

УДК 691.58.668.3

ВЛИЯНИЕ ВИДА НАГРУЖЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КЛЕЕВОЙ АНКЕРОВКИ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ КЛАССА А500С*д.т.н., проф. Шутенко Л.Н., к.т.н., проф. Золотов М.С.,
к.т.н., доц. Скляров В.А., Корекян О.Н.**Харьковская национальная академия городского хозяйства, г. Харьков*

При реконструкции промышленных зданий широко применяются анкерные соединения на акриловых kleях. Особенно эффективны они для соединения бетонных и железобетонных элементов зданий и сооружений.

В связи с использованием в Украине в строительном производстве нового сортамента арматурной стали согласно [1] в Харьковской национальной академии городского хозяйства проведены экспериментальные исследования по определению прочности анкеровки арматурных стержней класса А500С в бетон акриловыми kleями различных составов. Как показали эти исследования [2-4] прочность заделки арматурных стержней класса А500С в бетон акриловыми kleями обычных составов обеспечивается при $l_{ai\bar{e}} = 22,5d_s$. Использование специальных добавок увеличило прочностные характеристики акрилового kleя [5], что позволило уменьшить глубину заделки указанных стержней до $17,5d_s$ (d_s – диаметр арматурных стержней) [2].

Исследования кратковременной и длительной прочности указанной анкеровки показали на их достаточную надежность. Применение таких анкерных соединений потребовало изучения их напряженного состояния при кратковременном и длительном воздействиях выдерживающих усилий на арматурный стержень (рис. 1).

Результаты исследований [5] свидетельствуют, что при длительно действующих нагрузках поведение акриловых kleев согласуется с линейной теорией ползучести [6].

При рассмотрении напряженного состояния тел вращения под действием осесимметричной нагрузки напряжения и перемещения в условиях линейной ползучести могут выражаться через бигармоническую функцию А.Лява [7]:

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (2 - \nu) \Delta^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right\}; \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu \Delta^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} \right\}; \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu \Delta^2 \Phi - \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right\}; \quad (3)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left\{ (1-\nu) \Delta^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right\}; \quad (4)$$

$$u = \frac{1+\nu}{E(t)} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r \partial z} + \int_{\tau_1}^t (1+\nu) \frac{\Delta^2 \Phi}{\partial r \partial z} \frac{\partial}{\partial \tau} \omega(t, \tau) d\tau. \quad (5)$$

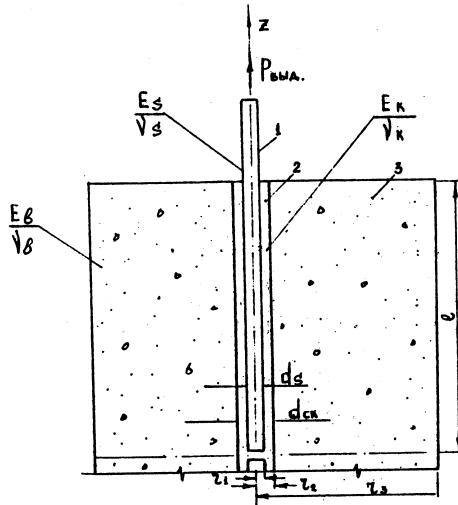


Рис. 1. Расчетная схема анкерного соединения на акриловом клее:
1 – арматурный стержень; 2 – слой акрилового клея; 3 – бетонный цилиндр

$$\omega = \frac{1+\nu}{E(t)} \left\{ 2(1-\nu) \Delta^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right\} + \int_{\tau_1}^t (1+\nu) \left\{ 2(1-\nu) \frac{\Delta^2 \Phi}{\partial z^2} \right\} \frac{\partial}{\partial \tau} \omega(t, \tau) d\tau; \quad (6)$$

$$\Delta^4 \Phi(t, r, z) = 0; \quad (7)$$

$$\omega(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} + G(t, \tau), \quad (8)$$

где ν – коэффициент Пуассона; r, z – цилиндрические координаты; t – возраст акрилового клея; τ – момент времени, для которого определяется напряженное состояние; τ_1 – возраст акрилового клея, для которого определяется напряженное состояние; $E(t)$ – мгновенный модуль упругости акрилового клея; G – мера ползучести.

