

Проектирование и устройство деформационных швов сооружений

А.А. Шилин, М.В. Зайцев, И.А. Золотарев, О.Б. Ляпидевская
"Гидроизоляция подземных и заглубленных сооружений при строительстве и ремонте"

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРИЧИН НА ДЕФОРМАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Для оценки величины деформаций в сооружении прежде всего необходимо рассмотреть основные причины их возникновения. Это относится и к подземным сооружениям, которые подвержены значительным нагрузкам от горных пород, грунтов, воды и пр.

Общеизвестно, что основными причинами проявления деформаций в сооружении являются нагрузки и воздействия (далее по тексту "нагрузки"), классификация которых подробно изложена в нормативных документах - СНиП 2.01.07-85* "Нагрузки и воздействия" [10].

Согласно классификации СНиП, основным критерием подразделения нагрузок является продолжительность их действия, в соответствии с которой различают постоянные и временные, в т.ч. длительные, кратковременные и особые нагрузки.

На наш взгляд, в дополнение к существующей классификации следует ввести еще один уточняющий критерий - кратность действия нагрузок. Тогда все виды нагрузок можно подразделить на две условные группы - нагрузки однократного действия и нагрузки многократного, циклического действия. Такая классификация применительно к конструктивным решениям по обустройству деформационных швов имеет ряд преимуществ:

- исходные параметры деформационного шва определяются по величине и сочетанию однократных нагрузок;
- эксплуатационные параметры деформационного шва подбираются в зависимости от интенсивности воздействия на элементы конструкции многократных нагрузок; при этом следует учитывать возможность необратимых изменений в конструкциях от однократных нагрузок.

Однократные нагрузки воздействуют на сооружение только единожды, в определенный период времени, иногда весьма продолжительный. Многократные нагрузки непрерывно повторяются, причем интенсивность их действия и интервалы между ними могут изменяться.

По предлагаемой классификации к однократным нагрузкам, вызывающим однократные деформации, следует отнести:

- равномерную осадку сооружения в целом;
- неравномерную осадку элементов или отдельных частей сооружения;
- усадку, вызванную процессами схватывания, твердения и вызревания бетона;
- пластические деформации (например, прогиб конструкций, изгиб стоек и т.п.), вызванные статическими воздействиями;
- ползучесть в элементах сооружения, являющуюся следствием длительных статических воздействий.

К многократным нагрузкам, которые приводят к возникновению циклических деформаций, можно отнести:

- динамические воздействия;
 - набухание или высыхание материалов при изменении их влажности;
 - химические взаимодействия материала конструкции и агрессивных сред, которые также можно отнести и к однократным причинам;
 - изменения объема конструкции от колебаний температуры окружающей среды.
- Прежде чем перейти к детальному анализу воздействий указанных причин на деформации сооружений и их влияние на разрабатываемое конструктивное решение деформационных швов, следует учитывать, что при наличии различных сочетаний воздействий и особенностей конструкций проводимый анализ не может быть исчерпывающим.

В работе рассматриваются только те нагрузки и воздействия, а также их сочетания, которые

следует учитывать при разработке конструкций деформационных швов (кроме швов мостовых сооружений).

Основное внимание следует уделять анализу причин объемных деформаций сооружения, таким как:

- усадка бетона;
- изменение относительной влажности воздуха;
- химические взаимодействия, происходящие в бетоне конструкций;
- колебания температуры окружающей среды;
- явление ползучести бетона.

Влияние усадки бетона

Одной из основных причин, вызывающих деформации конструкции, которые не зависят от нагрузки на сооружение, является усадка бетона - способность бетона к изменению объема в процессе твердения, приводящая к возникновению внутренних напряжений.

Усадка бетона - комплексное явление; существуют не одна, а как минимум четыре разновидности усадки [1] - пластическая, гидратационная, гидравлическая, термическая. Иногда к этим разновидностям еще добавляют усадку от карбонизации бетона [2].

Условно деформацию усадки бетона можно разделить на: деформацию после укладки бетонной смеси под воздействием физических процессов (пластическая или первоначальная усадка) и деформацию бетона под воздействием физико-химических процессов (гидратационная, гидравлическая и термическая усадки).

Пластическая или первоначальная усадка наблюдается в бетонной смеси после ее укладки (до начала схватывания). В течение этого периода вода затвердения еще химически не связана с составляющими цемента, и в этой связи могут наблюдаться два физических процесса - испарение воды с открытой поверхности и седиментационное осаждение твердых частиц смеси с постепенным уплотнением. Этот вид усадки достаточно хорошо изучен.

Величина пластической усадки зависит от состава бетонной смеси, свойств использованных материалов и внешних условий. Так, например, применение жестких бетонных смесей с низким водоцементным отношением, использование водоудерживающих добавок, значительное содержание крупного заполнителя, высокий процент армирования, защита поверхности от испарения воды могут уменьшить конечную величину пластической усадки.

Гидратационная усадка или усадка при внутреннем обезвоживании бетона вызывается тем, что объем образовавшихся гидратов цементного теста меньше объема безводных веществ и воды. Иногда этот вид усадки называют контракционной деформацией или контракцией.

Этот вид усадки развивается в период интенсивного протекания химических реакций между цементом и водой и не столько изменяет внешние размеры изделия, сколько способствует изменениям поровой структуры материала, приводя к образованию воздушных пор и уменьшению объема пор, занимаемых водой.

Гидравлическая усадка, или, как ее еще называют, влажностная усадка, проявляется после схватывания бетона и вызывается испарением влаги и ее перераспределением в скелете цементного камня. Гидравлическая усадка проявляется гораздо медленнее, чем пластическая, а ее величина значительно меньше. Эта разновидность усадки зависит от продолжительности и условий выдерживания бетона, вида составляющих бетонной смеси, их расхода, гранулометрии инертных заполнителей, формы конструкции, процента армирования.

Термическая усадка происходит в раннем возрасте и вызывается понижением температуры бетона, когда вслед за его разогревом в результате экзотермии при гидратации цемента следует охлаждение, а также в результате воздействия температуры окружающей среды, колебания которой могут быть значительными. Обе эти причины часто сочетаются. Эту разновидность усадки зачастую игнорируют, и деформации бетона, обусловленные ею, объясняют другими причинами. В целом термическая усадка, когда она складывается с усадкой гидравлической,

превышает значение теплового расширения бетона.

Прогнозирование усадки. Усадку нельзя ликвидировать полностью, но ее можно ограничить и/или оценить с той или иной достоверностью. Какова же величина окончательной усадки, как она изменяется во времени и каким образом ее можно вычислить?

Известно несколько достаточно простых способов определения величины усадки бетона. Так, в работе [3] приводится аналитический способ оценки относительной усадки бетона в возрасте 7 суток $\epsilon_r(7)$ и окончательной относительной усадки $\epsilon_r(\infty)$.

Значение относительной усадки бетона $\epsilon_r(7)$ (при известных характеристиках состава бетонной смеси), твердеющего во влажных условиях в течение $t_m < 7$ сут., определяют по формуле:

$$\epsilon_r(7) = k_r (B+v)^{0,2} \quad (1)$$

где: k_r - безразмерный коэффициент, принимаемый равным 0,14-106 для тяжелых и 0,16-10-6 для мелкозернистых бетонов; B и v - удельное (по объему) количество воды затворения и содержание вовлеченного воздуха в уплотненной бетонной смеси, л/м³.

Количество вовлеченного воздуха в бетонной смеси (v) в формуле (1) принимают: для бетонов с воздухововлекающими добавками - по фактическим данным, а при отсутствии таких данных равным 30 л/м³; для бетонов с пластифицирующими добавками, включая добавки суперпластификаторов, равным 10 л/м³.

Значения $\epsilon_r(7)$ для бетонов на крупном заполнителе при отсутствии данных о характеристиках состава бетонной смеси принимают по табл. 1.

Таблица 1

Подвижность бетонной смеси		Значения $\epsilon_r(7) \cdot 10^6$, для бетона класса	
Осадка конуса, см	Жесткость, с	B5 - B20	B25 - B60
-	80 - 60	-	270
-	35 - 30	230	300
1 - 2	15 - 10	290	330
5 - 6	-	350	400
9 - 10	-	380	430

Для бетонов, подвергнутых тепловлажностной обработке, значения $\epsilon_r(7)$, вычисленные по формуле (1) или принятые по данной таблице, следует умножить на коэффициент, равный 0,9.

Например, из данных таблицы 1 следует, что для бетона класса более B25 с осадкой конуса 5-6 см значение $\epsilon_r(7)$ составляет 400-106, что соответствует величине относительной деформации усадки бетона 0,0004 м/м или 0,4 мм/м. Таким образом, бетонная конструкция длиной 1 м через 7 суток уменьшится на 0,4 мм; длиной 10 м - на 4 мм, длиной 100 м - на 40 мм и т.д.

Предельные значения относительных деформаций усадки бетона (окончательную деформацию усадки) $\epsilon_r(\infty)$, используемые в расчетах, вычисляют по формуле:

$$\epsilon_r(\infty) = \epsilon_r(7) \cdot \xi_{1y} \cdot \xi_{2y} \cdot \xi_{3y} \quad (2)$$

где: E_r - коэффициенты, принимаемые по таблицам 2, 3 и 4.

Модуль открытой поверхности элемента $M = F/V$, где: F - площадь поверхности элемента, открытой для испарения влаги, м²; V - объем элемента, м³. Для стержневых элементов модуль открытой поверхности допускается вычислять по формуле $M=P/A$, где P - периметр поперечного сечения, соответствующий указанной открытой поверхности, м; A - площадь поперечного сечения элемента, м².

Относительную влажность среды принимают согласно заданию на проектирование, при отсутствии этих требований - по отраслевым ТУ. Для конструкций, эксплуатируемых на открытом воздухе, ее устанавливают в зависимости от климатического района расположения сооружения, согласно СНиП 23-01-99 [11], как среднюю относительную влажность воздуха наиболее жаркого месяца.

Для ТУ климатического района, согласно СНиП 23-01-99, относительную влажность воздуха рекомендуется устанавливать как среднемесячную влажность, соответствующую времени загрузки (начала высыхания) элементов конструкции.

Для элементов типовых конструкций, климатический район эксплуатации для которых не известен, допускается принимать коэффициент E_r равным 1.

Таблица 2

Возраст бетона t_m , сут. в момент окончания влажного хранения	7 и менее	28	60	90	180	360 и более
E_{rt}	1,0	0,95	0,93	0,92	0,91	0,9

Таблица 3

Модуль открытой поверхности элемента M_0 , м ⁻¹	0	5	10	20	40	60	80 и более
E_{rM}	0,22	0,54	0,66	0,92	1,10	1,18	1,22

Таблица 4

Относительная влажность среды, ϕ_c , %	40 и менее	50	60	70	80	90	100
$E_{r\phi}$	1,14	1,08	1,00	0,91	0,79	0,63	0

При необходимости можно оценить относительную деформацию усадки на момент времени t по формуле:

$$\epsilon_r(t) = \epsilon_r(\infty) [1 - e^{-\alpha_r(t-t_0)}] \quad (3)$$

$\epsilon_r(\infty)$ - предельное значение относительной деформации усадки с момента начала твердения бетона, определяемое по формуле (2);

α_r - параметр, характеризующий скорость нарастания деформаций усадки во времени; принимается в зависимости от модуля открытой поверхности M_0 элемента конструкции по табл. 5.

Таблица 5

Модуль открытой поверхности, $M_0, м^{-1}$	10 и менее	20	40	60	80 и более
Значение параметра $\alpha, сут^{-1}$	0,004	0,008	0,016	0,025	0,033

Значения параметра α увеличивают на 30%, если усадка начинается в летнее время года (июль), и уменьшают на 50% при начале усадки в зимнее время года (январь); в промежуточных случаях применяют линейную интерполяцию.

Весьма простой, графоаналитический метод оценки влияния различных факторов на относительную деформацию усадки бетона изложен в работе [2].

Предельное значение относительной деформации усадки данного бетона ϵ можно определить из выражения:

$$\epsilon = \epsilon(\infty) \cdot \xi_{V/C} \cdot \xi_{C/T} \cdot \xi_{V} \cdot \xi_{\gamma} \cdot \xi_{\gamma_0} \quad (4)$$

где: $\epsilon(\infty)$ - предельное значение деформаций усадки бетона из смеси определенного состава в заданных исходных условиях; $\xi_{V/C}$ - безразмерные коэффициенты, учитывающие относительное влияние: водоцементного отношения (В/Ц), содержания цементного теста, приведенных размеров образца γ , см ($\gamma = A/P$, где A и P - соответственно площадь (см²) и

периметр (см) поперечного сечения) и относительной влажности воздуха

Значения безразмерных поправочных коэффициентов $\xi_{V/C}$ для обычного тяжелого бетона в выражении (4) принимают по данным рис. 1. Их изменение позволяет ориентировочно оценить влияние различных факторов на усадку бетона.

Для определения фактического значения предельной относительной деформации усадки данного бетона предлагается предварительно определить величину $\epsilon(\infty)$. При определении $\epsilon(\infty)$ принимают В/Ц = 0,5; ЦТ = 20%; $V = 2,5$ см; $\gamma_0 = 70\%$. В исходном выражении (4) отсутствует коэффициент, учитывающий влияние возраста бетона к моменту начала протекания усадки, поскольку продолжительность начального твердения бетона во влажных условиях мало отражается на предельной усадке бетона.

К недостаткам этого метода следует отнести то, что он позволяет проводить только сравнительную оценку возможных значений предельной относительной деформации усадки бетона, при этом определение фактических значений требует дополнительных исследований. Кроме того, нельзя прогнозировать изменение усадки бетона во времени.

Аналогичный, графоаналитический метод прогнозирования величины усадки бетона, лишенный указанных недостатков, представлен в работе [1].

Следует добавить, что это один из немногих примеров, в которых учитываются не только характеристики используемых составов бетона, условия их применения, изменение усадки во времени, но и степень армирования бетонной конструкции.

В этом случае предельную относительную усадку можно рассчитать по формулам:

для неармированного бетона:

$$\epsilon_s(\infty) = k_{\gamma_1} \cdot k_{\gamma_2} \cdot k_{\gamma_3} \quad (5)$$

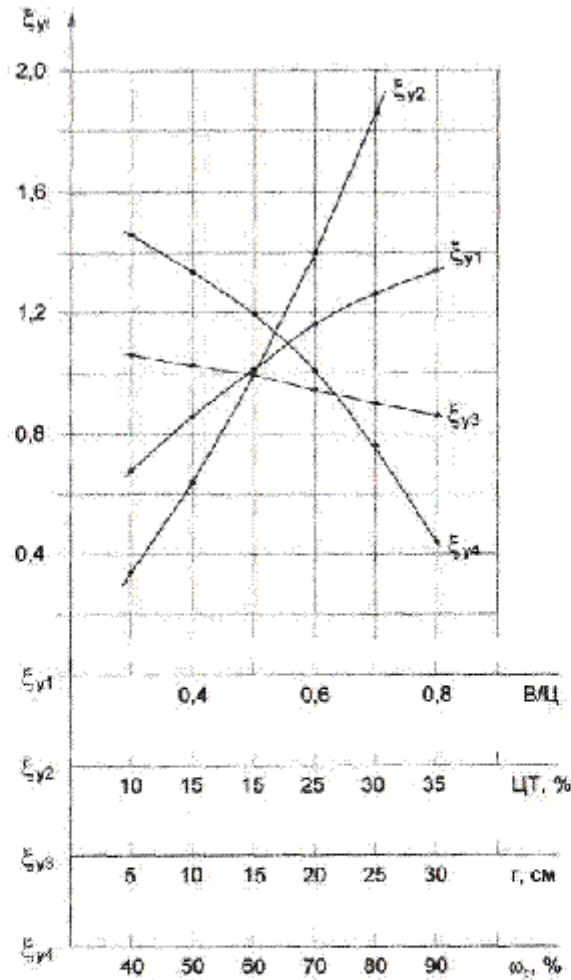


Рис. 1. Значения безразмерных поправочных коэффициентов ϵ_{y_i} при определении усадки бетона.

- ϵ_{y1} - коэффициент, учитывающий водоцементное соотношение бетона;
- ϵ_{y2} - коэффициент, учитывающий содержание цементного теста;
- ϵ_{y3} - коэффициент, учитывающий приведенный размер образца;
- ϵ_{y4} - коэффициент, учитывающий относительную влажность воздуха;
- В/Ц - водоцементное отношение;
- ЦТ - содержание цементного теста;
- r - приведенный размер образца;
- ω - относительная влажность воздуха.

для железобетона:

$$\varepsilon(\infty) = k_{y1} \cdot k_{y2} \cdot k_{y3} (1 - 10\Delta_v) \quad (6)$$

где: $\varepsilon(\infty)$ - предельная относительная усадка;

k_{y1} - коэффициент, учитывающий климатические условия (зависит от влажности воздуха, ω , %);

k_{y2} - коэффициент, учитывающий форму конструкции (зависит от m_n);

$$m_n = \frac{A}{P/2};$$

A - площадь поперечного сечения;

$P/2$ - половина периметра;

K_{y3} - коэффициент, учитывающий расход воды и цемента (В/Ц);

Δ_v - процент конструктивного армирования.

Значения этих коэффициентов приведены на рис. 2.

Усадку на конкретный момент времени можно определить, используя вероятностный коэффициент P_t :

$$P_t = \frac{\varepsilon_y(t)}{\varepsilon_y(\infty)} \quad (7)$$

значения которого приведены на рис. 3. Однако, как отмечают авторы [1], этот график все же не характеризует картину полностью, так как скорость усадки зависит от размеров конструкции.

В этой же работе [1] приводятся нормируемые значения, согласно которым окончательную относительную величину усадки бетона можно принимать равной 150 мкм/м для влажных районов, 200 мкм/м для районов умеренного климата, 300 мкм/м для районов сухого и жаркого климата и 400 мкм/м для районов очень сухого и жаркого климата.

Достаточно простой способ определения предельной относительной деформации усадки железобетона во времени предложен в работе [4].

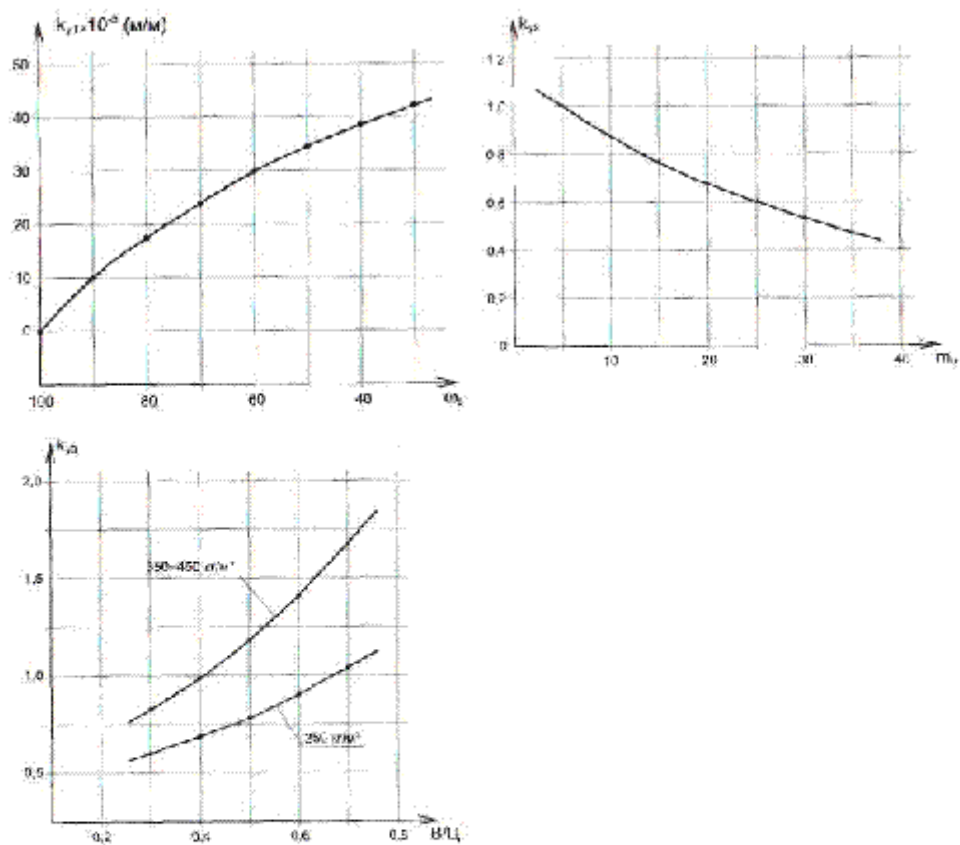


Рис. 2. Значения поправочных коэффициентов при расчете усадки.

K_{r1} (мм) - коэффициент, учитывающий относительную влажность воздуха;
 K_{rs} - безразмерный коэффициент, учитывающий форму конструкции;
 K_{ra} - безразмерный коэффициент, учитывающий водоцементное соотношение;
 m_r - относительная влажность воздуха;
 m - приведенная форма конструкции;
 B/C - водоцементное отношение.

Величина предельной относительной усадки $\gamma_r(\%)$ нормируется в зависимости от подвижности бетонной смеси и условий твердения бетона. Значения этих величин представлены в табл. 6.

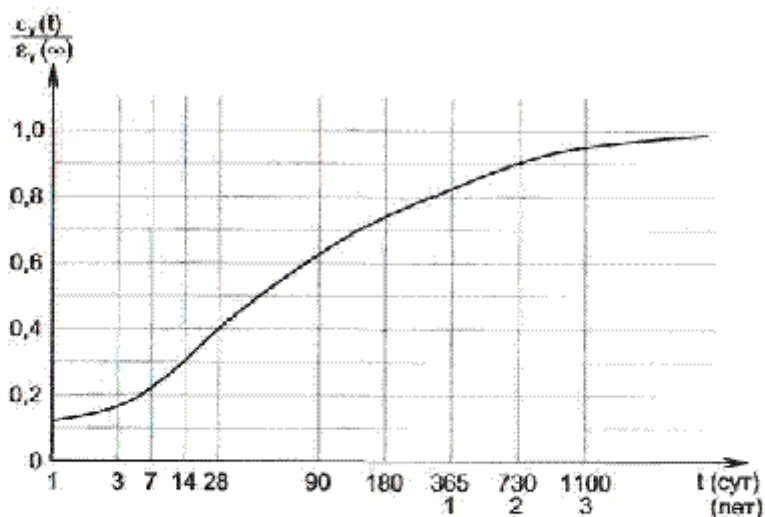


Рис. 3. График изменения относительного значения усадки во времени.

