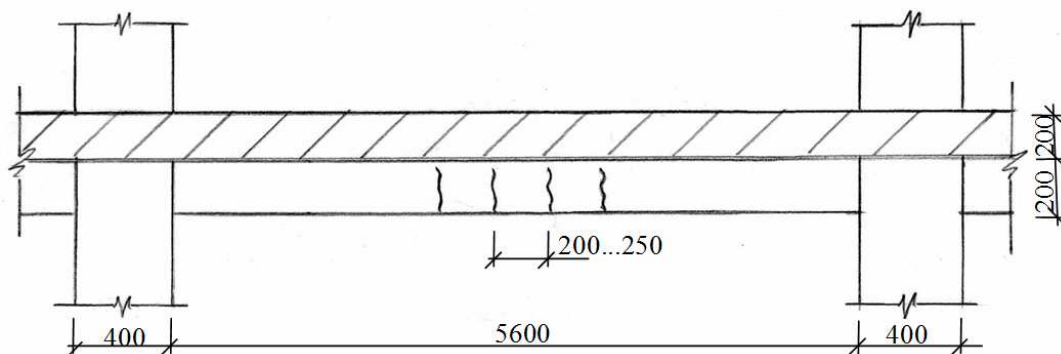


Рис. 3. Схема расположения усадочных трещин в балке монолитного перекрытия

Поверочные расчеты балки с указанными параметрами и нагрузкой от собственного веса перекрытия показали, что главные растягивающие напряжения, подсчитанные по формуле (14) для свободных деформаций усадки бетона в возрасте 28 суток и после распалубки на 7-е сутки (подсчитаны по 3.1.3.8 ДСТУ [12]), приблизительно одинаковы по всей высоте ребра и составляют 1,3 МПа, что несколько меньше характеристического значения прочности бетона класса С20/25 в 1,5 МПа. При этом, если выполнить расчет усадочных деформаций для возраста бетона от трех месяцев, то они уже увеличиваются на 15 % и более, а растягивающие напряжения достигнут и превысят предел прочности. Возраст бетона перекрытий, рассмотренных в примере, на момент обследования составлял уже более семи лет. В методике ДСТУ [12] при расчете свободных деформаций усадки бетона не учитываются различия в количестве воды затворения или водо-цементного отношения. Если учитывать повышенный расход воды при бетонировании, например по формулам 2.31 и 2.33 [14], то при увеличении объема воды на 1 м³ бетона со

150 до 200 л деформации свободной усадки бетона могут увеличиться в 1,5 раза. Обследование по верху плит перекрытий недостроенного здания показало, что на многих участках перекрытий действительно укладывался бетон с повышенным расходом воды. Если бетон изготавливался на шлаковом портландцементе, то усадочные деформации также могут возрасть на 25 % [14].

Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении

1. Стесненные деформации усадки железобетонных элементов могут привести к раскрытию трещин еще до рабочего нагружения элементов, что нужно учитывать на стадии проектирования и подбора технологии возведения конструкций.

2. Результаты расчетов трещинообразования от усадки бетона в ребрах монолитных плит по предложенной методике согласуются с опытными данными.

3. В дальнейшем требуется дополнительно исследовать вопрос о критерии образования усадочных трещин в железобетонных элементах.

Список использованных источников

1. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]: ДБН В.2.6.-98:2009 // Мінрегіонбуд України. – К., 2009.
2. Александровский, С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести [Текст] / С. В. Александровский. – М.: Стройиздат, 1973.
3. Фрайфельд, С. Е. Собственные напряжения в железобетоне [Текст] / С. Е. Фрайфельд. – М. Л.: Стройиздат, 1941. – 128 с.
4. Карпенко, Н. И. Теория деформирования железобетона с трещинами [Текст] / Н. И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1976. – 208 с.
5. Улицкий, И. И. Теория и расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом длительных процессов [Текст] / И. И. Улицкий. – К.: Будівельник, 1967. – 347 с.
6. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила для зданий (EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings).

7. Bažant, Z. P., 2000, "Criteria for Rational Prediction of Creep and Shrinkage of Concrete," The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage-Structural Design Effects, SP-194, A. Al-Manaseer, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 237-260.
8. Bažant, Z. P. (2001). "Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future." Nuclear Engrg. Des., 203, 27-38.
9. ACI Committee 209. (2008). Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete (ACI 209.2R-08). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
10. Сироменко, А. Н. Экспериментальные исследования НДС плитных железобетонных элементов при температурно-усадочных воздействиях [Текст] / А. Н. Сироменко, А.Ю. Кулаков // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. Сер. Технические науки и архитектура. – К.: Техника, 2004. – Вып.60. – С. 65-75.
11. Kanda, T., Momose, H., Imamoto, K., Mihashi, H.: Stochastic approach to shrinkage cracking control for reinforced concrete structural elements. In: Journal of Advanced Concrete Technology 6 (2008) 1, pp.121-133.
12. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст]: ДСТУ Б В.2.6-156:2010 // Мінрегіонбуд України. – К., 2011.
13. Байков, В. Н. Железобетонные конструкции: Общий курс [Текст] / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – М.: Стройиздат, 1985. – 728 с.
14. Проектирование железобетонных конструкций [Текст]: справоч. пособие / под ред. А. Б. Голышева. – К.: Будівельник, 1985. – 496 с.
15. Ерышев, В. А. Усадочные деформации в бетонных и железобетонных элементах [Текст] / В. А. Ерышев, Е. В. Латышева, А. С. Бондаренко // Известия КГСАУ. – 2012. – № 4. – С. 97-101.
16. Молодченко, Г. А. Трещинообразование в монолитных железобетонных плитах от усадки бетона [Текст] / Г. А. Молодченко, А. Н. Сироменко, А. Ю. Кулаков // Строительство материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Днепропетровск: ПГАСА, 2009. – Вып. 50. – С. 380-385.
17. Барданов, Ю. М. Курс сопротивления материалов в структурно-логических схемах [Текст] / Ю. М. Барданов. – К.: Вища шк., 1988. – 215 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор В. С. Шмуклер

Сироменко Анна Миколаївна, асистент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел. 7073107. E-mail: bk@kname.edu.ua.
Седишев Євгеній Серафимович, старший викладач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М.Бекетова. Тел. 7073107. E-mail: bk@kname.edu.ua.

Siromenko Anna, assistant, O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.
Sedyshev Evgen, O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

Стаття прийнята 19.05.2016 р.