Подставим функцию напряжения в виде

$$\Phi(t, r, z) = \varphi(t) \chi(r, z). \quad (9)$$

В соответствии с [5] получим следующее выражение:

$$\Phi(t, r, z) = [A(t) \sin mz + D(t) z \cos mz] K_0(mr). \quad (10)$$

Из граничных условий на торцах анкерного соединения

$$[\sigma_z]_{z=l} = [\tau_{rz}]_{z=l} = 0 . \quad (11)$$

Согласно выражениям (1) и (4) находим функции $A(t)$ и $D(t)$, связанные с соотношением

$$mA(t) = -D(t)[(2\nu - 1) - \lambda \operatorname{tg} \lambda], \quad (12)$$

где $m = \lambda/l$; λ – корень трансцендентного уравнения.

$$\sin \lambda \cos \lambda + \lambda = 0 , \quad (13)$$

l – глубина заделки арматурного стержня в бетон.

Трансцендентное уравнение (13) имеет бесчисленное множество корней:

$$\lambda_s = \xi_s + i\eta_s; s = 1, 2, 3, \dots; ms = \lambda s/l .$$

Поэтому функцию напряжений, удовлетворяющую граничным условиям (11), можно записать в виде ряда:

$$\sum_s D_s(t) \left\{ z \cos \frac{\lambda_s z}{l} - \frac{l}{\lambda_s} [(2\nu - 1) - \lambda_s \operatorname{tg} \lambda_s] \right\} K_0 \left(\frac{\lambda_s r}{l} \right). \quad (14)$$

С учетом ранее полученных решений [5,6], подставляя выражение (14) в (1-6), получаем уравнения для напряжений и перемещений в акриловом клее:

$$\tau_{rz} = - \sum_s D_s(t) \left(\frac{\lambda_s}{l} \right)^2 \left[\cos^2 \lambda_s \sin \frac{\lambda_s z}{l} + \frac{\lambda_s z}{l} \cos \frac{\lambda_s z}{l} \right] K_0 \left(\frac{\lambda_s r}{l} \right); \quad (15)$$

$$\sigma_z = - \sum_s D_s(t) \left(\frac{\lambda_s}{l} \right)^2 \left[\sin^2 \lambda_s \cos \frac{\lambda_s z}{l} + \frac{\lambda_s z}{l} \sin \frac{\lambda_s z}{l} \right] K_0 \left(\frac{\lambda_s r}{l} \right); \quad (16)$$

$$\sigma_r = \sum_s D_s(t) \left\{ \left(\frac{\lambda_s}{l} \right)^2 \left[\frac{\lambda_s z}{l} \sin \frac{\lambda_s z}{l} - (1 + \cos^2 \lambda_s) \cos \frac{\lambda_s z}{l} \right] K_0 \left(\frac{\lambda_s r}{l} \right) + \right. \quad (17)$$

$$\left. + \frac{1}{r} \frac{\lambda_s}{l} \left[\frac{\lambda_s z}{l} \sin \frac{\lambda_s z}{l} - (1 + \cos^2 \lambda_s - 2\nu) \cos \frac{\lambda_s z}{l} \right] K_0 \left(\frac{\lambda_s r}{l} \right) \right\};$$

$$u = \frac{1+\nu}{E(t)} \sum_s D_s(t) \varphi_s(r, z) - \sum_s \varphi_s(r, z) (1+\nu) \int_{\tau_1}^t D_s(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \omega(t, \tau) d\tau; \quad (18)$$

$$\omega = \frac{1+\nu}{E(t)} \sum_s D_s(t) \Psi_s(r, z) - \sum_s \Psi_s(r, z) (1+\nu) \int_{\tau_1}^t D_s(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \omega(t, \tau) d\tau; \quad (19)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{1+\nu}{E(t)} \sum_s D_s(t) \Psi'_s(r, z) - \sum_s \Psi'_s(r, z) (1+\nu) \int_{\tau_1}^t D_s(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \omega(t, \tau) d\tau, \quad (20)$$