- $\epsilon_y(t)$ - деформация усадки бетона на данный момент времени t ;
- $\epsilon_y(\infty)$ - предельная величина деформации усадки бетона.

От момента изготовления конструкции до конкретного рассматриваемого момента времени достигнутая величина усадки $\epsilon(t)$ составляет:

$$\epsilon_y(t) = k \cdot \epsilon_y(\infty) \quad (8)$$

где: k - безразмерный коэффициент, зависящий от толщины конструкции.

Значения k приведены на рис. 4.

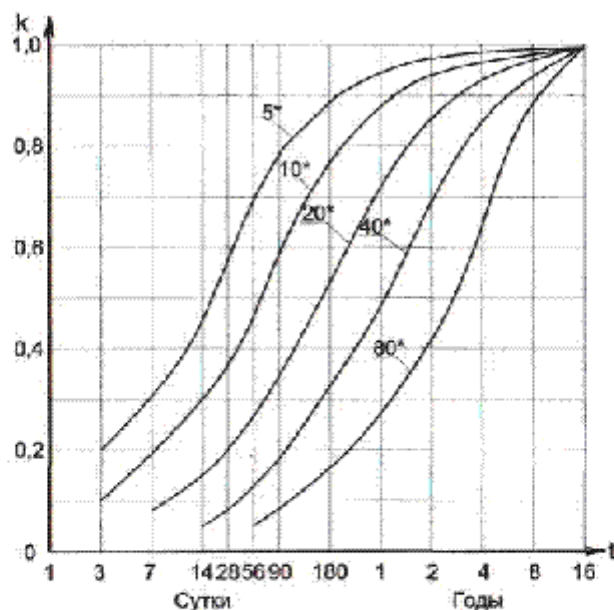


Рис. 4. Затухание усадки во времени (изменение безразмерного коэффициента k).

* **Примечание:** цифры над кривой означают толщину элемента конструкции в см.

Значения предельной относительной деформации усадки для железобетона по DIN 1053 и 1045

Таблица 6

Усадка железобетонных конструкций при схватывании и твердении вносит существенный вклад в общую деформативность сооружения, которая реализуется в элементах деформационных швов. Поэтому в данном разделе были подробно рассмотрены достаточно простые способы оценки величины этой усадки. Эти способы в зависимости от имеющейся информации позволят с той или иной достоверностью, уже на стадии проектирования, учесть усадку бетона при разработке конструкций деформационных швов.

Влияние изменения относительной влажности воздуха на усадку конструкций

Большинство строительных материалов, в том числе и бетон, имеют сильно развитую и достаточно открытую капиллярно-пористую структуру, благодаря чему могут поглощать влагу из окружающей среды (гигроскопическое увлажнение) либо впитывать (сорбировать) воду при непосредственном соприкосновении с ней.

Способность строительных материалов сорбировать влагу и десорбировать ее при определенных условиях изучена недостаточно, и этому вопросу при оценке возможных объемных деформаций возведенного сооружения не придается особого значения. Между тем отсутствие внимания к этим явлениям достаточно часто является причиной многих повреждений в конструкциях.

Так, например, после нескольких лет пребывания на воздухе бетон приобретает равновесную гигроскопическую влажность, величина которой зависит от характеристик пористости материала и условий окружающей среды. Для плотных тяжелых бетонов равновесная гигроскопическая влажность весьма незначительна - 2-3%, но в легких и ячеистых бетонах, обладающих развитой системой пор, она может достигать соответственно 7-8 и 20-25%. Максимальное водошмощение (влагоемкость) тяжелого бетона достигает 4-8% по массе (10-20% по объему).

Изменение содержания воды в материале приводит к изменению объема, т.е. к объемным деформациям: при высыхании элемента происходит испарение воды и уменьшение объема, при увлажнении - наоборот.

Объемные деформации, наступающие вследствие изменения относительной влажности, зависят

от тех же факторов, что и при температурных воздействиях [5].

Таблица 7

Предельные относительные деформации основных строительных материалов при изменении влагосодержания

Материал	Единица: мм/м
Гранит	0,06 - 0,18
Песчаник	0,30 - 0,80
Глиняный кирпич	0,12
Силикатный кирпич	0,15
Бетон	0,15 - 0,18
Шлакобетон	0,16
Цементный раствор	0,20
Гипс	1,2 - 2,0
Мягкая древесина	20
Твердая древесина	20 - 26

В общем, длина строительного элемента изменяется в зависимости от коэффициента линейной деформации под влиянием увлажнения или высыхания. При этом следует отметить, что величины деформаций увлажнения значительно меньше величин деформаций высыхания материалов. Таким образом, наиболее целесообразно при проектировании учитывать изменения объема, характеризующиеся перепадом минимального и максимального содержания влаги. Величины предельных относительных деформаций основных строительных материалов, соответствующих максимальному изменению влагосодержания, представлены в табл. 7 [5].

При использовании этих показателей для оценки возможных объемных деформаций конструкции следует учитывать, что:

- данные таблицы 7 справедливы для стабилизированных материалов, как, например, бетон в возрасте >28 сут., высушенная древесина и т.д.;
- влажность материала элемента в момент монтажа - "монтажное увлажнение" - является исходным значением, с которого начинаются деформации этого вида.

Деформации конструкций, вызванные химическим взаимодействием материала конструкции с окружающей средой

В процессе эксплуатации конструкция подвергается коррозионным повреждениям вследствие воздействия различных агрессивных химических веществ, подробный перечень и степень агрессивности которых приводятся в СНиП 2.03.11-85 "Защита строительных конструкций от коррозии" [12]. В основном это вода, углекислый газ, различные соли, содержащие ионы Cl^- , SO_4^{2-} , и т.д. Результат этого воздействия - частичное изменение химической структуры материала, возникновение новых веществ, в большинстве случаев имеющих другой объем, нежели первоначальные материалы.

Применительно к рассматриваемому вопросу коррозионные химические воздействия привлекают внимание по весьма важной причине - из-за изменения объема элемента конструкции. Основным элементом этих процессов является вода, выполняющая, как минимум, две роли - или сама вступает в реакцию, или является посредником, катализатором протекания реакций.

В некоторых неорганических вяжущих материалах изменение объема вызвано концентрацией, накоплением большого количества воды и превращением ее в кристаллизационную воду, например у гипса или глины. Основное вещество сохраняется неизменным. У других материалов, которые под воздействием влаги химически преобразуются, объем изменяется в результате изменения объема молекул, но не пор. Это явление известно под названием "расширение материала" и заключается в следующем. С веществом реагирует только вода, в результате чего на первой стадии процесса возникает новое соединение. Затем вода выполняет вторую роль - является катализатором, т.е. растворяет и переносит в зону реакции другие вещества из основного материала, которые во взаимодействии с первоначально образованными веществами

вызывают новые химические процессы. К этим процессам можно отнести, например, магниальное расширение.

В присутствии определенного количества воды (максимально при относительной влажности воздуха порядка 50%) активно протекает процесс карбонизации - реакции углекислого газа CO_2 с гидратом окиси кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и образования растворимой соли кальция и дополнительного количества воды. Растворимые соли затем вымываются из основного материала. Это явление еще называют карбонизационной усадкой.

В некоторых случаях под действием связанной воды в более позднее время могут возникать сульфатное и гипсовое расширение. Эти реакции, изменяющие объем элемента, зависят только от взаимно реагирующих веществ, независимо от того, в каком объекте, элементе конструкции они находятся, т.е. в бетонном элементе, кирпичной или каменной кладке, штукатурном слое и т.д. Точно так же при коррозии металла могут произойти значительные изменения объема (возможно трехкратное увеличение) продуктов коррозии. Доказательством этому служат такие нарушения, как вздутие покрытий на металлических конструкциях, трещинообразование в защитном слое бетона около арматуры.

Процессы, возникающие при объемных деформациях, вызванных увлажнением, высыханием элементов конструкции, а также химическими взаимодействиями, в данной работе детально не рассматриваются. Это связано с тем, что характер протекающих процессов, степень и величина воздействия конкретны для каждого объекта, и дать какие-либо рекомендации на стадии проектирования не представляется возможным. Они упоминаются для того, чтобы при проектировании иметь представление об этих причинах деформаций, учесть их последствия, а также для выяснения причин разрушения конструкций.

Влияние колебаний температуры на изменение объема конструкции

Как известно, тепловые объемные изменения габаритных размеров конструкции являются основными и наиболее существенными причинами деформаций как сооружения в целом, так и его отдельных элементов.

Всякое однородное тело изменяет свой объем пропорционально изменению воздействующей на него температуры. До статочно точно величину объемных и линейных изменений размеров элементов можно определить из выражения:

$$\Delta L = L_{\text{уст}} \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad (9)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (10)$$

где: ΔL - относительное удлинение или сокращение элемента;

$L_{\text{уст}}$ - длина элемента на момент возведения или монтажа;

α - коэффициент теплового линейного расширения;

Δt - изменение температуры элемента;

t_1 - "рабочая" температура, т.е. температура окружающей среды во время возведения или монтажа элемента;

t_2 - максимальная и минимальная температура, воздействию которой может подвергнуться элемент как в летний, так и в зимний период.

Для корректной оценки величины тепловых деформаций, необходимо знать и использовать точные величины, подставляемые в уравнение (9).

Прежде всего это длина строительного элемента. Она характеризуется протяженностью деформирующихся участков конструкции, разделенных деформационными швами и не имеющих между собой "силового" замыкания. Эта длина устанавливается в зависимости от величины

возможного перемещения элемента, характера ожидаемой деформации, величины воспринимаемых напряжений и возможного конструктивного решения обустройства шва.

Проектная длина деформирующегося участка конструкции должна уменьшаться, если элемент подвержен значительным тепловым воздействиям. Ограничение длины деформирующихся участков зависит также от величины коэффициента теплового линейного расширения строительного материала. Помимо величины градиента температур и значения коэффициента теплового линейного расширения длину деформирующегося участка определяет величина его нагружения, т.е.

степень свободы деформации, взаимосвязь и взаимозависимость сопрягаемых элементов как между собой, так и с окружающей средой. Нормируемые значения длины деформирующихся участков - расстояния между деформационными швами при тепловом воздействии представлены ниже.

Коэффициент теплового линейного расширения - известная, хорошо исследованная величина, характеризующая конкретный, совершенно определенный материал. Значения этих коэффициентов для основных строительных материалов представлены в табл. 8.

Приведенные величины коэффициентов теплового линейного расширения (а) соответствуют нормируемому диапазону рабочих температур для данного материала.

Таблица 8
Коэффициенты теплового линейного расширения основных строительных материалов

Материал	Коэффициент теплового линейного расширения α , град ⁻¹ (мм/м ² С)
Кирпичная кладка	0,000005
Каменная кладка	0,000008
Мрамор	0,000005 - 0,000007
Песчаник	0,000008
Гранит	0,0000053 - 0,0000077
Стекло	0,000008
Известковый раствор	0,000009
Цементный раствор	0,000010
Неармированный бетон	0,000010
Железобетон	0,000012
Высококачественный железобетон	0,000015
Чугун	0,000010
Сталь	0,000012
Медь	0,000017
Латунь	0,000019
Алюминий	0,000029
Эпоксидные смолы	0,000020
Эпоксидные смолы с наполнителем	до 0,000010
Битум	0,000030
Поливинилхлорид	0,00005 - 0,00008
Полистирол	0,00008
Полиуретан	0,00012
Полиэтилен	0,00022

Для вычисления величины теплового удлинения необходимо определить еще одну, переменную величину - перепад температур Δt , действию которого подвергается элемент (10). Значение t - температуры укладки или монтажа элемента - задается и/или определяется весьма просто. Для более точного определения температуры t_2 необходимо выяснить тепловое состояние сооружения или элемента в конкретный период эксплуатации при различных внешних условиях. Достаточно легко эту температуру можно определить с помощью диаграммы R -1 (рис. 5). Точное определение температурных колебаний в ограждающих конструкциях сооружений следует проводить в каждом конкретном случае для каждого элемента.

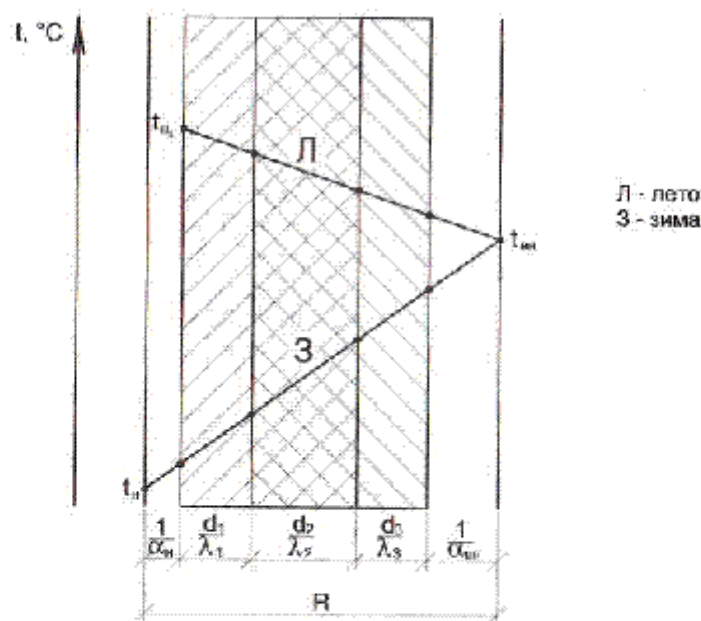


Рис. 5. Определение температур слоев конструкции по диаграмме R-t.

$t_{вн}$ - температура наружной поверхности конструкции летом;
 $t_{вн}$ - температура наружного воздуха зимой;
 $t_{вн}$ - температура внутри помещения;
 R - термическое сопротивление конструкции;
 $\alpha_{вн}$ - коэффициент теплоотдачи наружной поверхности;
 $\alpha_{вн}$ - коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности;
 d - толщина i -го слоя;
 λ - коэффициент теплопроводности i -го слоя.

Влияние эффекта ползучести бетона

Существует еще один вид усадки бетона, который сочетается и может происходить одновременно с другими видами усадки, - это пластическая усадка под нагрузкой или ползучесть.

Под ползучестью бетона конструкций понимают его способность деформироваться во времени при длительном действии постоянной нагрузки, в том числе и от собственного веса. Физическая природа явления ползучести недостаточно изучена, но считают [2], что пластические деформации ползучести обуславливаются пластическими свойствами цементного камня и изменением состояния основной составляющей бетона. Деформации ползучести наиболее заметно развиваются в начальный период после приложения нагрузки и постепенно затухают. Однако они наблюдаются у бетонов и в возрасте 5-6 и более лет.

Полная деформация ползучести может значительно превосходить деформации, получаемые бетоном в момент нагружения, иногда превышая их вдвое [1].

Ползучесть бетона зависит от еще большего числа факторов, чем усадка, причем большинство факторов действует на деформации ползучести подобно их влиянию на деформации усадки. На ползучесть бетона влияют:

- расход и вид цемента;
- водоцементное отношение;
- вид и крупность заполнителя;
- степень уплотнения бетона;
- степень гидратации цемента к моменту приложения нагрузки;
- температура и влажность окружающей среды и бетона;
- размеры конструкции;
- величина напряжений в бетоне.

Хотя явление ползучести исследовано недостаточно полно, существует множество эмпирических

зависимостей для расчета мгновенных деформаций и ползучести. Так, согласно рекомендациям [3], можно определить величину ползучести бетона на любой момент времени, а также рассчитать характеристику ползучести, которые в последствии используются при определении напряжений, возникающих в бетонных и железобетонных конструкциях.

В работах [1,2] вводится понятие удельной ползучести, выраженной в относительных единицах длины в расчете на единицу нагрузки. Другими словами, речь идет об отношении ползучести к возникшему напряжению. При этом ползучесть бетона оценивается характеристикой ползучести φ , определяемой при приложении единичной нагрузки σ [2]:

$$\varphi = \varepsilon_s(\infty) \sigma \quad (11)$$

где: $\varepsilon_s(\infty)$ - полная деформация ползучести.

Достаточно точно характеристика ползучести элемента конструкции φ_k определяется по выражению:

$$\varphi_k = \varphi_0 \cdot \xi_{m1} \cdot \xi_{m2} \cdot \xi_{m3} \cdot \xi_{m4} \cdot \xi_{m5} \quad (12)$$

где: φ_0 - исходная характеристика ползучести, принимаемая равной для бетона на обычном портландцементе без ускорителей твердения $15,2 \cdot 10^{-7}$ и для бетона на высокопрочном цементе $10,2 \cdot 10^{-7}$ см²/Н;

ξ_{m1} - безразмерные поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно влияние времени приложения нагрузки, В/Ц, расход цемента, размеры сечения образца, фактическую влажность воздуха.

Приводимые на рис. 6 графики изменения коэффициентов ξ_{m1} наглядно показывают влияние различных факторов на деформации ползучести обычного тяжелого бетона.

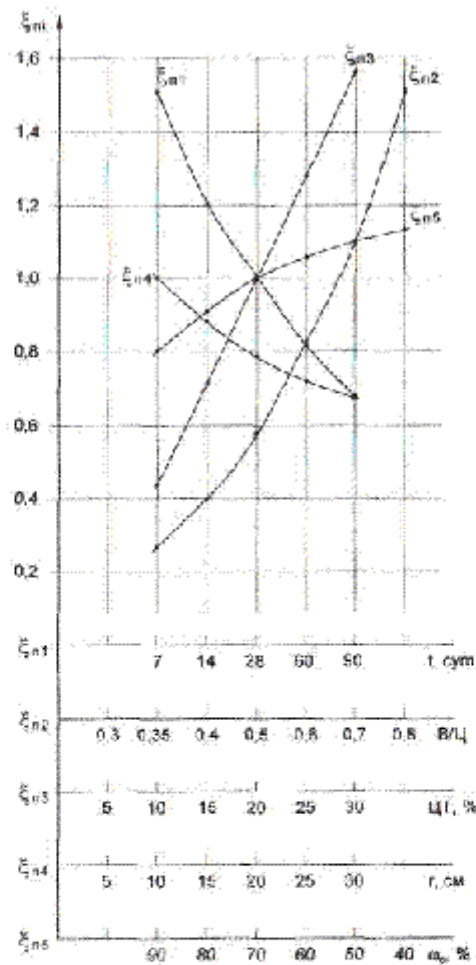


Рис. 6. Значения безразмерных поправочных коэффициентов ξ_{ni} при определении ползучести бетона.

- ξ_{n1} - коэффициент, учитывающий время приложения нагрузки;
- ξ_{n2} - коэффициент, учитывающий водоцементное соотношение;
- ξ_{n3} - коэффициент, учитывающий содержание цементного теста;
- ξ_{n4} - коэффициент, учитывающий приведенный размер образца;
- ξ_{n5} - коэффициент, учитывающий относительную влажность воздуха;
- t - время приложения нагрузки;
- B/C - водоцементное отношение;
- ЦТ - содержание цементного теста;
- r - приведенный размер образца;
- ω - относительная влажность воздуха.

Аналогичный графоаналитический метод определения фактической величины ползучести приведен в работе [1]. При ускоренных расчетах в качестве гипотезы принимают, что мгновенная деформация бетона ϵ пропорциональна приложенной нагрузке σ , а ползучесть вдвое превышает значение мгновенной деформации. При этом мгновенный модуль упругости вычисляется по формуле:

$$E_b = 21000\sqrt{\sigma_b} \quad (13)$$

где: σ_b - проектная прочность бетона на сжатие (кгс/см²).

Соответственно, относительная мгновенная деформация равна:

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_b} \quad (14)$$

тогда относительная ползучесть будет равняться:

$$\varepsilon_n = 2 \cdot \varepsilon_b \quad (15)$$

Для более точной оценки величины относительной ползучести следует воспользоваться выражениями:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_b \cdot k_n \cdot \xi,$$

причем

$$k_n = k_{no} \cdot k_{nt} \cdot k_{nw},$$

т.е.

$$\varepsilon_n = \varepsilon_b \cdot k_{no} \cdot k_{nt} \cdot k_{nw} \cdot \xi \quad (16)$$

где: ε_n - конечная относительная ползучесть;

ε_b - мгновенная упругая относительная деформация [см. (14)];

k_{no} - коэффициент, учитывающий климатические условия;

k_{nt} - коэффициент, учитывающий размеры конструкции [как и при явлении усадки (6)];

k_{nw} - коэффициент, учитывающий расход цемента и воды;

ξ - коэффициент возраста нагружения.

Указанные коэффициенты принимаются по графикам на рис. 7.