где z – координата точки, в которой определяется напряжение или перемещения; $K_i \left(\frac{\lambda_s r}{l} \right)$ – функция Макдональда;

$$\left. \begin{aligned} \varphi_s(r, z) &= \frac{\lambda_s}{l} \left[(1 + \cos^2 \lambda_s - 2\nu) \cos \frac{\lambda_s z}{l} - \frac{\lambda_s z}{l} \sin \frac{\lambda_s z}{l} \right] K_1 \left(\frac{\lambda_s r}{l} \right) \\ \Psi_s(r, z) &= \frac{\lambda_s}{l} \left[\frac{\lambda_s z}{l} \cos \frac{\lambda_s z}{l} - (1 + \sin^2 \lambda_s - 2\nu) \sin \frac{\lambda_s z}{l} \right] K_o \left(\frac{\lambda_s r}{l} \right) \\ \Psi'_s(r, z) &= \frac{\partial \Psi_s(r, z)}{\partial z} \end{aligned} \right\}. \quad (21)$$

Рассмотрим граничные условия на поверхности контакта анкера с акриловым kleem при его выдергивании, из которых вытекают соотношения, предназначенные для определения функции $D_s(t)$. К граничным условиям относится непрерывность касательных и радиальных напряжений, относительных осевых удлинений и радиальных перемещений на контакте клей-анкер, а также равенство $\sigma_z = 0$ при $z = 0$.

Начиная с некоторого возраста $\tau_1 > \tau$ ($\tau = 10 \dots 25$ сут.), приращение модуля упругости kleя прекращается, поэтому можно пользоваться асимптотическим равенством

$$n(t) = \frac{E_S}{E_t} \approx \frac{E_S}{E_{(\infty)}} = \frac{E_S}{E_K} = n_K. \quad (22)$$

В соответствии с [4,5] примем для меры ползучести kleя следующие выражения:

$$G(t, \tau) = \varphi(\tau) \left| 1 - e^{-\gamma(t-\tau)} \right|; \quad (23)$$

$$\varphi(\tau) = C_o + \frac{A_1}{\tau}; \quad (24)$$

$$R(t, \tau) = \frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ \frac{1}{E_\sigma} + \left(C_o + \frac{A_1}{\tau} \right) \left[1 - e^{-\gamma(t-\tau)} \right] \right\} E. \quad (25)$$

В этих выражениях C_o, A_1, γ – константы, зависящие от состава и прочности акрилового kleя и определяемые опытным путем. Структуру ядра в выражении (25) можно упростить, если рассматривать процесс ползучести акрилового kleя в зрелом возрасте.

Хорошо согласуется с данными экспериментов для акрилового kleя возраста более 25 сут. аналитическая зависимость меры ползучести [1]:

$$G(t - \tau) = \sum_{k=1}^m A_k l^{-\gamma_k(t-\tau)}; \quad (26)$$

$$A_k \geq 0; \gamma_o = 0; \gamma_k \geq 0,$$

$$R(t - \tau) = - \sum_{k=0}^m A_k \gamma_k e^{-\gamma_k(t-\tau)} E. \quad (27)$$

При $k = 1$

$$R(t - \tau) = -A_1 \gamma_1 e^{-\gamma_1(t-\tau)} E. \quad (28)$$

С учетом граничных условий, приведенных ранее, выражений (23-26), а также начала отсчета времени загружения $t = 0$ определяем функцию

напряжения $D_s(t)$. Подставляем полученные значения $D_s(t)$ в формулы (15-17) и получаем значения напряжений $\tau_{rz}^{(k)}, \sigma_z^{(k)}, \sigma_r^{(k)}$ в случае предельного напряженного состояния анкерного соединения при выдергивании стержня, заделанного в бетон с помощью акрилового клея.