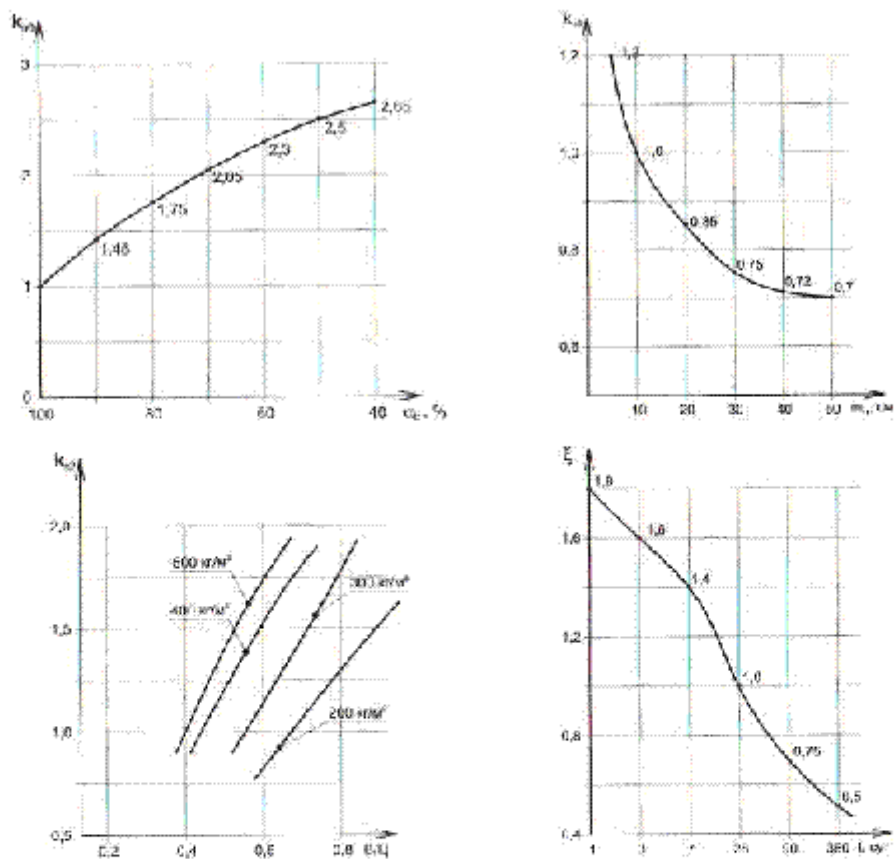


Рис. 7. Величины безразмерных коэффициентов при определении ползучести бетонных конструкций.

- k_{RH} - коэффициент, учитывающий относительную влажность воздуха;
- k_{sp} - коэффициент, учитывающий размеры конструкции;
- $k_{w/c}$ - коэффициент, учитывающий водоцементное соотношение бетона;
- ξ - коэффициент, учитывающий время нагружения конструкции;
- m - относительная влажность воздуха;
- m - условная толщина конструкции;
- W/C - водоцементное соотношение;
- t - время нагружения конструкции.

Ползучесть бетона является убывающей во времени величиной. После быстрой деформации в первые часы после нагружения, она затем замедляется. Например, по данным работы [15], уже через 100 дней (около 3 месяцев) реализуется около 50% ожидаемых деформаций ползучести. Поэтому при расчетах учитывают два периода реализации ползучести бетона. В первом приближении можно считать, что за период от 3 суток до 2 лет она изменяется как натуральный логарифм времени (сут.). Эта зависимость имеет место лишь при условии, что приложенная нагрузка значительно меньше (примерно на 50%) предельного разрушающего значения.

Ползучесть бетона реализуется чрезвычайно долго, и неизвестно еще, имеет ли она предел, хотя утверждается [1], что предел ползучести наступает примерно через 5-6 лет. Если принять, что по прошествии 5-6 лет, т.е. примерно 2000 дней, ползучесть реализуется полностью, то отношение ползучести в данный момент времени $\epsilon(t)$ к конечной величине $\epsilon(\infty)$ можно представить в виде графика, приведенного на рис. 8.

В заключение следует отметить, что относительная деформация ползучести имеет векторный характер, т.е. зависит от направления приложенной нагрузки. Ползучесть наблюдается не только при одноосном сжатии, но и при любых других воздействиях - изгибе, растяжении, кручении и т.д.

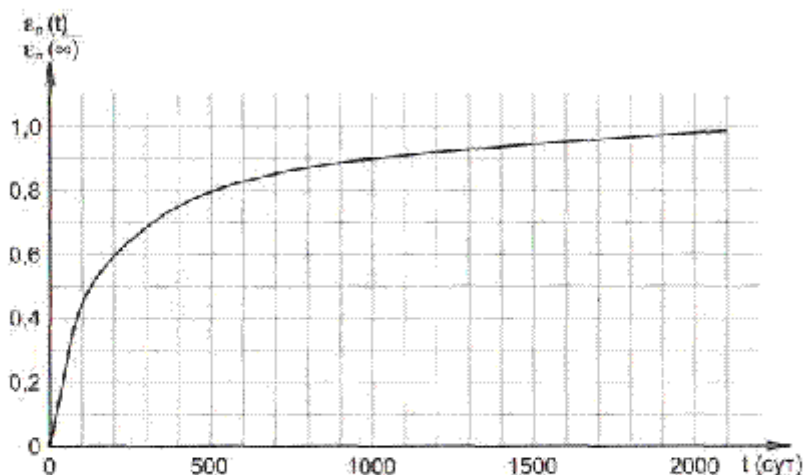


Рис. 8. График зависимости относительного значения ползучести от времени.

$\epsilon_p(t)$ - деформация ползучести бетона на данный момент времени;
 $\epsilon_p(\infty)$ - предельная величина деформации ползучести бетона.

Наблюдается также ползучесть и в двух- и трехосном напряженном состоянии конструкции, но ее оценка при таких условиях практически не изучена. Однако знать и учитывать величины этих деформаций ползучести при проектировании деформационных швов бывает необходимо.

Для объективной оценки значения ползучести необходимы точные данные по значениям коэффициента Пуассона (ν), выражающего отношение поперечной деформации к продольной. Например, в случае нагружения бетонной конструкции при одноосном сжатии это отношение достигает величины ($\nu = 0,15$, но фактически этот коэффициент может изменяться в зависимости от множества параметров. При оценочных расчетах можно пользоваться приведенным значением.

ОБЩАЯ ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗОК

Как было показано, причины, определяющие деформируемость конструкции и, как следствие, деформации отдельного элемента, можно разделить на кратковременные и циклические. Основными причинами кратковременных деформаций являются деформации усадки и ползучести бетона. Основными причинами циклических деформаций являются тепловые изменения объема конструкции. Под воздействием этих причин в конструкциях могут возникать трещины, сколы, прогибы и т.д. Для восприятия возникающих в конструкциях усилий формируются деформационные швы. В деформационных швах реализуются деформации элементов. Их можно разделить на искусственно сформированные или образовавшиеся произвольно.

Искусственно сформированные швы являются соединениями (жесткими или податливыми), препятствующими возникновению повреждений в данной конструкции или структуре элементов.

настоящей работе предметом анализа являются швы, способные воспринимать, уравнивать и компенсировать деформации и не допускать повреждений в сооружении или в его элементах. Такие температурные деформационные швы, сформированные искусственно, должны воспринимать как начальные изменения объема конструкции, так и долговременные циклические воздействия.

Для определения места расположения швов, их количества, размеров и конструктивных особенностей необходимо учесть влияние основных причин деформации на поведение сооружения в процессе его эксплуатации.

Взаимосвязь основных причин объемных деформаций конструкций

Деформации конструкции, как уже отмечалось выше, достаточно серьезны и могут привести к повреждениям. Они могут быть разделены на зависимые от нагрузки, вызванные нагружением сооружения или его элементов, и независимые, возникающие без воздействия нагрузки. В любом

случае в результате этих воздействий изменяется первоначальный строительный объем конструкции сооружения, причем во всех измерениях. В большинстве случаев достаточно рассмотреть и определить деформации только в одном или двух направлениях, но в общем случае следует рассматривать деформативность конструкции во всех трех измерениях.

Мерой деформации является относительное удлинение:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_{\text{исх}}} \quad (17)$$

где: ΔL - изменение длины рассчитываемой конструкции;
 $L_{\text{исх}}$ - первоначальная длина конструкции или элемента.

Понятие "удлинение" включает в себя как собственно удлинение, так и укорочение конструкции, поэтому употребляется с соответствующим знаком, причем "+" обозначает удлинение, а "-" - укорочение. Так как $\Delta L \ll L$, то для количественной оценки удлинения обычно используется размерность -мм/м, т.е. степень изменения длины конструкции в мм на один метр длины.

Как уже показано ранее, встречающиеся удлинения в железобетонных конструкциях можно подразделить на собственно упругие удлинения - $\varepsilon_{\text{уп}}$; удлинения, связанные с ползучестью - $\varepsilon_{\text{п}}$; тепловые удлинения - $\varepsilon_{\text{т}}$; удлинения от усадки - $\varepsilon_{\text{у}}$; удлинения, зависящие от влажностного состояния конструкции - $\varepsilon_{\text{вУ}}$ и удлинения, связанные с химическими превращениями в материале конструкции - $\varepsilon_{\text{х}}$.

Общее удлинение конструкции $\varepsilon_{\text{об}}$ можно получить, если сложить отдельные составляющие удлинения конструкции (мм/м):

$$\varepsilon_{\text{об}} = \varepsilon_{\text{уп}} + \varepsilon_{\text{п}} + \varepsilon_{\text{т}} + \varepsilon_{\text{у}} + \varepsilon_{\text{вУ}} + \varepsilon_{\text{х}} \quad (18)$$

Тогда общее абсолютное удлинение ΔL (м) можно вычислить по формуле:

$$\Delta L = \varepsilon_{\text{об}} \cdot L \quad (19)$$

При этом следует обратить внимание на следующее. Во-первых, общее удлинение $\varepsilon_{\text{об}}$ и абсолютное удлинение ΔL конструкции не является однажды достигнутой и тем самым постоянной величиной. За исключением упругого удлинения $\varepsilon_{\text{уп}}$, все другие составляющие общего удлинения зависят от времени.

Во-вторых, при оценке вклада каждой из составляющих общего удлинения нужно учитывать в требуемых случаях векторный характер этого удлинения.

Далее речь пойдет в основном о тепловом $\varepsilon_{\text{т}}$, усадочном $\varepsilon_{\text{у}}$, удлинениях от ползучести $\varepsilon_{\text{п}}$ и их сочетании. Это допущение основано на том, что упругие удлинения $\varepsilon_{\text{уп}}$ достаточно хорошо изучены и учтены в соответствующих нормативных документах. Удлинения от воздействия физико-химических процессов и явлений практически не поддаются прогнозной оценке, и их надо учитывать при проектировании конструкции за счет вводимых коэффициентов запаса надежности деформационного шва. Под термином "коэффициент запаса надежности деформационного шва" - $K_{\text{дш}}$ следует понимать значение отношения максимально возможной величины перемещений, ΔL_{max} , воспринимаемых без повреждений элементами конструкции деформационного шва к расчетной величине деформаций :

$$K_{\text{шв}} = \frac{\Delta L_{\text{max}}}{\Delta L_f}$$

Исходной во времени точкой для всех оценочных расчетов служит время возведения сооружения и его конструкций или время, с которого два элемента сооружения замыкают деформационным швом.

В общем виде изменение длины конструкции вследствие теплового растяжения при нагревании или теплового сжатия при охлаждении, начиная с этого момента времени, может быть описано графически, как показано на рис. 9 (кривые 1). На рисунке представлены четыре различных варианта ожидаемой деформируемости конструкции в зависимости от времени года, когда она возведена или установлена.

Уменьшение размеров конструкции вследствие собственно усадки бетона иллюстрируют кривые 2. Суммарная деформация конструкции (изменение ее длины) представлена кривыми 3. Анализируя приведенные зависимости, нетрудно заметить, что в процессе эксплуатации конструкция будет испытывать циклические изменения длины (сжатие и растяжение), накладывающиеся на общую уменьшающуюся длину конструкции, вследствие усадки железобетона.

Вместе с тем ось симметрии циклических тепловых деформаций при эксплуатации значительно смещается относительно установочного размера деформационного шва в конструкции в зависимости от времени года, когда она возведена. Кроме того, при расчете амплитуды тепловых деформаций по выражениям (9) и (10) приходится каждый раз учитывать исходную температуру. Это положение вносит в процесс проектирования и оценки состояния конструкции ряд неудобств.

Практически любая сложная конструкция имеет не один деформационный шов, причем швы устраиваются в разное время и при разной температуре установки. Для оценки общей деформативности конструкции при эксплуатации приходится каждый раз проводить соответствующую корректировку. Кроме того, как видно из графиков рис. 9, средняя длина элемента конструкции, на которую "накладываются" тепловые деформации, не соответствует размеру конструкции при установке или возведении.

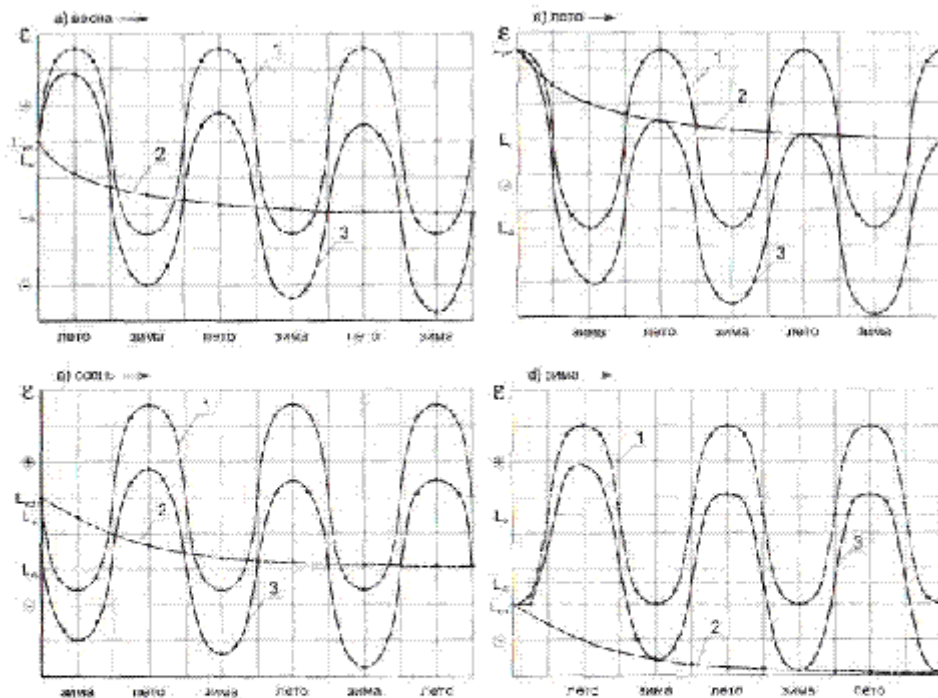


Рис. 9. Взаимодействие тепловой ϵ_t и усадочной $\epsilon_{\text{ус}}$ деформаций бетонной конструкции при эксплуатации.

ϵ - относительная деформация конструкции;

1 - тепловая деформация;

2 - деформация усадки;

3 - суммарная деформация;

$L_{\text{пов}}$ - длина элемента бетонной конструкции при возведении или установке;

L_0 - длина элемента бетонной конструкции при 0°C ;

$L_{\text{ус}}$ - длина элемента бетонной конструкции после полной реализации деформаций усадки бетона.

Кроме того, как видно из графиков рис. 9, средняя длина элемента конструкции, на которую "накладываются" тепловые деформации, не соответствует размеру конструкции при установке или возведении.

Для того чтобы учесть это, следует вновь обратиться к выражениям (9) и (10), только ввести дополнительное условие, что в качестве основной расчетной длины элемента конструкции принимается средняя длина элемента при 0°C - L_0 , на которую фактически "накладываются" тепловые деформации.

При этом установочная длина элемента L соответствует средней длине L_g и "заложенному" изменению длины ΔL , зависящему от температуры установки:

$$I_{y_{\text{уст}}} = L_o + \Delta L_o \quad (20)$$

откуда

$$L_o = L_{y_{\text{уст}}} - \Delta L_o \quad (21)$$

Согласно выражениям (9) и (10):

$$\Delta L_o = L_{y_{\text{уст}}} \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad (22)$$

причем $\Delta t = t_f = t_{y_{\text{уст}}}$, т.к. $t_o = 0^\circ\text{C}$.

В результате, используя выражение (21) и учитывая (22), получим:

$$L_o = L_{y_{\text{уст}}} - L_{y_{\text{уст}}} \cdot \alpha \cdot t_{y_{\text{уст}}}$$

или

$$L_o = I_{y_{\text{уст}}} (1 - \alpha \cdot t_{y_{\text{уст}}}) \quad (23)$$

где: $L_{y_{\text{уст}}}$ - длина элемента конструкции при возведении или установке;

L_o - средняя длина элемента при 0°C ;

$t_{y_{\text{уст}}}$ - температура возведения или установки элемента;

α - коэффициент теплового линейного расширения.

Тогда фактическая длина элемента конструкции после

полной реализации деформаций усадки будет определяться как разница между средней длиной и удлинением от усадки ΔL_y :

$$L_\phi = L_o - \Delta L_y \quad (24)$$

где: согласно выражению (17):

$$\Delta L_y = I_{y_{\text{уст}}} \cdot \epsilon_y$$

тогда с учетом выражения (23)

$$L_\phi = I_{y_{\text{уст}}} (1 - \alpha \cdot t_{y_{\text{уст}}} - \epsilon_y) \quad (25)$$

где: L_ϕ - фактическая длина элемента конструкции после полной реализации деформации усадки.

Выражение (25) включает величину ϵ_y , которая, как показано в предыдущем разделе, зависит от времени, т.е. продолжительности эксплуатации, поэтому в общем виде:

$$L_\phi = I_{y_{\text{уст}}} [1 - \alpha \cdot t_{y_{\text{уст}}} - \epsilon_y(t)] \quad (26)$$

Величину $\epsilon_y(t)$ для любого момента времени можно определить из выражения (3) или по

зависимостям (7) и (8) и графикам на рис. 3 и 4.

На рис. 9 представлена графическая иллюстрация этих изменений в конструкции при разном времени начала эксплуатации, причем для наглядности за t_m при начале строительства весной и осенью принят 0°C .

Помимо внешних и внутренних воздействий без нагрузки любая конструкция, а подземная особенно, подвергается действию длительных статических нагрузок.

Как уже было отмечено, через некоторое время после нагружения, например после обратной засыпки подземного сооружения, возводимого открытым способом, реализуется постоянная упругая деформация, не изменяющаяся во времени.

Значение этой деформации зависит только от величины приложенной нагрузки. К этой упругой деформации добавляется постепенно возрастающая деформация ползучести. В процессе эксплуатации эти виды деформаций суммируются с деформациями собственно усадки, причем они складываются при сжатии, и напротив, компенсируются при растяжении конструкции. Пример такого совместного воздействия на конструкцию, для случая одноосного сжатия, приведен на рис. 10. В приведенном примере предполагается, что приложенная нагрузка не превышает половины разрушающей нагрузки.

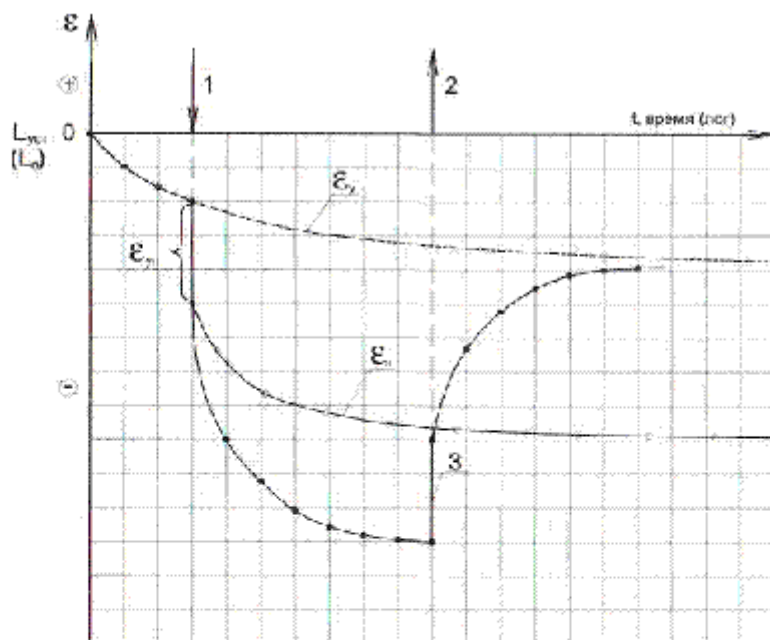


Рис. 10. Схема деформаций конструкции при одноосном сжатии.

- ε - относительная деформация конструкции;
- 1 - нагружение;
- 2 - снятие нагружения;
- ε_u - мгновенная деформация усадки при нагружении;
- ε_b - деформация усадки бетона;
- ε_p - деформация ползучести;
- 3 - кривая суммарной деформации конструкции;
- $L_{0(0)}$ - длина элемента бетонной конструкции при возведении;
- L_0 - длина элемента бетонной конструкции при 0°C .

Схемы, приведенные на рис. 9 и 10, дают наглядную качественную оценку выражения (18) при совместном попарном воздействии двух рассматриваемых причин объемных деформаций конструкции. Совместное воздействие всех трех рассматриваемых причин объемных деформаций с учетом мгновенной упругой деформации представлено на рис. 11. В приводимых примерах

предполагается, что приложенная нагрузка осесимметрична и действует постоянно.

Анализируя представленные данные, нетрудно заметить, что рассматриваемые деформации конструкции только изменяют ее фактическую длину, не оказывая какого-либо влияния на характер и величину тепловых деформаций.

С учетом векторного характера приложения статической нагрузки, а также зависимостей (17), (18) и (26) в общем виде получаем действительную среднюю длину конструкции:

$$L_d = L_{\text{теп}} [1 - \alpha \cdot t_{\text{теп}} - \varepsilon(t)] \pm L_{\text{гн}} \cdot \varepsilon_{\text{гн}} \pm L_{\text{акт}} \cdot \varepsilon_{\text{а}}(t) \quad (27)$$

а с учетом несоосности осей нагружения и рассматриваемой длины конструкции:

$$L_d = L_{\text{теп}} [1 - \alpha \cdot t_{\text{теп}} - \varepsilon(t) \pm \mu \cdot \varepsilon_{\text{гн}} \pm \mu \cdot \varepsilon_{\text{а}}(t)] \quad (28)$$

где: L_d - действительная средняя длина конструкции при эксплуатации после полной реализации процессов усадки и нагружения;

μ - коэффициент Пуассона для железобетона ($\mu \sim 0,15$).

Выражение (28) описывает деформативность конструкции при однократных или одноразовых воздействиях с учетом условий ее возведения.

Используя в качестве исходной информации характеристики применяемого бетона, температуру возведения конструкции и ожидаемую нагрузку, еще на стадии проектирования по выражению (28) можно оценить действительную длину рассчитываемого элемента конструкции.

Полученные данные должны в дальнейшем использоваться при проектировании деформационных швов.

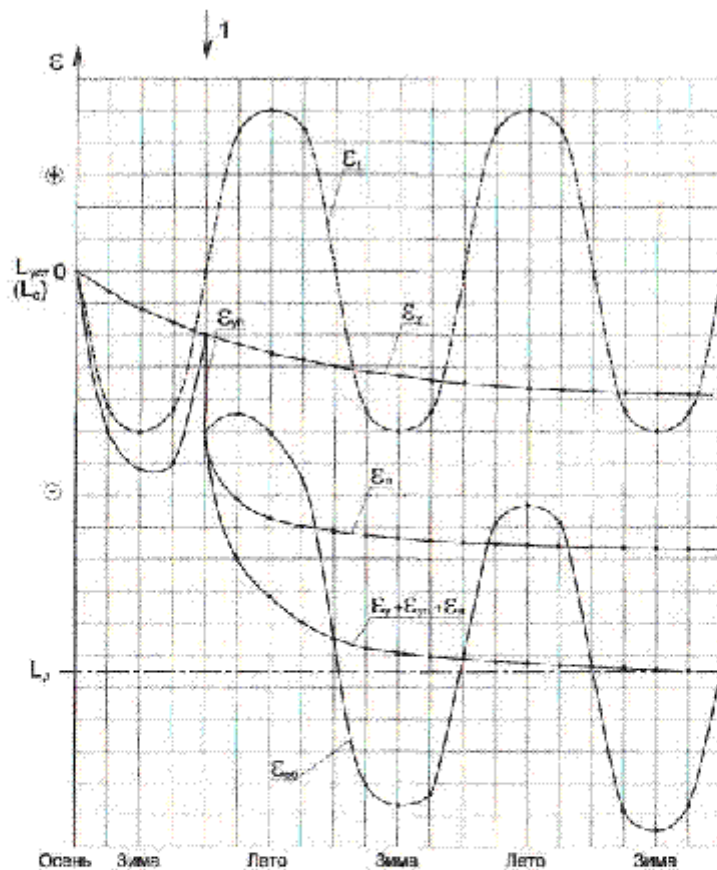


Рис. 11. Общая деформативность элемента сооружения при эксплуатации.

- ϵ - относительная деформация конструкции;
- T - нагрузка конструкции;
- $\epsilon_{и}$ - мгновенная деформация усадки при нагружении;
- $\epsilon_{с}$ - деформация усадки бетона;
- $\epsilon_{кр}$ - деформация ползучести;
- ϵ_t - тепловая деформация;
- $\epsilon_{с+кр+и}$ - общая деформация конструкции при эксплуатации;
- L_0 - длина элемента бетонной конструкции при возведении;
- L_0^0 - длина элемента бетонной конструкции при 0 °С;
- $L_{с}$ - длина элемента бетонной конструкции после полной реализации деформаций усадки и ползучести бетона.

Основные элементы конструкции деформационного шва

В общем виде деформационный шов представляет собой специально сформированный зазор между двумя или более сопрягаемыми элементами конструкции, который загерметизирован в соответствии с требованиями эксплуатации. Схема деформационного шва представлена на рис. 12. Основным элементом любого деформационного шва - рабочий зазор деформационного шва величиной W , далее по тексту - зазор шва, в котором при эксплуатации реализуются деформации сопрягаемых элементов конструкции длиной L и L_2 . Кроме того, в конструкции деформационного шва различают его протяженность и форму, а также внутренние боковые поверхности шва и кромки шва. Уплотнительный элемент деформационного шва характеризуется таким параметром, как глубина заполнения d , значение которого играет важную роль при использовании мастик и герметиков.

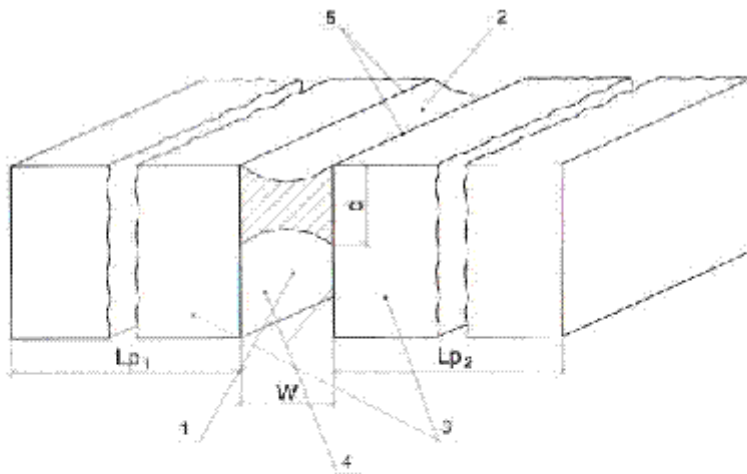


Рис. 12. Основные элементы конструкции деформационного шва.

- W - величина зазора деформационного шва;
- d - толщина уплотнительного элемента;
- Lp_1, Lp_2 - длина сопрягаемых элементов конструкции;
- 1 - зазор деформационного шва;
- 2 - уплотнительный элемент деформационного шва;
- 3 - сопрягаемые элементы конструкции;
- 4 - внутренние боковые поверхности шва;
- 5 - кромки шва.

Помимо длины сопрягаемые элементы имеют соответствующую толщину, иногда весьма значительную, и за счет разности температур на наружной и внутренней поверхностях могут испытывать деформации изгиба и кручения, которые реализуются в зазоре шва и т.д.

Для того чтобы подробно охарактеризовать все виды деформаций, которые реализуются в зазоре деформационного шва, необходимо рассмотреть и учесть три вида поступательного движения и три вида вращательного движения, как показано на рис. 13.

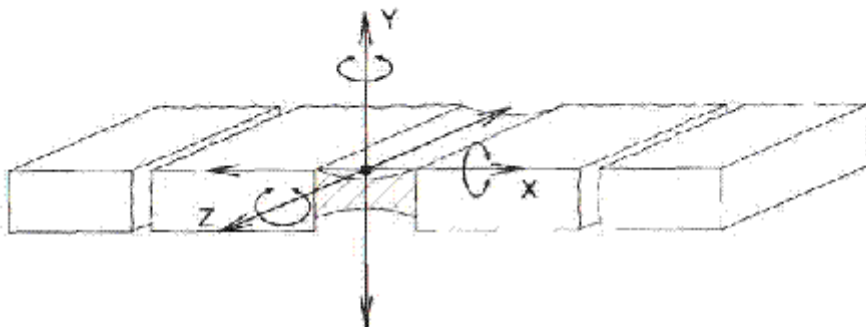


Рис. 13. Возможные смещения (деформации) в зазоре деформационного шва.

X, Y, Z - оси возможных деформаций конструкции.

В то же время, как показывает практика строительства и эксплуатации сооружений, в конструкции деформационных швов часто можно рассматривать и учитывать только поступательные движения. Тогда в сечении конструкции деформационного шва и его перемещения при эксплуатации можно представить в виде, представленном на рис. 14.

Анализируя приведенную схему, можно отметить, что на абсолютную величину деформаций,

реализующихся в зазоре шва, в основном влияет длина сопрягаемых элементов или расстояние между деформационными швами.

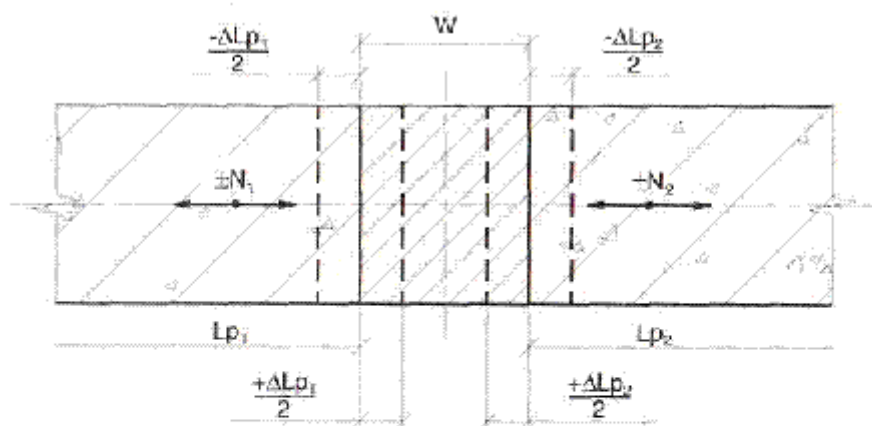


Рис. 14. Основные нагрузки и деформации в зазоре шва.

W - величина зазора деформационного шва;

L_{p1}, L_{p2} - длина сопрягаемых элементов конструкции;

$\pm N_1, \pm N_2$ - нагрузки на сопрягаемые элементы конструкции;

$\pm \frac{\Delta L_{p1}}{2}, \pm \frac{\Delta L_{p2}}{2}$ - деформации сжатия и растяжения сопрягаемых элементов конструкции.

С целью уменьшения этого влияния и предотвращения повреждений конструкции специально расчленяют на отдельные участки, разделенные деформационными швами. Максимальная длина этих участков или максимальное расстояние между деформационными швами регламентировано и приводится в соответствующей нормативно-технической документации. Эти расстояния в зависимости от типа применяемого строительного материала, вида сопрягаемых строительных элементов, условий эксплуатации и т.п. приведены в табл. 9 [5].

Указанные в табл. 9 величины являются максимально допустимыми для расстояний между деформационными швами, воспринимающими в основном циклические воздействия от изменения температуры. В случае, когда конструкция подвержена иным нежелательным воздействиям, указанные расстояния должны быть уменьшены, а возможные деформации учтены при расчете шва.

Таблица 9
Максимальные расстояния между температурно-деформационными швами

Вид сооружения или конструкции	Расстояние между деформационными швами (м) в конструкциях	
	подвергающихся атмосферному воздействию	не подвергающихся атмосферному воздействию или подземных
1. Сборные конструкции из бетона	30	40
2. Сборно-железобетонные каркасные конструкции и предварительно напряженные панельные конструкции	40	60
3. Сборно-железобетонные плоские конструкции, сборные и монолитные каркасные конструкции с предварительным напряжением	30	50
4. Монолитные конструкции из неармированного бетона	10	20
5. Монолитные конструкции из железобетона	20	30
6. Монолитные железобетонные плоские конструкции и предварительно напряженные объемные конструкции из плоских элементов	25	40
7. Подпорные стенки, стены, водяные и отстойные резервуары, бассейны, градирни: • неармированные; • армированные	9 18	12 24
8. Парапетные стенки: • неармированные; • армированные		3 6
9. Бетонная подготовка: • неармированная; • армированная		от 1,5 до 6 от 3 до 9
10. Цокольная кладка		3
11. Кладка из сплошного или пустотелого кирпича в стальных/неоштальных конструкциях		80/40
12. Кладка из кирпичных блоков или облегченных бетонов в стальных/неоштальных конструкциях		80/40
13. Кладка из облегченных бетонных блоков и пустотелых блоков в стальных/неоштальных конструкциях		36/18

Аналогично максимально допустимым расстояниям между деформационными швами регламентируется и величина основного элемента деформационного шва - зазора шва W (рис. 12).

Необходимая величина рабочего зазора шва при эксплуатации напрямую зависит от расстояния между деформационными швами, поэтому величину зазора шва выражают в виде /отношения между ними, как указано в табл. 10 [5].

Таблица 10

Ширина деформационных швов в железобетонных,
бетонных и каменных конструкциях

Тип конструкции	Элементы конструкции	Минимальная величина зазора шва по отношению к расстоянию между ними
Железобетонные и бетонные	Наружные стены, конструкция покрытия с теплоизоляцией	1/1500
	Конструкция покрытия без теплоизоляции	1/1000
	Резервуары для воды, отстойники	1/300
	Паралеты и ограждения	1/300
	Подземные сооружения	1/1000
Бетонная подготовка покрытия	Бетон потков, покрытия	1/300
	Бетонная подготовка внутри здания	1/250
Кладка при атмосферном воздействии/ без атмосферного воздействия	Кирпичная	1/2500 / 1/5000
	Блочная	1/1500 / 1/3000

Однако такой весьма удобный и простой подход для определения величины зазора швов не позволяет с необходимой точностью оценить рассматриваемую ситуацию.

Теоретически величина зазора деформационных швов обусловлена свободным движением обеих разделенных частей конструкции. Для более точного и достоверного расчета величины зазора деформационных швов необходимо знать и учитывать максимальный перепад температур в оцениваемом годовом цикле со дня возведения конструкции, ее тип (отапливаемая или неотапливаемая), возможность возникновения экстремальных ситуаций (например, пожар), коэффициенты теплового линейного расширения применяемых строительных материалов, степень усадки бетона или кирпичной кладки в процессе твердения, проектное расстояние между деформационными швами, ожидаемую статическую нагрузку, степень эластичности уплотнительного элемента и многие другие факторы. Все эти факторы необходимо учитывать при проектировании, особенно у конструкций, чувствительных к деформации.

Кроме того, обустройство, устанавливаемый при возведении конструкции зазор деформационного шва $W_{ст}$ в первые годы эксплуатации претерпевает существенные изменения в соответствии с изменениями установочной, т.е. выполняемой при возведении конструкции, длины сопрягаемых элементов L .

При этом по аналогии с выражениями (20) и (21) установочная, т.е. выполняемая при обустройстве шва, величина зазора деформационного шва W будет соответствовать действительной (эксплуатационной) величине зазора шва $W_{эксп}$ и изменению величины зазора шва $\Delta W_{ст}$ зависящему от рассматриваемых факторов и однократных воздействий:

$$W_{эксп} = W_{ст} + \Delta W_{ст} \quad (29)$$

и соответственно:

$$W_{ст} = W_{эксп} - \Delta W_{ст} \quad (30)$$

В выражении (30) параметр $W_{ст}$ не что иное, как указанная в конструкторской документации при проектировании и выполняемая при строительстве величина зазора деформационного шва. В результате, чтобы определить $W_{ст}$, требуется вычислить $\Delta W_{ст}$. Для этого можно воспользоваться

выражением (28):

$$L_d = L_{\text{уст}} [1 - \alpha t_{\text{уст}} - \varepsilon_c(t) \pm \mu \varepsilon_y \pm \mu \varepsilon_a(t)]$$

Проведем преобразования и представим его в виде:

$$L_d = L_{\text{уст}} + L_{\text{уст}} [-\alpha t_{\text{уст}} - \varepsilon_c(t) \pm \mu \varepsilon_y \pm \mu \varepsilon_a(t)] \quad (28')$$

Анализируя выражение (28'), нетрудно заметить, что второе слагаемое в правой части - изменение установочной, т.е. выполняемой при возведении, длины конструкции по отношению к действительной (эксплуатационной) длине элемента конструкции AL , т.е.:

$$\Delta L_d = L_{\text{уст}} [-\alpha t_{\text{уст}} - \varepsilon_c(t) \pm \mu \varepsilon_y \pm \mu \varepsilon_a(t)] \quad (31)$$

Для упрощения анализа предположим, что сопрягаемые элементы имеют одинаковые характеристики, установлены при одной температуре, а внешние воздействия на них одинаковы. При таких условиях изменение установочной, т.е. выполняемой при возведении, длины полностью реализуется в зазоре деформационного шва, т.е.:

$$\Delta L_d = \Delta W_d \quad (32)$$

тогда выражение (30) можно представить в виде:

$$W_d = W_{\text{уст}} + L_{\text{уст}} [\alpha t_{\text{уст}} + \varepsilon_c(t) \pm \mu \varepsilon_y \pm \mu \varepsilon_a(t)] \quad (33)$$

оценки влияния второго слагаемого в правой части выражения (33) на величину обустраиваемого зазора деформационного шва W_d проведем поверочный расчет.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Исходные данные:

- условный элемент подземной конструкции (стеновой блок из монолитного железобетона);
- длина сопрягаемых элементов конструкции $L_{\text{уст}} = 25$ м;
- сечение сопрягаемых элементов - $3,0 \times 0,25$ м;
- процент армирования бетона - 0,5%;
- расход цемента - 400 кг/м³;
- В/Ц бетонной смеси - 0,5;
- величина обустраиваемого зазора шва $W_{\text{уст}} = 25$ мм;
- температура возведения конструкции $t_{\text{уст}} = +15^\circ\text{C}$;

- относительная влажность воздуха при проведении работ $\omega_s = 70\%$;
- коэффициент теплового линейного расширения железобетона $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹;

- проектная прочность бетона на сжатие $R = 400$ кг/см²;
- сжимающая вертикальная статическая нагрузка $\sigma = 50$ кг/см²;
- "возраст" конструкции при нагружении $t = 90$ дней (3 мес.);
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,15$.

Постановка задачи:

- определить действительную величину зазора деформационного шва W_s через 1, 3 и 5 лет после начала эксплуатации.

Проведение расчета:

- вначале определим значение сжимаемого $\alpha \cdot t_{\text{сж}}$:

$$\alpha \cdot t_{\text{сж}} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1} \cdot 15^{\circ}\text{C} = 1,8 \cdot 10^{-4} (\text{м/м}) = 0,18 \text{ мм/м}$$

- величину $\epsilon_y(t)$ рассчитаем по выражению (6) и данным графиков на рис. 2 и 3:

$$k_{\text{сж}}(70\%) = 24,0 \cdot 10^{-3} = 2,4 \cdot 10^{-2} (\text{м/м})$$

$$m_s = \frac{25 \cdot 300}{25 + 300} = 20 \text{ см}$$

и по графику $k_{\text{сж}} = 0,65$;

$k_{\text{сж}}$ для В/Ц = 0,5 и расходе цемента 400 кг/м³ равно $k_{\text{сж}} = 1,2$.

Тогда максимальная усадка $\epsilon_s(\infty)$ равна:

$$\epsilon_s(\infty) = 2,4 \cdot 10^{-2} \cdot 0,65 \cdot 1,2 \cdot 0,95 = 1,8^{\cdot} (\text{м/м}) = 0,18 \text{ мм/м}$$

Через 1 год - $\epsilon_s(1) = 0,18 \cdot 0,83 = 0,15 \text{ мм/м}$

Через 3 года - $\epsilon_s(3) = 0,18 \cdot 0,95 = 0,17 \text{ мм/м}$

Через 5 лет - $\epsilon_s(5) = 0,18 \cdot 1,0 = 0,18 \text{ мм/м}$

Величину $\epsilon_{\text{сж}}$ вычислим, используя выражения (13) и (14):

$$\epsilon_{\text{сж}} = \frac{50}{21000 \cdot \sqrt{400}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м/м или}$$

$$\epsilon_{\text{сж}} = 0,12 \text{ мм/м}$$

Значения $\epsilon_y(t)$ с учетом рассчитанной величины $\epsilon_{\text{сж}}$ определим по выражению (16) и графикам на рис. 7 и 8:

$$k_{\text{сж}}(70\%) = 2,05;$$

$$k_{\text{сж}}(23) = 0,85;$$

$$k_{\text{сж}}(0,5) = 1,25;$$

$$\xi(90) = 0,75,$$

тогда $\epsilon_n(\infty)$ равно:

$$\epsilon_n(\infty) = 0,12 \cdot 2,05 \cdot 0,85 \cdot 1,25 \cdot 0,75 = 0,20 \text{ мм/м.}$$

С учетом продолжительности эксплуатации $\epsilon_n(t)$ равно:

$$\text{через 1 год} \quad - \epsilon_n(1) = 0,20 \cdot 0,73 \approx 0,15 \text{ мм/м}$$

$$\text{через 3 года} \quad - \epsilon_n(3) = 0,20 \cdot 0,90 \approx 0,18 \text{ мм/м}$$

$$\text{через 5 лет} \quad - \epsilon_n(5) = 0,20 \cdot 0,95 \approx 0,19 \text{ мм/м}$$

Если принять, что в данном случае усадка ползучести при сжатии складывается с собственно усадкой бетона и для учета направления ее воздействия можно использовать коэффициент Пуассона, тогда, подставив вычисленные значения в выражение (33), получим:

$$W_d(1) = 25 + 25 [0,18 + 0,15 + 0,15 \cdot 0,12 + 0,15 \cdot 0,15] = 34,3 \text{ мм}$$

$$W_d(3) = 25 + 25 [0,18 + 0,17 + 0,15 \cdot 0,12 + 0,15 \cdot 0,18] = 34,9 \text{ мм}$$

$$W_d(5) = 25 + 25 [0,18 + 0,18 + 0,15 \cdot 0,12 + 0,15 \cdot 0,19] = 35,2 \text{ мм.}$$

Вывод

Результаты расчета показывают, что действительная величина зазора деформационного шва W_d уже через год эксплуатации увеличится на 40% по отношению к установочному, т.е. выполненному при возведении конструкции, размеру W_{set} .

Такое столь существенное изменение зазора деформационного шва определяет необходимость еще на стадии проектирования выполнять аналогичные расчеты и вычислять действительную величину зазора шва при эксплуатации. Кроме того, решение по уплотнению деформационного шва должно приниматься с учетом изменившейся величины зазора шва, в котором будут компенсироваться циклические тепловые деформации.

При рассмотрении возможной деформативности сопрягаемых элементов конструкции предполагалось, что оба сопрягаемых элемента имеют одинаковую длину и выполнены из одного и того же материала. Однако в реальных условиях могут сопрягаться элементы из разных материалов и различной длины. Возможны четыре основных случая такого сопряжения:

- соединяемые элементы выполнены из разных материалов ($\alpha_1 \neq \alpha_2$) разной длины ($L_{p1} \neq L_{p2}$);
- соединяемые элементы выполнены из одинаковых материалов ($\alpha_1 = \alpha_2$) разной длины ($L_{p1} \neq L_{p2}$);
- соединяемые элементы выполнены из разных материалов ($\alpha_1 \neq \alpha_2$) одинаковой длины ($L_{p1} = L_{p2}$);
- соединяемые элементы выполнены из одинаковых материалов ($\alpha_1 = \alpha_2$) одинаковой длины ($L_{p1} = L_{p2}$).