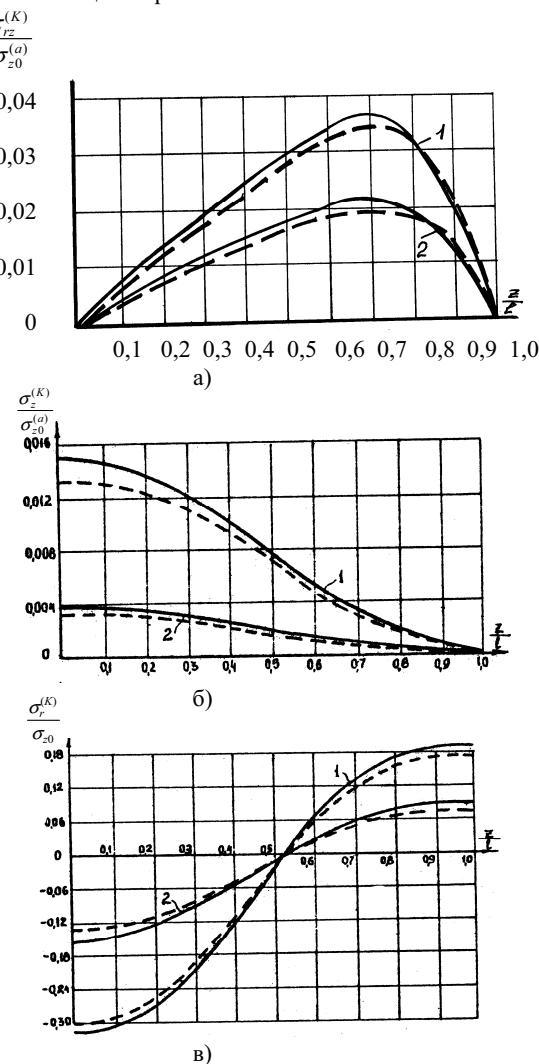


Рис. 2. Распределение касательных (а), нормальных осевых (б) и радиальных (в) напряжений в клеевом слое на контакте клей-анкер (1) и клей-бетон (2)

На рис. 2 изображены графики распределения касательных, нормальных осевых и радиальных напряжений в слое акрилового клея на контактах клей-анкер и клей-бетон. Сплошными линиями нанесены кривые распределения напряжений, вычисленные для случая упруго-мгновенного приложения выдергивающего усилия, а пунктиром – кривые распределения напряжений в результате ползучести акрилового клея в течение 100 сут.

Расчет выполнен для анкерного соединения, материалы которого имеют следующие характеристики: модули упругости анкера $E_S = 2 \cdot 10^5$ МПа, клея $E_k = 8,78 \cdot 10^3$ МПа, бетона $E_b = 2,3 \cdot 10^4$ МПа, коэффициенты Пуассона $\mu_S = 0,25$, $\nu_k = 0,35$ и $\nu_b = 0,16$. Геометрические характеристики анкерного соединения: глубина заделки $l = 17,5d_S$, диаметр анкера $d_S = 2,0$ см; диаметр скважины $d_{ck} = 4,0$ см; $l_0 = 20$; $l_1 = 10$.

Сравнение кривых рис. 2 свидетельствует о том, что в процессе ползучести акрилового клея напряжения в клее уменьшаются на 12-18% от первоначального приложения выдергивающего усилия.

Напряжения в анкерном соединении на акриловом клее с учетом его ползучести в любой момент воздействия выдергивающего усилия, приложенного к анкеру, определяют по выражениям (15...17). Это даёт возможность рассчитывать названное соединение с учетом времени его эксплуатации.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. ДСТУ 2760:2006. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 28 с.
2. Шутенко Л.Н. Зависимость глубины заделки арматурных стержней класса А500С от прочности акрилового клея / Л.Н. Шутенко, М.С. Золотов, Р.Б. Ткаченко // Коммунальное хозяйство городов.: науч.-техн. сб. – К.: Техніка, 2007. – Вип. 79. – С. 36-45.
3. Шутенко Л.Н. Прочность анкеровки арматуры класса А500С акриловыми kleями / Л.Н. Шутенко, М.С. Золотов, Р.Б. Ткаченко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди.: зб. наук. праць. – Рівне, 2008. – Вип. 16, Ч. 2. – С. 410-417.
4. Шутенко Л.Н. Длительная прочность анкеровки арматуры класса А500С акриловыми kleями / Л.Н. Шутенко, М.С. Золотов, Р.Б. Ткаченко // Науковий вісник будівництва: Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури. – ХОТВ АБУ, 2008. – С. 110 – 114.
5. Золотов С.М. Акриловые kleя для усиления, восстановления и ремонта бетонных и железобетонных конструкций / С.М. Золотов // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 2003. – Вип. 59. – С. 440-447.
6. Золотов С.М. Прочность, деформативность и разрушение акриловых kleев при различных видах нагружения / С.М. Золотов // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: зб. наук. праць. – Львів: Каменяр, 2009. – Вип. 8. – С. 179-188.
7. Арутениян Н.Х. Некоторые вопросы ползучести / Н.Х. Арутениян. – М.-Л.: Гостехиздат, 1952. – 276 с.
8. Ляв А. Математическая теория упругости / А. Ляв. – М.: ОНТИ НКTP СССР, 1935. – 362 с.