При таких условиях относительную деформативность шва ΔW (рис. 14) можно определить по следующим выражениям:

$$1. L_{p1} \neq L_{p2}; \alpha_1 \neq \alpha_2, \text{ тогда } \Delta W = (\alpha_1 \cdot L_{p1} + \alpha_2 \cdot L_{p2}) \cdot \Delta t_p \quad (34)$$

$$2. L_{p1} \neq L_{p2}; \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha, \text{ тогда } \Delta W = (L_{p1} + L_{p2}) \cdot \alpha \cdot \Delta t_p \quad (35)$$

$$3. L_{p1} = L_{p2} = L_p; \alpha_1 \neq \alpha_2, \text{ тогда } \Delta W = (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot L_p \cdot \Delta t_p \quad (36)$$

$$4. L_{p1} = L_{p2} = L_p; \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha, \text{ тогда } \Delta W = 2\alpha \cdot L_p \cdot \Delta t_p \quad (37)$$

Эти выражения действительны для оценки относительных деформаций, воспринимаемых уплотнительным элементом деформационного шва в процессе эксплуатации при установленном значении тепловой нагрузки At .

Тепловая нагрузка и деформируемость элементов конструкции

Если при расчете тепловых деформаций исходить из основного уравнения (9), то относительное растяжение или сжатие элемента конструкции зависит прежде всего от переменной величины тепловой нагрузки At , т.е. от перепада температур: от температуры воздуха в момент укладки бетона или установки элемента, температуры t_1 или приведенной средней температуры t до температуры t_2 , действию которой подвержен элемент конструкции в процессе нагрева или охлаждения. Для точного определения в конкретных случаях величины At необходимо определить тепловое состояние конструкции и элемента как в летний, так и в зимний периоды при различных внешних условиях.

Правильное решение позволит определить максимальные и минимальные величины At с учетом производственной температуры внутри сооружения в течение годового цикла.

Как уже отмечалось, сооружения и их элементы подвержены воздействию тепловой нагрузки в течение годового цикла. При этом тепловая нагрузка равна разности максимальных положительных температур конструкции в летний период или минимальных отрицательных температур в зимний период и температуры на момент возведения конструкции, т.н. "рабочей" температуры. При определении максимальных и минимальных температур, воздействующих на конструкции, прежде всего следует исходить из величин, нормируемых СНиП 23-01-99 "Строительная климатология" [11] для климатических условий рассматриваемого района. В дальнейшем, с учетом места расположения и типа сооружения (наземное, подземное, заглубленное), возможных внешних климатических воздействий (солнечная радиация, скорость движения воздуха и т.д.) следует определить максимальные фактические температуры на наружной стороне ее элементов в рассматриваемом цикле и выполнить аналогичные расчеты для внутренней стороны с учетом температуры внутри сооружения.

Определенные таким образом максимальные значения температур используются для проведения анализа теплотехнического состояния по номограмме на рис. 5. Эти данные и являются исходными предельными значениями температуры эксплуатации конструкции t_2 для зоны

расположения шва.

Разность между этими величинами и средней температурой возведения конструкции, т.е. температурой, при которой длина конструкции соответствует $b(2b)$, определяет искомую тепловую нагрузку.

Значение "рабочей" температуры, т.е. температуры на момент возведения конструкции, не влияет на общий перепад температур, однако имеет важное значение для определения величины зазора деформационного шва и оценки величины растяжения и сжатия, реализующихся в зазоре шва при эксплуатации.

Выполненный таким образом теплотехнический расчет позволяет получить исходную информацию для последующего определения деформативности конструкции. Однако, поскольку ход изменения температур объема конструкций сооружения обусловлен не только структурой рассматриваемого сооружения, но и его внутренним и внешним тепловыми режимами эксплуатации, самостоятельный теплотехнический анализ необходимо выполнять для каждого сооружения.

Проведенный ранее детальный анализ воздействий, вызывающих изменения объема элементов, включал общий анализ деформаций в зависимости от хода изменения температуры. Однако все приведенные рассуждения справедливы для однослойных и многослойных изотропных, идеально упругих тел. Также подразумевалось, что собственная масса тела не учитывается и напряжений в элементе не вызывает. Оценка тепловых деформаций в этом случае выполняется по выражениям (9) и (10).

Если для свободной деформации элемента под воздействием тепловой нагрузки имеется препятствие, то действительны следующие отношения:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\sigma}{E} \quad (38)$$

$$\sigma = \Delta t_p \cdot E \cdot \alpha \quad (39)$$

$$N = \sigma \cdot A = \Delta t_p \cdot E \cdot \alpha \cdot A \quad (40)$$

где: E - модуль упругости элемента;

σ - напряжение, вызванное перепадом температур;

Δt_p - тепловая нагрузка;

N - величина действующих усилий от тепловой нагрузки;

$\frac{\Delta L}{L}$ - относительная деформация;

A - площадь сечения элемента.

Если рассматривать горизонтальный элемент, свободно лежащий на опорах, и учитывать влияние его собственного веса (M), то в элементе возникает напряжение, пропорциональное силе N' :

$$N' = M \cdot f \quad (41)$$

где: f - коэффициент трения; M - вес элемента конструкции.

При определении величины N' для конструкций любого подземного сооружения помимо их собственного веса M по Выражению (41), следует учитывать вес грунта, который находится над ним, и соответствующие коэффициенты трения.

Эффект от трения между деформируемыми элементами конструкции и окружающим массивом грунтов и пород обуславливает еще одно явление, реализующееся в зазоре деформационного шва. Это так называемый температурный "удар", который характеризуется резким скачком перемещений элементом конструкции.

Поясним это положение простейшим примером. Рассмотрим протяженное подземное сооружение, разделенное деформационными швами. Совершенно естественно, что такую конструкцию следует рассматривать как "защемленную", где действуют приведенные выше зависимости. Величину возникших горизонтальных сил N от тепловой нагрузки можно оценить по выражению (40). В то же время в рассматриваемой системе существуют горизонтальные силы N' , связанные с трением покоя между конструкцией и окружающим массивом, которые можно оценить по выражению (41).

Для того чтобы конструкция могла деформироваться, необходимо выполнение условия: $N > N'$

То есть до тех пор, пока величина возникших усилий от тепловой нагрузки не превысит сил трения, конструкция будет находиться в покое. В том случае, когда будет реализовано это условие, элементы конструкции придут в движение и конструкция будет деформироваться. Реализация деформаций будет происходить очень резко, практически мгновенно - величина зазора шва резко уменьшается при нагревании конструкции и резко расширяется при ее охлаждении. Такая ситуация требует прежде всего разработки специальных конструкций деформационных швов, а также подбора специальных материалов для уплотнительного элемента зазора деформационного шва, эластомерные характеристики которых могут реализовываться без возникновения дефектов за очень короткий период времени. Эти требования особенно актуальны для протяженных подземных сооружений, например подземных транспортных тоннелей, переходов и т.п., где отдельные участки сооружения объединены в общую конструкцию деформационными швами.

Конечно, в реальных условиях могут встречаться самые различные варианты "защемления" деформируемых элементов, различные условия нагревания и охлаждения. Однако в том случае, когда рассматриваются элементы конструкции деформационных швов, имеющие весьма малые геометрические размеры по отношению к размерам сооружения, для выполнения проектной, прогнозной оценки можно ограничиться и упрощенными расчетами.

В этом случае профиль составного элемента конструкции деформационного шва можно представить в виде, изображенном на рис. 15. Если физико-механические характеристики, в том числе модули упругости, коэффициенты теплового расширения и т.д., элементов деформационного шва неодинаковы, возникает сопряжение элементов, которое до определенного момента работает как один однородный элемент, а затем образуется структура самостоятельно деформирующихся комплексов.

Для такой конструкции относительные деформации элемента можно определить по выражению:

$$\varepsilon = \frac{\pm N}{A \cdot E} \pm \alpha \cdot \Delta t_p \quad (42)$$

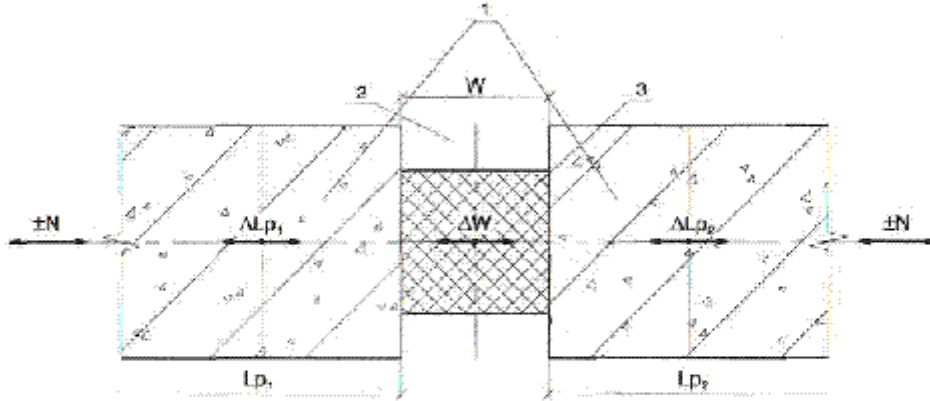


Рис. 15. Профиль составных элементов деформационного шва.

- W - величина зазора деформационного шва;
- ΔW - деформации в зазоре деформационного шва;
- L_{p1}, L_{p2} - длина сопрягаемых элементов конструкции;
- $\Delta L_{p1}, \Delta L_{p2}$ - деформации сопрягаемых элементов конструкции;
- $\pm N$ - нагрузки на сопрягаемые элементы конструкции;
- 1 - сопрягаемые элементы конструкции;
- 2 - зазор деформационного шва;
- 3 - уплотнительный элемент.

а относительные деформации в уплотнительном элементе деформационного шва ε_w , как

$$\varepsilon_w = \frac{\pm N}{A_w \cdot E_w} \pm \alpha_w \cdot \Delta t_p \quad (43)$$

где использованные величины аналогичны проведенным в выражении (40), при этом A_w, E_w, α_w характеризуют размеры и свойства уплотнительного элемента конструкции шва.

В данном случае рассматривается нагружение уплотнительного элемента шва, как конструкции, которая должна воспринимать все деформации, вызванные тепловой деформацией сопряженных с ней элементов. Из-за малой длины уплотнительного элемента шва W по отношению к длине элемента L его собственные тепловые деформации $A W t$ можно не учитывать.

Чтобы провести общий анализ нагрузок, возникающих в уплотнительном элементе шва, его вследствие малых размеров можно рассматривать как центрально нагруженный элемент и в расчетах использовать выражение (38):

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\sigma}{E}$$

Тогда, для условий деформаций в шве, согласно рис. 14, получим:

$$\Delta L_p = \frac{\sigma_p}{E_p} L_p \quad (44)$$

Для уплотнительного элемента шва справедлива зависимость:

$$\frac{\sigma_w}{E_w} = \frac{\Delta L_p}{L_p} \quad (45)$$

так как все деформации конструкции реализуются в зазоре шва. Так как:

$$\Delta W = \Delta L_p \quad (46)$$

то следует, что должно выполняться условие $E_w \gg E$, т.к. $W \ll L$

При проектировании уплотнения зазора шва его следует рассматривать как элемент, где реализуются все деформации сопрягаемых элементов, хотя на выбор материала для его изготовления влияет еще целый ряд факторов. Исходя из этого, можно определить основные принципы выбора конструктивного решения для уплотнения зазора шва и сформулировать основные требования к материалу и технологии обустройства этого элемента.

Швы должны быть надежно уплотнены во избежание поступления через зазор любых видов внешних агрессивных сред. Уплотнение швов должно обеспечивать длительную и безотказную эксплуатацию, т.е. физические и механические свойства материала уплотнительного элемента (прочность на растяжение, модуль упругости, относительное удлинение, стойкость к агрессивным факторам и т.п.), должны отвечать всем требованиям эксплуатации сооружения. Конструкция шва, способ и технология крепления уплотнительного элемента к сопрягаемым элементам должны обеспечить надежное сцепление между основанием и уплотняющим материалом.

Некоторые из характеристик уплотнительного материала следует определять еще на стадии проектирования деформационных швов.

Например, выбрав при расчете конструкции определенную длину сопрягаемых элементов L , зная характеристики материалов, применяемых для сопрягаемых элементов, и условия эксплуатации, по выражениям (39) - (42) можно вычислить $e = \Delta L/L$ и σ . Принимая $\sigma = a$, получаем, что адгезионные и когезионные характеристики соединений в деформационном шве должны превышать указанную величину. Затем, используя σ_w как минимально необходимое значение, можно, подставив его в выражение (45), оценить одну из основных характеристик материала уплотнительного элемента - его модуль упругости E_w .

ОБУСТРОЙСТВО УПЛОТНЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ШВОВ

При эксплуатации можно выделить три основные группы бетонных и железобетонных сооружений, в которых формируют различные типы деформационных швов:

- сооружения, не подвергающиеся давлению жидкости - большинство наземных зданий;
- сооружения, испытывающие на себе давление жидкости, - плотины, емкости, береговые конструкции, обделка тоннелей и каналов, трубопроводы и т.п.;
- плиты из бетона и железобетона - автодороги, аэродромы, автостоянки и пр.

В каждой из этих групп сооружений имеются деформационные швы, которые не имеют принципиальных конструктивных отличий, и такие швы, которые существенно отличаются друг

от друга.

Как с конструктивной точки зрения, так и с точки зрения используемых материалов все швы в сооружениях вне зависимости от деталей их устройства и использования можно подразделить на типы в соответствии с их основной функцией и конфигурацией - конструктивным оформлением.

Основная функция рассматриваемых швов состоит в том, что они должны воспринимать все возможные деформации конструкции, в том числе тепловые, осадочные и т.п.

Придерживаясь с некоторой корректировкой применительно к подземным и заглубленным сооружениям, классификации С.Н. Попченко [13], конструктивно в деформационном шве различают:

- зазор шва соответствующей величины;
- наполнитель полости шва;
- противофильтрационные или гидроизоляционные уплотнения (далее - уплотнения).

О функциональном назначении зазора деформационного шва и его величины достаточно подробно изложено в предыдущих разделах. Следует только добавить, что по конфигурации зазоры деформационного шва могут быть плоскими, штрабовидными, уступчатыми, возможно сочетание этих конфигураций.

По заполненности зазора деформационного шва различают:

- полые швы;
- частично заполненные швы;
- заполненные швы.

Поскольку к наполнителю полости шва не предъявляют требований по водонепроницаемости, в последнее время материалом заполнения служит листовый пенополистирол, который вкладывают в шов при его формировании. Такое заполнение допускает свободное сжатие или раскрытие шва практически без напряжений сопрягаемых элементов.

Вместе с тем в качестве наполнителей полости шва используют битумно-полимерные составы (мастика, термопласты горячего или холодного отверждения), оклейку рулонными материалами, установку деревянных досок, применяемых в качестве торцевой опалубки блоков бетонирования.

По величине зазора деформационные швы подразделяют на:

- узкие, до 30 мм;
- средние, до 60 мм;
- широкие, более 60 мм.

Следует отметить, что при назначении величины зазора деформационного шва желательно придерживаться требования, что он должен как минимум в четыре раза превышать прогнозируемую деформацию, т.е. $K_{здш}=4$.

Естественно, что это соотношение не всегда выполняется, поэтому дополнительно различают деформационные швы малых перемещений - до 25% и больших перемещений > 25%.

Уплотнения деформационных швов выполняют и для придания им свойств водонепроницаемости. В зависимости от места расположения в плоскости шва уплотнения подразделяют на контурные (внутренние и наружные) и мидельные - расположенные в средней части шва по толщине конструкции.

Основными материалами уплотнения деформационных швов малых перемещений - до 25% величины зазора шва (контурное уплотнение) - служат герметики.

В деформационных швах больших перемещений (более 25%) в качестве контурных и мидельных уплотнений используют специальные профили, шпонки, компрессионные уплотнители. Материалом таких уплотнителей являются синтетические каучуки (резины),

пластифицированный поливинилх-лорид, полиэтилен высокой или низкой плотности и т.п.

Очень часто для контурного уплотнения всех типов швов используют гидроизоляционные ленты, как правило, на полимерной основе.

При таком разнообразии возможных способов и материалов для уплотнения швов без подробной информации трудно принять правильное проектное решение. Поэтому далее в этом разделе приводится обзор различных видов уплотнения зазоров деформационных швов в конструкциях преимущественно подземных и заглубленных сооружений. При рассмотрении возможных способов уплотнения швов основное внимание уделяется современным уплотнительным материалам и изделиям, особенностям их применения.

Влияние температуры на деформационные характеристики материалов-уплотнителей зазора шва

Существенное влияние на физико-механические характеристики эластомерных материалов-уплотнителей деформационных швов оказывает температура окружающей среды. По мере снижения температуры зазор деформационного шва увеличивается, и в материале-уплотнителе возникают растягивающие напряжения. При этом возрастает жесткость материала и значительно уменьшается возможность его удлинения. В зависимости от вида эластомерные материалы имеют различную температуру, при которой они теряют свои эластичные свойства и переходят в стеклообразное состояние. Кроме того, как указано ранее (см. раздел 4.2), расширение и сжатие шва при понижении или повышении температуры происходит скачкообразно после преодоления сил трения по основанию конструкции.

В этой связи при выборе материала уплотнителя и конструкции деформационного шва должны учитываться такие особенности, как динамика изменения зазора и эластичных свойств материала уплотнителя.

Как известно, основными деформационными характеристиками уплотнителя зазора деформационного шва является модуль упругости материала, из которого он выполнен, величина напряжений и разрушающих удлинений. Для эластомерных материалов в зависимости от их состояния различают следующие виды модулей:

- разноравновесный модуль высокоэластичности - для высокоэластичного состояния, который подразделяют на "начальный модуль", соответствующий начальному, прямолинейному участку кривой зависимости $\sigma(\epsilon)$, и "секущий модуль", соответствующий любой точке на кривой и определяемый как отношение σ/ϵ в этой точке (рис. 16 [18]). Значения начального модуля определяются порядком Ю-1 МПа, а величину секущего модуля часто приводят при $\epsilon=100$ или 300%;
- мгновенный модуль упругости - для стеклообразного состояния, когда релаксация практически исключена. Значения мгновенного модуля определяются порядком 103 МПа.

Учитывая особенности динамики работы деформационного шва, в первую очередь следует учитывать значения величины начального модуля высокоэластичности и мгновенного модуля упругости эластомерных материалов и их изменение в зависимости от температуры (особенно в области отрицательных температур).

В научно-технической литературе весьма слабо отражены исследования поведения материалов для уплотнения швов в указанной области, в лучшем случае по приводимым техническим характеристикам материала можно рассчитать секущий модуль высокоэластичности при температуре $\sim 20^\circ\text{C}$.

Таблица 11

Влияние температуры на изменение начального модуля эластичности

Температура, °С	Начальный модуль высокоэластичности, Е, МПа	
	Битум БН IV	Пластбит
+20	40	5
+10	800	-
0	700	52
-10	1500	-
-20	2000	128
-30	2400	250

Имеются лишь отдельные публикации, посвященные исследованиям анализируемых характеристик материалов. В работе [6] приведены результаты определения упругодеформационных и прочностных свойств материалов (битум БН-IV и пластифицированный битум - пластбит) в интервале температур +20...-30°С. Зависимость $\sigma(\epsilon)$ определяли в равновесных условиях при постоянном напряжении растяжения: для битума - 0,08 МПа, для пластбита - 0,007 МПа. Рассчитанные значения начального модуля высокоэластичности сведены в табл.11 Прочностные характеристики материалов определяли при постоянной скорости растяжения - 60 мм/мин. Результаты этого определения сведены в табл.12.

Таблица 12

Влияние температуры на характеристики материалов

Температура, °С	Битум БН IV		Пластбит	
	Разрушающие напряжения, σ , МПа	Разрушающие удлинения, %	Разрушающие напряжения, σ , МПа	Разрушающие удлинения, %
+20	0,5	150	0,03	110
+10	0,8	52	0,06	80
0	1,3	38	0,12	30
-10	-	хрупкое разрушение	-	-
-20	-	-	0,27	10
-30	-	-	-	хрупкое разрушение

Как видно из табл. 11 и 12, при снижении температуры имеет место существенное увеличение модуля и снижение разрушающего удлинения, при этом хрупкое разрушение наступает при температуре стеклования.

Испытания пластифицированного поливинилхлорида (PVC), предназначенного для изготовления гидроизоляционных шпонок, проводила фирма Master Builders Technologies (Швейцария). Определялся модуль сдвига материала при кручении в зависимости от температуры: + 2, -14 и - 37°С; значения модуля соответственно составили 4, 23 и 310 МПа. Аналогичный материал испытывали при температуре 20°С на осевое растяжение со скоростью приложения нагрузки 200 мм/мин и рассчитывали значения напряжений (σ) при относительной деформации (ϵ) 50, 100, 200 и 360%; напряжения при растяжении соответственно составили: 5,2; 8,1; 12 и 14 МПа. Характер кривых $\sigma(\epsilon)$ позволяет определить равновесные модули высокоэластичности: начальный -10,3 МПа, а также секущие 8,1 МПа ($\epsilon = 100\%$); 6,0 МПа ($\epsilon = 200\%$) и 3,9 МПа ($\epsilon = 360\%$).

Приведенные примеры показывают, что влияние температуры при работе материала уплотнителя деформационного шва, даже при отсутствии исчерпывающей информации по эластомерным характеристикам уплотнителя, можно оценить и следовательно учесть при проектировании конструкции шва.

Вместе с тем приведенные примеры показывают, что если температура окружающей среды может опуститься до -30°C , то начальный модуль высокоэластичности материала-уплотнителя шва повысится примерно в 50-60 раз и, очевидно, деформационные свойства этого материала уменьшатся во столько же раз. Следует иметь в виду, что указанное отношение для деформаций по большей части справедливо для материалов, которые еще не пришли в стеклообразное состояние.

Приведенные подсчеты соответствуют практическому опыту, обобщенному в [16], где для различного рода материалов-герметиков приведены их допустимые диапазоны растяжения-сжатия в зазоре деформационного шва при многократных знакопеременных тепловых нагрузках. Эти диапазоны в процентах от ширины шва установлены по результатам применения герметиков на строительной площадке с тем условием, чтобы материал герметика работал только в области упругих деформаций, сохраняя возможность восстановления своей формы. Количественно эти значения для некоторых классов герметиков приведены в табл. 13.

Таблица 13
Допустимые значения растяжения/сжатия для некоторых видов герметиков для заполнения швов

Вид герметика для заполнения швов	Допустимые значения растяжения/сжатия, % от ширины шва	Примечание
1. Мастики (полибутилены, полиизобутилены)	3%	Неотверждаемые в своей массе
2. Термопласты: • горячего отверждения (битумы) • холодного отверждения (резино-битумы, бутил-каучук)	5% 7%	Отверждение при охлаждении Отверждение при испарении растворителя или разрушении эмульсий под воздействием воздуха
3. Термореактопласты (винилацетаты, полисульфиды, эпоксины, полиуретаны)	25%	Химическое отверждение
4. Силиконы	25-50%*	Вулканизация на воздухе

* - в зависимости от коэффициента формы

Как видно из табл. 13, существенное влияние на допустимые деформации герметика оказывают его природа и соответствующие технические характеристики. Так, регламентированные отечественными нормами материалы, относящиеся к классу мастик и термопластов, имеют весьма ограниченный диапазон допустимых перемещений. Это обстоятельство, вероятно, и определяет наличие отказов при деформациях швов, превышающих указанные значения. Например, шов, выполненный с типичным зазором 20-25 мм и заполненный герметиком на битумном вяжущем, сохраняет герметичность при многократных деформациях в пределах только 1,25-1,5 мм (max 2,0 мм).

(до 25 мм) и небольшой величиной последующих деформаций (до $\pm 25\%$). Форма и конфигурация шва, способ, с помощью которого выполняется его замыкание, возможность укладки герметика также налагают ограничения на типы материалов, которые могут считаться пригодными в том или ином конкретном случае.

В процессе эксплуатации условия окружающей среды часто делают необходимым принятие дополнительных требований к заполнению швов, не ограничивающихся только требованиями, относящимися к восприятию деформаций.

Подбор наиболее подходящих материалов в конкретном случае является сложным процессом вследствие большого количества связанных с этим переменных. Однако можно провести классификацию основных свойств, которые должны иметь эти материалы, в зависимости от того,

насколько они подходят для заполнения различных типов швов.

В основном в разделе рассматриваются герметики, формование которых производится в построечных условиях и которые применяются в тех случаях, когда одна поверхность готового шва открыта для проведения работ по герметизации. Герметики, используемые для таких целей, представлены в таблице 13. Кроме того, конструкция шва в случае восприятия температурных деформаций может предусматривать установку ленточных прокладок под тем участком, на котором будет произведена укладка герметика, "листа-скольжения" - материала, препятствующего сцеплению, с целью разделения герметика и прилегающего к нему субстрата; подкладочных материалов, обеспечивающих опору герметика для предотвращения провисания, т.е. заполнителя шва. Такое конструктивное оформление деформационных швов при использовании в качестве уплотнителя герметиков представлено на рис. 18.

Для эффективного выполнения своих функций герметик или уплотнитель шва должен:

1. Представлять собой непроницаемый материал.

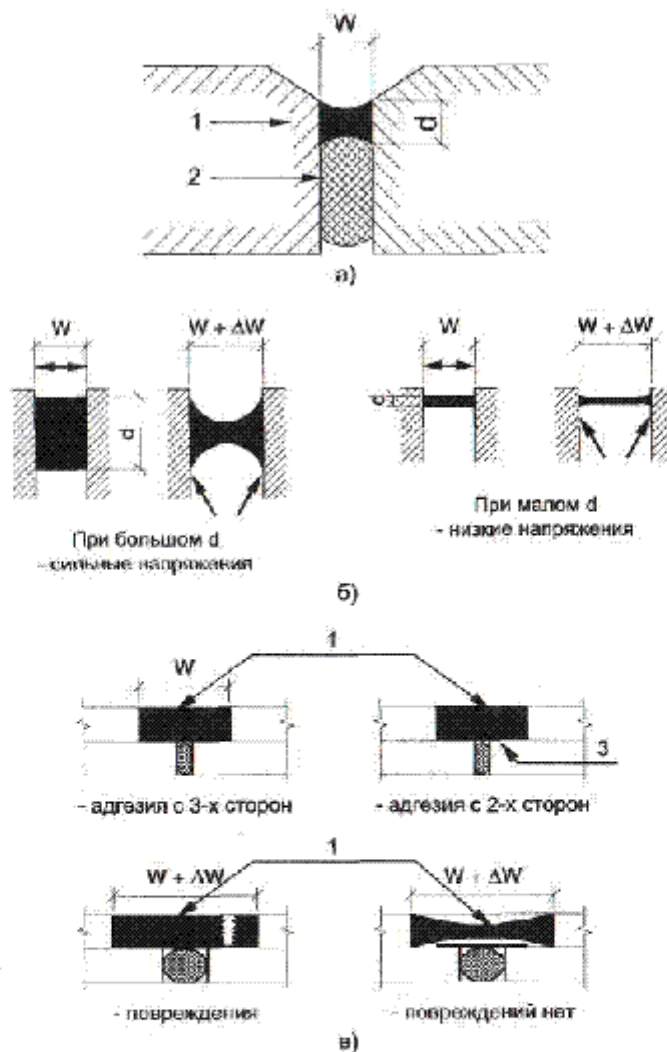


Рис. 18. Использование герметиков для уплотнения деформационных швов.

- а - сечение шва;
 б - напряжения в герметике;
 в - улучшение условий работы при Т-образном сечении шва.

W - величина зазора деформационного шва;
 d - толщина уплотнительного элемента;
 ΔW - деформация в зазоре шва при растяжении;
 1 - уплотнительный элемент - герметик;
 2 - наполнитель шва;
 3 - подкладочный элемент - "лист скольжения".

2. Изменять свою форму и размеры с целью восприятия скорости и величины деформации, происходящей в шве.
3. Восстанавливать свои исходные свойства и форму в случае воздействия на него циклических деформаций.
4. Обладать сцеплением с субстратом. Это означает, что все герметики и уплотнители, за исключением готовых уплотняющих прокладок, в которых возникают внутренние напряжения и которые оказывают давление на поверхности субстрата или имеют механическое крепление с ним с помощью ан-керовки, должны сцепляться с бетонными поверхностями и не допускать адгезионного разрушения, а также отслаивания на углах или на других участках, подвергающихся воздействию нагрузок.

5. Не подвергаться внутреннему разрушению или разрыву (т.е. когезионному разрушению).
6. Обладать стойкостью к текучести под воздействием силы тяжести (или гидростатического давления жидкости) или к значительному размягчению при высокой температуре эксплуатации.
7. Не затвердевать и не приобретать недопустимую хрупкость при низкой температуре эксплуатации.
8. Не обнаруживать отрицательных симптомов старения под воздействием атмосферных влияний и других эксплуатационных факторов в течение проектного срока эксплуатации.

В зависимости от конкретных условий эксплуатации от герметика или уплотнителя может потребоваться стойкость к воздействию одного или нескольких из следующих факторов: интрузии (включению или попаданию внутрь) постороннего вещества; износа; образованию вмятин; захвата транспортом; воздействия огня или агрессивных химических веществ. Кроме того, могут также предъявляться требования относительно того, чтобы герметик или уплотнитель шва имел тот или иной определенный цвет, обладал цветопрочностью и не оставлял пятен на субстрате.

Кроме того, качество герметика не должно ухудшаться при хранении его перед использованием в течение определенного срока, работа с этим материалом и его укладка не должны отличаться сложностью, и в нем не должно содержаться веществ, вредных для пользователя, субстрата и других материалов шва, с которым он может соседствовать.

Ни один материал не обладает идеальными свойствами, необходимыми для того, чтобы полностью удовлетворять всем требованиям в каждом отдельно взятом случае. Поэтому вопрос сводится в подбору материала, который по показателям экономичности и по своему качеству оказывается приемлемым для данного конкретного случая.

В течение многих лет единственными возможными герметизирующими материалами были мастики на основе нефтяных битумов и металлические изделия. В последние годы активно разрабатываются многие типы "эластомерных" (высокоэластичных) герметизирующих составов, которые после отверждения становятся упругими и гибкими. Формование высокоэластичных составов проводят в построечных условиях.

Рассмотрим основные свойства и возможность применения герметиков, представленных в табл. 13.

Мастики - вязкие жидкости, реологические свойства которых обеспечиваются введением синтетических волокон и других наполнителей. После нанесения они по большей части не отверждаются, но образуют на своей поверхности атмо-сферостойкую пленку. К мастикам относятся высыхающие или не высыхающие масляно-смолистые соединения, битумы с низкой температурой плавления, полибутены (полибутилены), полиизобутилены или сочетания этих материалов. Допустимый диапазон расширения-сжатия мастик в условиях эксплуатации составляет приблизительно $\pm 3\%$.

Мастики применяются в тех случаях, когда прогнозируется лишь небольшая деформативность швов, а их стоимость оказывается более важной, чем последующие расходы на текущий ремонт. При старении большинство мастик отвердевают на все большую глубину по мере их окисления и выделения летучих веществ. Это снижает их эксплуатационную надежность. Полибутеновые (полибутиленовые) и полиизобу-тиленовые мастики имеют несколько более длительный срок эксплуатации, чем битумные.

Термопласты, наносимые горячим способом, - это материалы, которые размягчаются при нагревании и приобретают жесткость или даже отвердевают при охлаждении, что обычно не сопровождается химическими изменениями. К этим материалам относятся битум и каменноугольный деготь, в т.ч. с добавкой каучука, пека (каменноугольные смолы). Допустимый диапазон расширения-сжатия составляет $\pm 5\%$. На это предельное значение деформативности оказывают непосредственное влияние температура эксплуатации и особенности старения материалов. С возрастом эти материалы утрачивают эластичность, начинают захватывать посторонние вещества и выдавливаться из швов. На физические свойства может оказать

отрицательное влияние их чрезмерное нагревание при нанесении.

Материалы этой группы, имеющие битумную основу, можно размягчить с помощью углеводородов. Материалы на основе дегтя обладают стойкостью к воздействию нефтяных продуктов.

Использование этого типа термопластов ограничивается горизонтальными швами, потому что из вертикальных швов они вытекают.

Материалы на основе каменноугольного дегтя с добавкой поливинилхлорида обладают улучшенными характеристиками и свойствами:

- не текут при повышенной температуре эксплуатации;
- упруги и эластичны;
- стойки к атмосферным воздействиям и к старению;
- противостоят воздействию топлива и других химических веществ той же степени агрессивности;
- при определенных условиях допускают растяжение-сжатие до $\pm 25\%$.

Такие герметики на основе каменноугольного дегтя с поливинилхлоридом используются в швах дорожной одежды и облицовки каналов.

Термопласты, наносимые холодным способом, - материалы, отверждение которых происходит за счет выделения растворителей или разрушения эмульсий на воздухе. Иногда, для того чтобы облегчить процесс нанесения, их нагревают до температуры 50°C , но обычно работу с ними производят при температуре окружающей среды. Выделение растворителя или воды может вызвать усадку и повысить жесткость материала, что приводит к уменьшению величины воспринимаемых деформаций и снижению эксплуатационной надежности. В основном это материалы типа битумов с резиной, винила, акрилов и бутилкаучуков с добавками. Допустимый диапазон растяжения-сжатия у них составляет $\pm 7\%$. Однако эта цифра может снизиться в результате размягчения при нагревании и твердения при охлаждении. Применение этих материалов ограничено швами с небольшим значением деформаций, а также в качестве уплотняющих материалов для трещин.

Термореактивные пластики, отверждение которых происходит химическим способом. Материалы, относящиеся к этой группе, представляют собой одно-, двухкомпонентные системы, которые отверждаются в ходе химической реакции, переходя в твердое состояние. К таким материалам относятся: полисульфид, каменноугольный деготь с полисульфидом, полиуретан, каменноугольный деготь с полиуретаном, силикон, уретан и материалы на основе эпоксидов. К свойствам, которые делают их пригодными для использования в качестве герметиков и уплотнителей в разнообразных областях применения, относятся стойкость к атмосферным воздействиям и воздействию озона, эластичность и упругость как при положительной, так и отрицательной температуре; стойкость к воздействию различных химических веществ. Кроме того, у уретановых герметиков абразивостойкость и сопротивление вдавливанию оказываются выше средних значений. Термореактивные герметики и уплотнители, отверждение которых происходит химическим способом, обладают диапазоном расширения-сжатия, достигающим для силиконов - $+100/-50\%$; полиуретанов - 25% ; полисульфидов - 25% ; для материалов на эпоксидной основе - менее 25% .

Дополнительно следует отметить, что силиконовые герметики сохраняют большую эластичность в более широком диапазоне температур, чем другие жидкие герметики и уплотнители, формование которых производится в построечных условиях. Полисульфиды используются для сооружений, постоянно испытывающих воздействие воды.

Если внутренние боковые поверхности шва находятся в чистом состоянии и при укладке удовлетворяют всем остальным требованиям, то в этом случае термореактивные герметики способны воспринять без повреждений большую величину деформаций, чем другие герметики, формование которых производится в построечных условиях, и обычно имеют гораздо более длительный срок эксплуатации.

Термореактивные пластики, отверждение которых происходит химическим способом с выделением растворителей. Эта группа материалов представлена хлорсульфированным полиэтиленом, бутадием-стиролом, силиконами. Их эксплуатационные характеристики в целом

сходны со свойствами термопластичных материалов, наносимых холодным способом. Однако после отверждения они обладают меньшей чувствительностью к температурным колебаниям. Использование этой группы материалов ограничивается небольшими величинами деформаций. Их стоимость ниже, чем у других эластомерных герметиков, а срок службы вполне удовлетворителен.

С 1993 года классификация герметиков, используемых при выполнении строительных работ, производится в соответствии со стандартом Международной организации по стандартизации ISO 11600 [19]. Приложением к стандарту приняты соответствующие методики их испытаний.

В отличие от ранее принятых классификаций, в основе положены не химические реакции, характерные для данного типа герметика, а его физико-химические и эксплуатационные характеристики.

Категория герметиков типа F, предназначенных для использования в строительстве, представлена семью классами герметиков, охватывающих их деформационную способность, эластичность и модуль упругости. Эти классы герметиков представлены в таблице 14 [20].

Таблица 14

Строительные герметики типа F

Класс герметика	Обозначения
25LM	25% деформация*
25NM	Высокий или низкий модуль упругости
20LM	20% деформация*
20NM	
12,5E	12,5% деформация, эластичный
12,5P	12,5% деформация, пластичный
7,5P	7,5% деформация, пластичный

*) Герметики с деформативностью 25% и 20% по своим характеристикам, по определению, являются эластичными.

Вспомогательные материалы.

1. Праймеры (грунтовки) - связующие составы, обеспечивающие необходимое сцепление герметика с материалом конструкции за счет физической и/или химической адсорбции. Использование праймеров диктуется необходимостью совмещения материалов с различными физико-химическими свойствами контактирующих поверхностей. Например, при использовании герметиков на битумной основе в деформационных швах бетонных конструкций обязательно применение праймеров. Это вызвано тем, что бетон обладает свойствами гидрофильности, а герметик противоположными свойствами - гидрофобностью. Необходимость применения праймеров указывается в технических описаниях герметиков и зависит от вида поверхностей, на которые они наносится.

2. Подкладочные элементы (подложки) - размещаются в зазоре деформационного шва, обеспечивая формирование уплотнителя заданных размеров и формы. Обычно применяют элементы, изготовленные из пористой резины, дорнита, пороизола, пенополиэтилена (вилатерм СМ), пенополистиро-ла. Не обладая адгезией к герметикам, они обеспечивают основное требование работы уплотнителя - сцепление только с боковыми поверхностями сопрягаемых элементов конструкции. Металлические подкладки, используемые, например, в Т-образных деформационных швах, создают необходимую опору и препятствуют продавливанию герметика в зазор шва. Поверх металлической подкладки для предотвращения ее сцепления с герметиком укладывают лист скольжения (полиэтиленовая пленка, картон со специальной пропиткой и т.п.).

3. Материалы, предотвращающие сцепление. Многие подкладочные материалы не обладают адгезией к герметикам. В подобных случаях нет необходимости использовать материалы, препятствующие сцеплению. В тех случаях, когда требуется отдельный материал, "лист скольжения", предотвращающий сцепление, часто используются полиэтиленовая лента, картон со специальным покрытием и металлическая фольга.

Применение гидроизоляционных лент для уплотнения деформационных швов

Детальный анализ приведенного ранее выражения, определенного как коэффициент формы $K = d/W$, позволяет отметить два весьма важных положения.

Во-первых, наилучшие условия эксплуатации с минимальной величиной напряженно-деформированного состояния уплотнительного материала достигаются при предельном значении коэффициента формы K стремящемся к нулю: $K \rightarrow 0$. При таком состоянии реализуются предельные деформативные и упругопластические свойства уплотнительного материала.

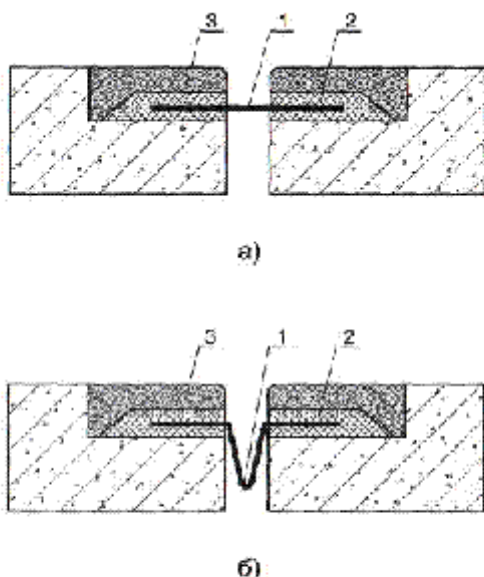


Рис. 19. Уплотнение зазора деформационного шва гидроизоляционной лентой.

а) без полимерной мембраны; б) с полимерной мембраной

1 - гидроизоляционная лента; 2 - клееный шов;
3 - цементная стяжка, выравнивающая профиль конструкции.

Во-вторых, возможность конструктивно обеспечить такие условия уплотнения зазора шва может быть достигнута или при Т-образной конструкции шва или, что намного проще, при условии уменьшения толщины уплотнительного материала d , т.е. при $d \rightarrow 0$. Такой вариант уплотнения шва можно рассматривать как обустройство уплотнения зазора шва тонкими мембранами, например различного рода гидроизоляционными лентами (рис. 19).

Применение гидроизоляционных лент позволяет как бы локализовать, существенно уменьшить влияние такого параметра, влияющего на надежную работу уплотнительного материала зазора деформационного шва, как адгезия. Действительно, лента при установке монтируется на наружные поверхности конструкции вдоль зазора шва, и при увеличении зазора шва в местах монтажа ленты к основанию будут возникать только напряжения сдвига. Предельное значение напряжений сдвига во много раз превышает усилия при нормальном отрыве, поэтому для повреждения такого узла потребуются усилия, превышающие прочностные характеристики самой ленты.

С рассмотренных позиций можно оценивать и условия работы многослойной рулонной оклеечной гидроизоляции. С увеличением количества слоев материала пропорционально увеличивается значение d и, соответственно, возрастает значение коэффициента формы K , при этом снижается допустимая относительная величина воспринимаемых деформаций.

Кроме того, рассматривая деформативность строительных конструкций различных сооружений, особенно их подземной части, нужно принимать во внимание следующее. Во-первых, изменение величины зазора деформационного шва не происходит плавно, а часто реализуется скачкообразно, за очень малый промежуток времени. К сожалению, ни герметики, ни битумные рулонные материалы не могут без нарушений воспринимать такие деформативные изменения в

конструкции, особенно при отрицательных температурах.

Во-вторых, протяженные сооружения с развитой подземной частью, как правило, имеют определенное количество деформационных швов, которые в основном проектируются и рассчитываются как равнозначные с распределенным восприятием возникающих деформаций. Однако в процессе строительства и эксплуатации очень часто возникают ситуации, когда отдельные участки сооружения в силу ряда причин, как, например, неравномерная обратная засыпка и т.п., оказываются сильнее обжатými, заземленными, вследствие чего при деформировании конструкции возникающие перемещения воспринимаются швами неравномерно. В связи с этим в некоторых швах величины деформаций могут превышать расчетные значения, приводя к нарушению целостности системы гидроизоляции.

Рассматривая в целом указанные условия работы уплотнителей деформационных швов, а также учитывая, что смежные секции конструкций сооружения могут иметь как продольные, так и поперечные деформации, требуется разработка принципиально нового подхода к системе уплотнения деформационных швов. В основу такого решения должна быть положена высокотехнологичная многоуровневая система уплотнения деформационных швов.

Конструктивное решение по уплотнению деформационных швов, воспринимающих значительные (>25% от ширины шва) перемещения, должно представлять собой как минимум двухуровневую систему защиты, один из уровней которой может быть выполнен из гидроизоляционной ленты.

В такой системе уплотнения лента может быть смонтирована как по внешнему контуру зазора шва, так и с его внутренней стороны. В процессе установки лента может стыковаться с наружной гидроизоляционной мембраной, образуя вместе с ней неразрывный замкнутый контур, либо располагаться под контуром наружной гидроизоляционной мембраны конструкции. В зазоре шва находится только тонкая полоса ленты, обеспечивающая наименьший коэффициент формы (0). Кроме того, ленту можно смонтировать в зазоре шва с формированием петли-компенсатора, что существенно повышает надежность системы уплотнения шва, так как вначале при деформациях конструкции выбирается "слабина" ленты, и только после натяжения ленты, при значительных перемещениях, начинают реализовываться деформативные (упруго-эластичные) характеристики материала ленты.

Возможные варианты монтажа ленты при обустройстве уплотнения зазора деформационных швов представлены на рис. 20. Как видно из рисунков, одним из преимуществ гидроизоляционной ленты следует считать возможность ее монтажа в сопрягаемых элементах с разной конфигурацией.

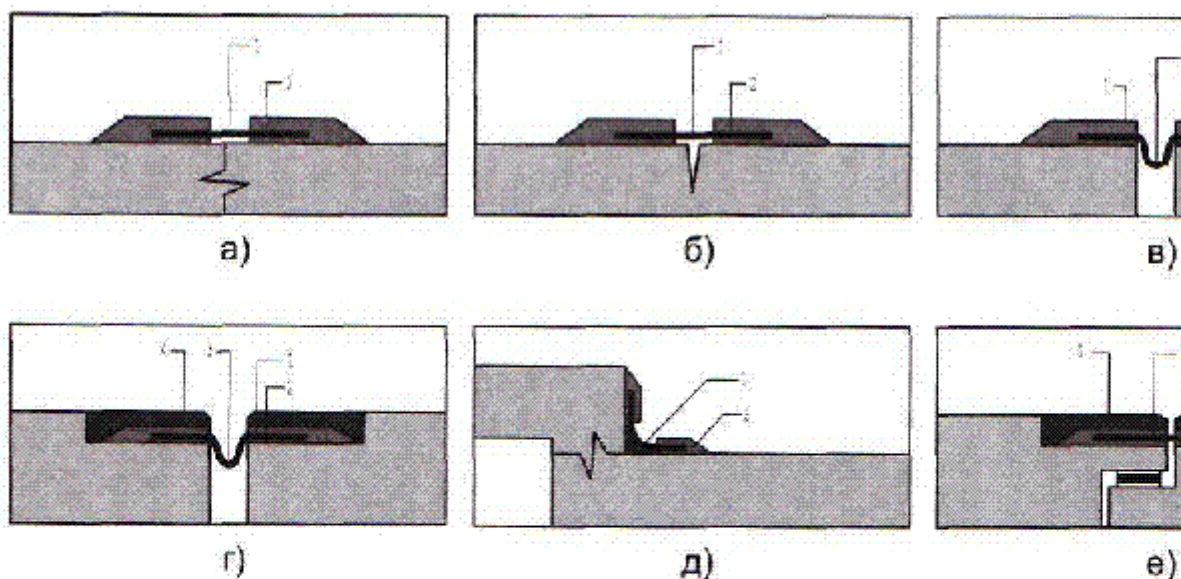


Рис. 20. Варианты применения гидроизоляционной ленты при уплотнении зазоров швов (трещин).

- а - в рабочих швах бетонирования;
- б - при узких швах и трещинах;
- в - в деформационных швах и по сквозным широким трещинам;
- г - с заглублением в штрабу;
- д - по примыканию стена/пол;
- е - при "замковом" соединении элементов конструкции.

- 1 - гидроизоляционная лента;
- 2 - клеевой состав;
- 3 - "петля-компенсатор";
- 4 - защитный состав.

Номенклатура выпускаемых в настоящее время гидроизоляционных лент достаточно широка, и приводить ее в настоящем обзоре вряд ли оправданно. Следует только отметить, что обычно гидроизоляционные ленты изготавливаются из неопренового каучука, материалов на основе ЭПДМ, пластифицированного ПВХ, хлорсульфированного полиэтилена и других подобных материалов. Они производятся и поставляются самой различной ширины - от 50 до 500 мм и более, толщиной от долей до нескольких миллиметров. Отдельные типы лент обладают относительным удлинением на разрыв до 400%, а также повышенной морозостойкостью, с температурой хрупкости -50°C .

Гидроизоляционные ленты поставляются в рулонах длиной от 3 до 50 м. При необходимости стыковки отдельных отрезков ленты они свариваются или склеиваются. Способ стыковки отдельных отрезков устанавливается в зависимости от условий выполнения работ и типа материала применяемой гидроизоляционной ленты.

Монтаж гидроизоляционных лент на поверхности конструкции вдоль зазора шва выполняется с помощью клеевых составов на эпоксидной основе или на основе полиуретанов. Единственным ограничением при таких условиях монтажа является требование к влажности поверхности основания - оно должно быть сухим (относительная влажность $< 4\%$).

Вместе с тем при позитивном давлении воды специальные виды гидроизоляционных лент, имеющих вдоль полотна анкерные полосы, можно монтировать и на влажное основание, используя при установке составы на полимерцементной основе (рис. 21).

Большое внимание при установке гидроизоляционных лент следует обращать на места сопряжения вертикальных и горизонтальных швов при изменении направления оси шва и при

уплотнении сопряжений конструкций, особенно когда лента монтируется с петлей-компенсатором. В этих местах возможно образование складок при изгибе ленты и, как следствие, неплотности и дефекты установки.

Чтобы исключить подобное явление, требуется специальная раскрой и монтаж ленты, которые несколько усложняют технологию ведения работ.

Гидроизоляционные ленты применяются, как правило, при позитивном воздействии воды на элементы шва, однако они могут применяться и при негативном воздействии. В этом случае помимо уплотнения зазора шва они выполняют еще функцию водоулавливающих и водоотводящих лотков, поэтому в таких местах их установки должна быть обустроена система водоудаления, дренажа (рис. 22), а также система подогрева лотков, в противном случае лотки могут замерзнуть и не обеспечить свою функцию.

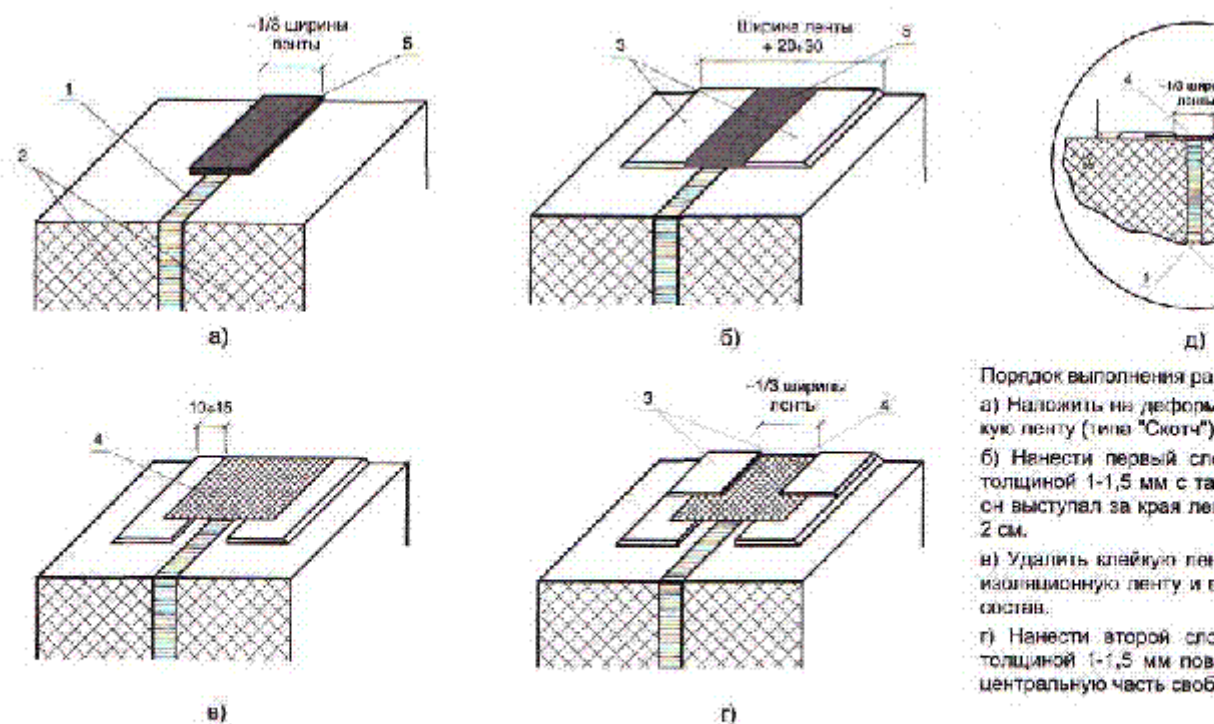


Рис. 21. Монтаж эластичной гидроизоляционной ленты на бетон при ее креплении цементно-полимерным составом

1 - деформационный шов; 2 - сопрягаемые элементы конструкции; 3 - клеевой состав; 4 - гидроизоляционная лента.

Гидроизоляционные ленты имеют постоянные физико-механические характеристики, удобны в производстве работ. Сравнительно небольшая стоимость лент позволяет их использовать в самых различных конструкциях и в достаточно большом объеме.

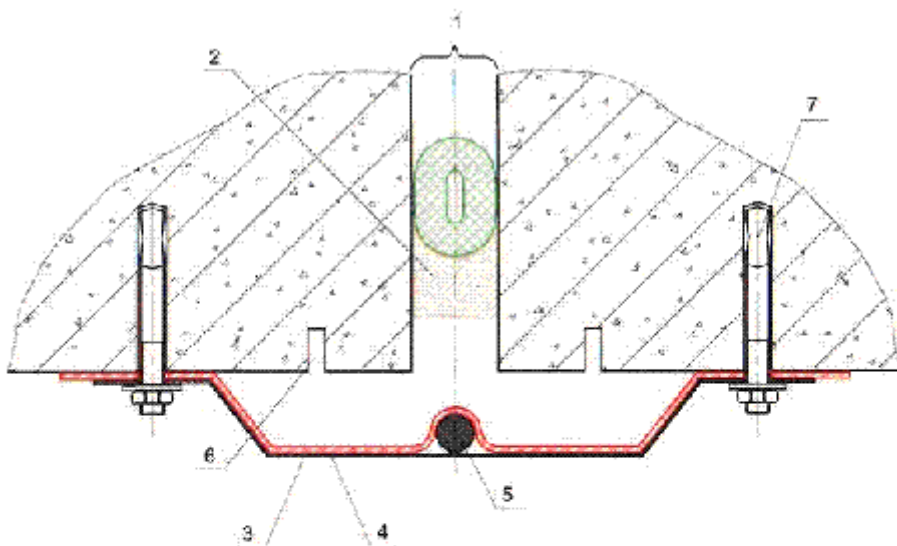


Рис. 22. Применение гидроизоляционных лент в резервных водоотводящих системах деформационных швов.

- 1 - деформационный шов;
- 2 - эластичный наполнитель шва;
- 3 - гидроизоляционная лента;
- 4 - нащельник (лист нержавеющей стали);
- 5 - элемент системы подогрева;
- 6 - капельник;
- 7 - болт анкерный.

Швы, уплотненные с помощью гидроизоляционных лент, особенно с петель-компенсатором, могут воспринимать деформации в различных плоскостях и очень часто используются как дополнительный уровень защиты, а также при проведении ремонтных работ. В последнем случае для их надежного монтажа необходимо учитывать фактические характеристики конструкции: чистоту обустраиваемой поверхности, ее прочность, влажность, а также условия выполнения работ.

Единственным ограничением по использованию гидроизоляционных лент является то, что их не рекомендуется устанавливать в швах без устройства дополнительной защиты от различных механических воздействий и попадания грязи.

Одним из наиболее качественных изделий, относящихся к этой группе уплотнительных материалов, является гидроизоляционная лента MEYCOFLEX фирмы MBT, Швейцария. Лента изготавливается из эластифицированного PVC (ПВХ), обладает относительным удлинением на разрыв - 400% и повышенной морозостойкостью - температура хрупкости - минус 50°C. Лента выпускается шириной от 100 до 500 мм и толщиной 1 и 2 мм. При установке лента приклеивается к основанию составами на основе эпоксидных смол или акрилатов. Причем при использовании акрилатных клеевых составов работы по монтажу ленты можно проводить при температуре окружающего воздуха до -10°C.

Предлагаемые конструктивные решения по многоуровневой системе уплотнения деформационных швов успешно реализуются при строительстве различных подземных сооружений. В качестве примеров можно указать транспортный тоннель на Волоколамском шоссе под каналом имени Москвы, тоннели на проспекте Мира, подземную развязку 3-го транспортного кольца в районе площади Гагарина и ряд других объектов. Только за период 2000-2002 гг. специалистами ЗАО "Триада-Холдинг" обустроено более 5000 погонных метров деформационных швов, где в качестве контурного уплотнения использована гидроизоляционная лента MEYCOFLEX.

Особый интерес представляет конструкция швов тоннеля на Волоколамском шоссе, где по наружному контуру тоннеля выполнена металлоизоляция. Учитывая особенность расположения тоннеля - под действующим каналом имени Москвы, - система уплотнения включала три уровня защиты. Два из них - наружное и внутреннее контурные уплотнения - выполнены из ленты

MEYCOFLEX, а в качестве мидельного уплотнения использован профиль Masterflex 2000 DK 12S.

Уплотнение деформационных швов с помощью гидротехнических профилей и шпонок

Еще одним возможным способом уплотнения зазора деформационного шва могут служить уплотнительные прокладки, различные профили или гидроизоляционные шпонки. Эти прокладки, профили или шпонки представляют собой фасонные детали из упругих гидроизоляционных материалов, которые помещают в стыки или швы конструкций при их бетонировании.

Раньше в большинстве случаев для изготовления подобных элементов применяли различные металлы: медь и олово, цинк, сталь и другие. Однако применение уплотнительных элементов из металла не всегда приносит желаемый результат. Так, например, уплотнительные элементы из меди могут быть причиной электролитических процессов в местах контакта со стальной арматурой. Стальные элементы должны быть защищены от коррозии, т.к. требуют дополнительных мер защиты. Применение цветных металлов, некорродирующих в условиях эксплуатации, также ограничено.

Кроме того, деформируемость уплотнительных элементов из металлов ограничена их жесткостью, либо их надо специально профилировать, что требует специального промышленного изготовления. Использование "жестких" элементов в качестве мидельного уплотнения и их установка в тело конструкции при его бетонировании, особенно на криволинейных участках и в углах, весьма сложный и трудоемкий процесс.

Перечисленные недостатки использования металлов заставляют искать альтернативные варианты, одним из которых, а может, и наилучшим, является вариант использования уплотнительных прокладок, профилей и шпонок из полимерных материалов или резины.

Наибольшее распространение получили уплотнительные элементы различной конфигурации из пластифицированного ПВХ и резины, как обычной, так и специальной, на основе ЭПДМ, выпускаемые в основном теми же фирмами, которые производят гидроизоляционные ленты.

Профиль уплотнительного элемента должен быть выбран так, чтобы после сопряжения с элементами конструкции, т.е. после омоноличивания, были обеспечены возможные деформации частей сооружения без повреждений уплотнительного элемента, плотный и надежный, желательно протяженный, контакт с основным материалом конструкции, чаще всего с бетоном.

В настоящее время используются профили и шпонки самых различных типов, некоторые из которых представлены на рис. 23.

Первоначально широкое применение нашли резиновые шпонки в виде "гантели" (см. рис. 23 г), однако они плохо воспринимали деформации сдвига. Затем были разработаны и стали использоваться так называемые "трехкулачковые" шпонки, имеющие полую центральную часть в виде цилиндра. Такие типы шпонок выпускаются у нас в стране и в настоящее время (рис. 23 д). В этой конструкции центральная часть

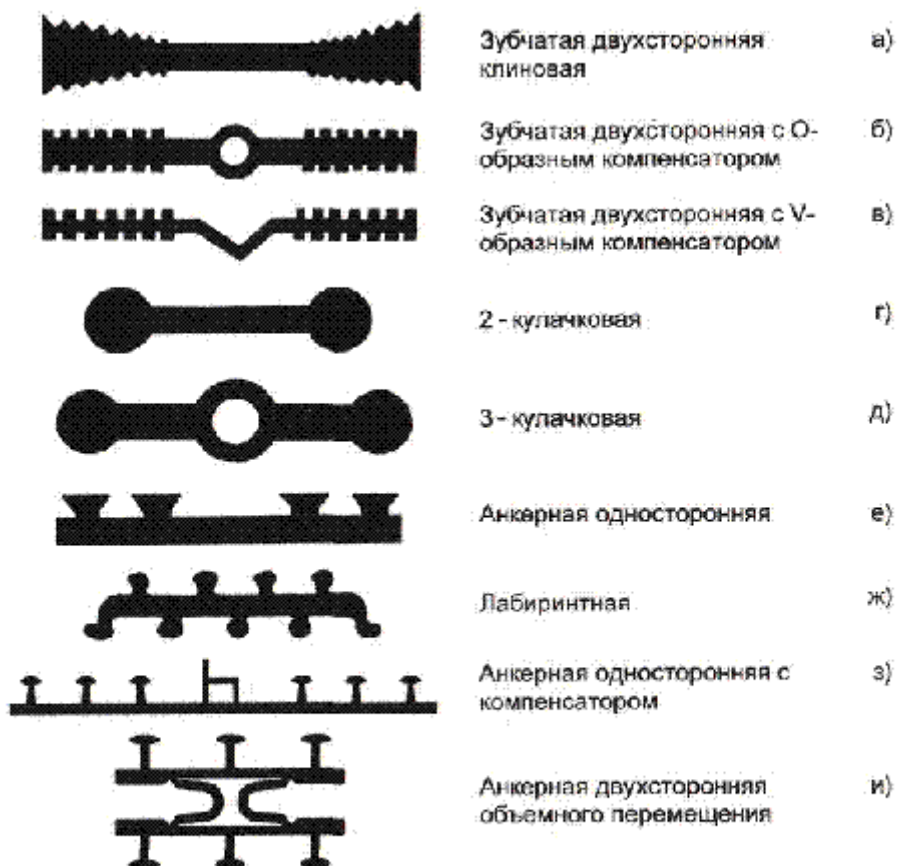


Рис. 23. Типоразмеры профилей и шпонок, устанавливаемых во время бетонирования.

может воспринимать как деформации сжатия и растяжения, так и деформации сдвига.

Использование для изготовления шпонок современных резин на основе ЭПДМ позволило существенно сократить их габаритные размеры при сохранении характеристик по деформативности. В этом плане интерес представляет гидротехническая шпонка ТХЗ-1, представленная на рис. 24.

В отличие от гидроизоляционных шпонок из резины шпонки из ПВХ имеют более развитый, более сложный профиль на краях шпонки, имеющий большую площадь контакта и сцепления с бетоном. Это связано с тем, что чем больше площадь контакта шпонки с бетоном, тем выше герметизирующая способность. Для шпонок из ПВХ такое условие весьма желательно, т.к. они более пластичны, чем резиновые, и обладают меньшей упругостью (рис. 23 а, б, в), особенно при снижении температуры.

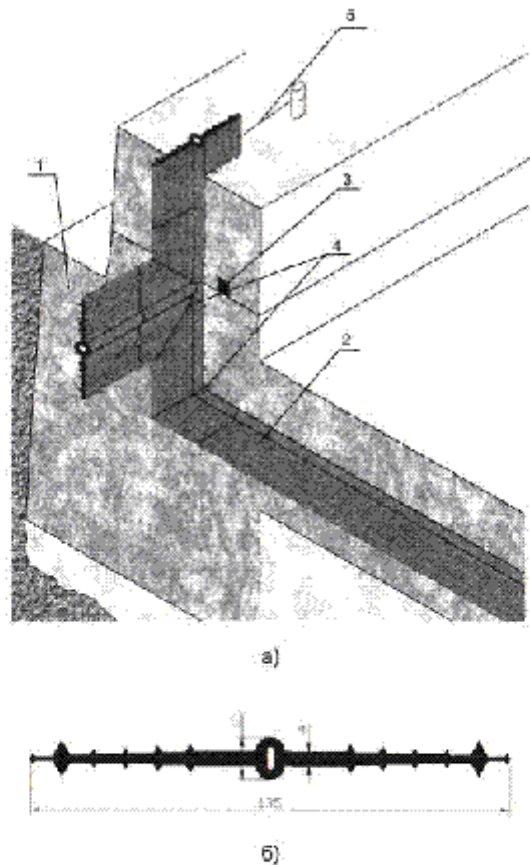


Рис. 24. Универсальная гидротехническая шпонка ТХЗ-1.

а - схема расположения шпонки в "теле" бетона;
 б - сечение шпонки, основные размеры.

- 1 - бетонная конструкция;
- 2 - гидротехническая шпонка ТХЗ-1;
- 3 - водонабухающая уплотнительная прокладка;
- 4 - фасонные элементы шпонки;
- 5 - крепления шпонки к арматуре.

Еще одной модификацией гидроизоляционных шпонок являются шпонки так называемого "лабиринтного" типа (рис. 23 ж), которые могут иметь внутреннюю полость. Достоинством этого типа шпонок является простота монтажа. Если при установке плоских ленточных шпонок требуется использование разрезной торцевой опалубки, в которую при бетонировании закрепляется шпонка, то при монтаже "лабиринтных" шпонок их крепят к опалубке. После снятия опалубки и бетонировании сопрягаемой секции не требуется никаких дополнительных мероприятий, надежность соединения обеспечивается только тщательной укладкой бетонной смеси.

Широкое применение получили односторонние плоские гидротехнические шпонки с полкой П-образной центральной частью, предназначенной для восприятия деформаций сжатия/растяжения (рис. 23 з).

Такие шпонки в качестве контурного уплотнения могут устанавливаться как с наружной стороны, так и с внутренней стороны деформационного шва при бетонировании сопрягаемых элементов конструкций. Достоинством такого типа шпонок является то, что при их установке с наружной стороны конструкции они могут стыковаться с оклеечной гидроизоляцией, образуя замкнутый контур. К недостаткам следует отнести то, что, во-первых, эти шпонки устанавливаются в определенный зазор шва, во-вторых, при изменении плоскости расположения шпонки необходимо очень точное, вплоть до нескольких миллиметров, расположение фасонного элемента, что не всегда можно реализовать в построечных условиях. Кроме того, при

расположении шпонки на внешней, плоской горизонтальной стороне шва возникают трудности с омоноличиванием анкерных элементов. С помощью этих шпонок сложно получить высокое качество работ при бетонировании перекрытий, поэтому в основном их следует использовать для уплотнения швов в лотках, днище и стенах.

Особый интерес в номенклатуре гидротехнических шпонок представляет уплотнительный профиль объемных перемещений MASTERFLEX 2000 DK 12S (рис. 23и) фирмы MBT (Швейцария). В конструкции этого профиля, используемого в качестве мидельного уплотнения, совмещены достоинства варианта уплотнения швов с помощью двух гидроизоляционных лент и возможность омоноличивания при бетонировании элементов конструкций, а также независимость от величины установочного зазора деформационного шва. Материал профиля - пластифицированный ПВХ, который может надежно свариваться даже в построечных условиях. Он обладает относительным удлинением на разрыв 350% и высокой морозостойкостью.

Конструктивно профиль выполнен в виде двух полос переменной толщины, соединенных двумя U-образными петлями-компенсаторами длиной ~ 60 мм каждая. С наружной стороны вдоль полос профиля имеются по три T-образных анкерных элемента, обеспечивающих крепление профиля в бетоне боковых поверхностей зазора деформационного шва. Зазор деформационного шва формируется независимо от монтажа арматурного каркаса. Величина зазора деформационного шва задается при установке рабочих закладных элементов (заполнитель шва) и может составлять от 10 до 30 мм. В качестве закладных элементов обычно используются листы пенополистирола. Технологическая схема установки профиля в зазоре деформационного шва показана на рис. 25.

После установки профиля в зазоре деформационного шва располагаются две петли, которые обеспечивают двухступенчатую систему изоляции, причем при величине деформативности смежных элементов конструкции вплоть до 60 мм в профиле не возникает напряжений - петли изменяют свою конфигурацию, аналогично двум лентам, установленным с петлями-компенсаторами.

Уникальность конструкции профиля, его способность воспринимать значительные деформации как растяжения/сжатия, так и сдвига, простота технологии установки обеспечили профилю Masterflex 2000 DK 12S широкое применение. Только при обустройстве уплотнения деформационных швов тоннельных сооружений 3-го транспортного кольца нами было смонтировано более 3000 метров профиля.

При значительных деформациях растяжения, когда шпонки растягиваются и утоньшаются, или при наличии полостей в бетоне около шпонок, возникающих в результате некачественного бетонирования, возможна фильтрация воды по контакту "шпонка-бетон". Наибольшая вероятность образования полостей рядом со шпонкой возникает при бетонировании мидельных уплотнений в виде лент.

Для повышения надежности и качества уплотнения при установке шпонок в бетон, гидротехнические шпонки, особенно плоские, типа трехкулачковых, комбинируются со жгутами водонабухающего герметика или специального уплотнителя (рис. 26). Такие дополнительные элементы гидротехнических шпонок имеют хорошую адгезию как к самой шпонке, так и к бетону. Гидроизоляция контакта "шпонка-бетон" резко повышается, однако такая модификация шпонок значительно дороже обычных типов. В практике строительных работ, если в местах установки шпонок наблюдаются отдельные протечки, их, как правило, устраняют путем инъектирования гидроактивных пенополиуретанов.

Для правильной установки гидротехнических шпонок в процессе возведения конструкции необходимо соблюдать следующие требования:

1. Правильно расположить шпонку по отношению к сопрягаемым элементам конструкции. Если шпонка имеет центральную расширенную часть, воспринимающую деформации, то ее нужно располагать точно по оси шва, в его зазоре, иначе она не будет выполнять своих функций.

Большинство типов шпонок требуют использования разрезной торцевой опалубки (исключение составляют шпонки "лабиринтного" типа и односторонние шпонки). Шпонку следует прочно закрепить в опалубке и зафиксировать, например, привязав проволокой к арматуре.

Места сопряжения шпонки и опалубки должны быть хорошо уплотнены, чтобы при

бетонировании через них не вытекал цементный раствор.

2. Омоноличиваемые части шпонок должны быть чистыми. Загрязнение и замасливание не допускается, иначе не удастся добиться требуемой адгезии к бетону. Попадание посторонних предметов и инородных частиц на омоноличиваемые части шпонок также исключается.

3. Бетон около омоноличиваемых частей шпонок должен быть хорошо уплотнен. Это условие является одним из важнейших, поскольку эффективная работа гидроизоляционных шпонок любого типа зависит от качества контакта "шпонка-бетон", т.е. от качества уплотнения бетонной смеси. Важно, чтобы контакт бетона со шпонкой был по всей ее омоноличиваемой поверхности без наличия пустот и неплотностей.

4. Бетон сопрягаемых швом элементов конструкции должен обладать высокой плотностью и непроницаемостью. Большинство типов шпонок препятствуют сквозному прохождению воды через зазор шва, но они не обеспечивают защиту от фильтрации воды в обход шпонки, через поры, капилляры и трещины в бетоне.

5. При использовании гидротехнических шпонок зазор деформационного шва должен иметь не менее двух степеней защиты. Шпонки мидельного уплотнения швов, установленные в тело бетона, не обеспечивают полной герметизации, поэтому для подобного способа обустройства шва необходимо использовать и другие уплотняющие материалы и технические решения.

При уплотнении зазоров деформационных швов с помощью гидротехнических шпонок есть еще один момент, требующий особого внимания. Речь идет о стыковке отдельных кусков или отрезков шпонок. От целостности и прочности этих соединений зачастую зависит надежная эксплуатация всего уплотнения.

Учитывая сложность профиля поверхности шпонок, стыковка внахлест вообще недопустима, т.к. не позволяет обеспечить сплошность полотна шпонки. Возможно соединение шпонок только торцевой стыковкой. При этом использование гидротехнических шпонок из материала на основе ПВХ является предпочтительным, т.к. он достаточно легко сваривается.

Стыковку соединения шпонок из резины можно выполнять путем склеивания или горячей вулканизации с использованием т.н. "сырой" резины. При соединении резиновых шпонок с помощью клея прочность соединения в лучшем случае составляет 60-70% от прочности самого материала. Однако это весьма простой способ соединения, и его легко осуществить в условиях строительной площадки.

Прочность соединения отрезков резиновых шпонок путем вулканизации может даже превысить прочность самого материала, однако для выполнения этого вида работ требуется специальное оборудование и высокая квалификация персонала.

Как уже было отмечено, намного проще выполнять соединение отрезков шпонок из ПВХ-материала. Температура размягчения такого термопластичного материала, т. е. требуемая температура сварки, не превышает 200°C. Прочность такого квазисварного соединения, на самом деле это сплавление материала, достигает 90% от прочности исходного материала. Единственным ограничением при выполнении этих работ является требование к источнику нагрева материала. Запрещается использование открытого пламени, поскольку его прямое воздействие может изменить структуру материала и, соответственно, эксплуатационные характеристики.

В заключение следует уточнить еще два момента по применению гидротехнических шпонок при уплотнении деформационных швов. Во-первых, не следует использовать и стыковать в шве шпонки из материалов на разной основе, поскольку вследствие различия физических свойств они будут по-разному вести себя в процессе эксплуатации. Во-вторых, при обустройстве деформационных швов сложной конфигурации, наличии изгибов, поворотов, угловых, Т-образных, Х-образных участков все фасонные элементы уплотнения швов следует изготавливать в заводских условиях, при соблюдении всех требований технологии, а в условиях строительной площадки выполнять лишь прямолинейную стыковку отрезков шпонок.

Обустройство деформационных швов компрессионными уплотнителями

Компрессионные уплотнители - готовые, разделенные на секции изделия, изготавливаются методом экструзии из эластомерных материалов, чаще всего из резины, в том числе и на основе ЭПДМ. Для обеспечения эффективного уплотнения зазора деформационного шва, на его боковых поверхностях должно поддерживаться достаточное контактное давление. Это положение достигается условием постоянной работы уплотнения на некоторую степень сжатия (рис. 27).

Установлено, что разделенные на секции компрессионные уплотнители должны оставаться сжатыми приблизительно на 15% (при раскрытии шва составляющем 85% номинальной ширины уплотнителя) при максимальном растяжении шва для того, чтобы поддерживать достаточное для обеспечения герметизации контактное давление. Как правило, компрессионные уплотнители не должны сжиматься более чем на 50% (50% номинальной ширины уплотнителя) при максимальном сжатии шва, чтобы избежать чрезмерного сжатия и потери материалом уплотнителя упруго-эластичных свойств. Как установлено, такой предел сжимаемости и длительная безотказность обеспечиваются, когда внутренние напряжения от сжатия в уплотнителе обеспечивает контактное давление до 0,24 МПа. При более высоких величинах ускоряется процесс деструкции эластомерного уплотнителя.

Таким образом, допустимые деформации секционных компрессионных уплотнителей составляют 35-40% от ширины уплотнителя в несжатом состоянии.

Метод подбора типоразмера компрессионного уплотнителя и установочного размера зазора деформационного шва весьма простой. Графики (номограммы), иллюстрирующие пример подбора компрессионного уплотнителя для конкретных условий, приводятся в материалах АСИ (Американский институт бетона) [16] и представлены на рис. 28.

Порядок применения номограмм

В качестве примера рассматривается железобетонная конструкция из трех секций, причем в точке С конструкция жестко связана с основанием, в точке В секции конструкции связаны между собой, но опора подвижна, в точках А и Д обустройства деформационные швы с применением компрессионных уплотнителей. Длина деформирующихся секций 168 футов (51,2 м) и 80 футов (24,4 м) соответственно. Максимальный перепад температур, воздействующих на конструкцию, составляет 150Т (84°С). Компрессионные уплотнители устанавливаются при +65°F (+18,3°С) - температура "замыкания" швов.

Другие виды деформаций, кроме тепловых, не учитываются.

Метод использования номограмм

Вначале рассчитывается и строится зависимость деформации элементов конструкции при заданном перепаде температур.

На этой прямой находят ожидаемую величину деформаций $L\delta$ для точек А и Д - 2 дюйма (50,8 мм) и 0,95 дюйма (24,1 мм) соответственно. Затем, учитывая, что допустимая деформация компрессионных уплотнителей составляет 0,35 от номинальной ширины уплотнителя, определяют его необходимую номинальную ширину W_n , при дробной величине выбирают следующий стандартный размер компрессионного уплотнителя.

Далее переходят на левую шкалу правой части номограммы, соответствующую максимальной величине раскрытия зазора шва $W_{mm} = 0,85 W_n$, и от нее по наклонной линии передвигаются до точки пересечения с температурой установки, в данном случае +18,3°С (+65°F). Проекция этой точки пересечения на правую шкалу правой части номограммы, соответствующую минимальной величине раскрытия шва $W - 0,5 W_n$, и определяет необходимый установочный размер при обустройстве шва компрессионным уплотнителем при данной температуре.

Данный метод может оказаться полезным при выборе величины зазора шва для установки уплотнителей другого типа.

Номенклатура типоразмеров компрессионных уплотнителей достаточно широкая - изделия выпускаются шириной от 6 до 150 мм и поставляются в рулонах длиной до 50 метров. Стыковку отдельных кусков уплотнителей, а также изготовление фасонных элементов, осуществляют с

помощью клея или вулканизацией.

Наиболее эффективны компрессионные уплотнители при изоляции швов на горизонтальных поверхностях. Возможно их применение на наклонных и вертикальных поверхностях.

Основные трудности при установке таких изделий связаны с подготовкой внутренних боковых поверхностей шва перед их монтажом. Поверхности шва должны быть прочными и ровными. Отклонение плоскостности боковых поверхностей шва не должно превышать $\pm 5\%$ от величины обустраиваемого зазора. Достаточно часто такую систему уплотнения зазора деформационного шва монтируют в специально установленных закладных элементах, как показано на рис. 27 б, 31 з.

Как следует из приведенного материала, основной особенностью компрессионных уплотнителей является то, что в процессе эксплуатации они все время находятся в сжатом состоянии. Исходя из этого, профиль боковых поверхностей уплотнителей, как правило, ровный и плоский. Естественно, что адгезия такой поверхности к внутренним боковым поверхностям зазора шва, даже если при монтаже использовать клеевые составы, достаточно низкая и при сверхнормативном увеличении величины зазора шва возможна потеря такой системой уплотнения своей изолирующей способности.

Не допустить возникновения такой ситуации позволяет применение еще одного типа компрессионных уплотнителей.

Эта модификация компрессионных уплотнителей изготавливается в виде трубчатого или коробчатого профиля. В отличие от обычных типов в этих профилях уменьшено количество внутренних секций до 1 или 2 (рис. 29). Кроме этого, такие изделия имеют сильно развитые, профилированные, боковые поверхности. При монтаже такого профиля на клеевой состав за счет большой площади контакта возрастает величина сцепления профиля с основанием. В процессе установки профиля в зазор шва, на время твердения клеевого состава, внутри полых секций профиля повышают давление до 0,1 МПа, за счет этого повышая качество клеевого соединения.

Компрессионные уплотнители такого типа выпускаются шириной от 10 до 100 мм, но чаще всего применяются уплотнители шириной от 15 до 75 мм. Они обладают способностью воспринимать деформации $\pm 50\%$ от номинального размера шва. При монтаже уплотнителей в зазоре деформационного шва используются клеевые составы на основе эпоксидных смол или полиуретанов. Для защиты профилей от механических повреждений в зонах с высокими нагрузками они могут закрываться накладками (рис. 30), но обычно они устанавливаются без защиты.

Универсальность этих профилей, к которым относится профиль "Гармония", позволяет их устанавливать в зазоры деформационных швов между сопрягаемыми элементами из самых различных материалов. Некоторые из возможных вариантов установки профиля "Гармония" приведены на рис. 31.

Нами накоплен большой опыт применения профиля "Гармония" для уплотнения деформационных швов в самых различных условиях. Так, например, профиль "Гармония" был использован для уплотнения деформационных швов железобетонных труб ливневого стока под транспортным тоннелем; уплотнения стыков между железобетонными блоками барьерного ограждения проезжей части метромоста в Лужниках (установлено 1100 метров профиля); уплотнения зазоров деформационных швов между железобетонными плитами трибун различных стадионов (установлено более 3000 метров профиля) и многих других объектов.

При выборе устанавливаемого типоразмера профиля должны учитываться как взаимные горизонтальные перемещения сопрягаемых элементов конструкции от тепловых деформаций, так и вертикальные, сдвиговые деформации при возможных просадках конструкции. Компенсация возникающих перемещений обеспечивается специальным подбором соотношения: "размер профиля - величина зазора деформационного шва" с учетом температуры конструкции на момент установки профиля. Подбор этого соотношения выполняется аналогично условиям и методам, приведенным ранее для компрессионных уплотнителей.

Существенное значение при разработке конструктивного решения обустройства деформационного шва таким типом профилей имеют прочностные характеристики и целостность кромок сопрягаемых элементов конструкции, их способность воспринимать эксплуатационные

нагрузки. При этом должен решаться вопрос о необходимости устройства переходной зоны, ее размерах, используемом материале, необходимости установки дополнительных элементов для защиты зоны деформационного шва и профиля от механических воздействий.

Свойства материала, из которого изготовлен профиль "Гармония", и универсальность применяемых клеев обеспечивают простую, быструю и надежную технологию соединения отдельных отрезков профиля как в заводских, так и в условиях строительной площадки. Прочность склеенного соединения составляет ~ 90% механической прочности самого профиля. Использование простейших шаблонов позволяет формировать соединения отрезков профиля "Гармония" самых различных типов, в том числе и из разных типоразмеров профиля.

Профильное уплотнение "Гармония", которое установлено в деформационный шов с соблюдением всех технологических требований, длительное время не требует замены или ремонта. В то же время отдельные отрезки профиля заменяются очень быстро, что обеспечивает большую свободу действий как при поэтапном ведении работ при новом строительстве, так и при проведении ремонтно-восстановительных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В техническом отношении любое сооружение, в том числе и подземное, является весьма сложным формированием. На всех этапах его существования, начиная с возведения и заканчивая ликвидацией, существует совершенно определенная взаимосвязь между его отдельными частями. Только внешне сооружение кажется неподвижным.

В действительности любое сооружение - как в целом, так и его отдельные части и элементы - находится в более или менее постоянном движении, которое вызвано изменениями объема, статическими воздействиями строительных конструкций, динамическими воздействиями от внешних периодических нагрузок, деформациями основания и фундамента и пр. Действие сил от этих воздействий концентрируется в наиболее слабых местах, особенно в стыках конструкций, а также в местах, где происходит изменение формы сооружения или его отдельных элементов или изменения структуры строительного материала.

Перечисленные воздействия являются основными причинами возникновения напряжений и деформаций в конструкции сооружения и его отдельных частей. Качество возведения и долговечность сооружения, особенно из сборных элементов, непосредственно связаны с решением вопросов по обустройству необходимых стыков и швов для всех конструкций и элементов, из которых оно состоит. Сопряжение отдельных строительных элементов из материалов с неодинаковой долговечностью и физическими свойствами предъявляет особенно высокие требования к техническому решению стыков. Любой стык в сборном сооружении следует рассматривать с учетом статических и динамических воздействий, что часто приводит к необходимости устройства свободного деформационного шва.

В техническом отношении решение по обустройству швов и стыков, основанное на строгом определении их функционального назначения, является сложной задачей. Можно указать на ряд факторов, осложняющих решение, влияние которых до сих пор исследуется и уточняется. К ним относятся: влияние продолжительности строительства на возникновение деформаций; определение необходимых допусков элементов конструкций и сооружения в целом; уменьшение жесткости сооружения; осадка сооружения; усадка и увеличение объема строительных материалов и т.п.

Известно, что большая часть дефектов проявляется в виде деформаций элементов и возникновении трещин. Повреждение стыка или возникновение трещины наступают в тот момент, когда напряжение, вызванное различными причинами, превышает предел по несущей способности материала конструкции.

Исходя из этого, важной проблемой при проектировании сооружений, а тем более подземных, является задача по обустройству стыков и швов, где концентрируются и/или релаксируются напряжения вследствие деформаций от различного вида нагрузок.

В подземных сооружениях элемент уплотнения шва или стыка чаще всего является частью гидроизоляционной мембраны сооружения и должен сохранять ее сплошность и обеспечивать

надежную защиту от внешних воздействий.

Как правило, современные сооружения изготавливаются из бетона с маркой по водонепроницаемости не ниже W4 и поэтому наиболее уязвимы для воздействия окружающей среды именно в местах возникновения трещин, наличия стыков, швов и т.п. Для защиты от воды эти узлы конструкций имеют решающее значение.

Рассмотренные явления деформаций строительных конструкций достаточно серьезны и могут, если их не учесть при проектировании и не оценить их воздействие на элементы конструкции деформационных швов, привести к повреждениям в процессе эксплуатации.

Учет и оценка возможных деформаций элементов строительных конструкций в первую очередь должны выполняться на первой стадии - стадии проектирования. Вторая стадия этого положения осуществляется при выполнении работ по обустройству деформационных швов.

Основные положения при проектировании и разработке конструкции деформационных швов можно сформулировать в виде пяти основных заданий на проектирование.

Первое задание на проектирование состоит в определении функционального назначения деформационного шва.

Прежде чем приступить к проектированию и обустройству системы деформационного шва, необходимо определить его основное предназначение в зависимости от места установки и характера ожидаемых деформаций, локализующихся в зазоре деформационного шва.

Конструкция системы деформационного шва не должна препятствовать возможным перемещениям в шве.

Уплотнительный элемент деформационного шва должен быть достаточно эластичным и долговечным. В большинстве случаев должна гарантироваться водонепроницаемость.

На основании этих требований в зависимости от основных конструктивных и эксплуатационных требований деформационные швы по функциональному назначению можно при проектировании подразделить на следующие группы:

а) по направлению движения:

- по восприятию движения, перпендикулярно к плоскости шва;
- по восприятию вертикального перемещения;
- по восприятию движения вдоль плоскости шва;
- по восприятию различных видов кручения;
- по восприятию различных комбинаций всех упомянутых видов движения;

б) по изоляционным требованиям:

- закрытые швы, уплотненные;
- закрытые швы, с декомпрессионной пустотой;
- открытые швы, частично уплотненные;

в) по месту расположения в конструкции сооружения:

- в конструкциях покрытия;
- в конструкциях перекрытия;
- в конструкциях вертикальных несущих стен;
- в конструкциях фундаментов;
- на фасадных частях конструкций;

г) по виду конструкций субстрата:

- в блочных конструкциях;
- в сборных железобетонных конструкциях;

- в монолитных железобетонных конструкциях;
- в стальных конструкциях;
- в любом возможном сочетании упомянутых конструкций;

д) по виду уплотнительного материала:

- о уплотняемые мастиками и герметиками;
- о уплотняемые различными полимерными лентами;
- о уплотняемые различными профилями, шпонками, муфтами;
- о уплотняемые листовыми материалами;
- о устраиваемые сочетанием этих видов уплотнений.

Второе задание на проектирование состоит в определении

на основании анализа возможных причин и характера работы шва для прогнозируемых деформаций конструкции. В результате выполнения этого задания определяются количественные характеристики всех воздействующих нагрузок, исходные параметры элементов конструкции деформационного шва.

Третье задание на проектирование включает в себя проектный расчет параметров и размеров конструкции деформационного шва. Исходными данными для выполнения этого расчета являются результаты, полученные при выполнении 2-го задания на проектирование. При расчете определяется величина зазора деформационного шва в зависимости от времени и условий возведения конструкции. Также в зависимости от характера и величин воздействующих нагрузок рассчитываются значения деформаций, воспринимаемых уплотнительным элементом деформационного шва в процессе эксплуатации.

Четвертое задание на проектирование заключается в определении основных требований к уплотнительным элементам деформационного шва. Прежде всего в зависимости от требуемой степени надежности и ответственности конструкции устанавливается количество ступеней защиты в зазоре деформационного шва. В соответствии с этим определяются конструктивные требования к уплотнительным элементам деформационного шва, такие, которые будут обеспечивать надежную работу данного узла конструкции в процессе эксплуатации при:

- уравнивании или снятии деформаций конструкции;
- наличии дополнительной защиты;
- специальной защите;
- отсутствии герметичности;
- необходимости герметичности;
- наличии системы водоотвода;
- отсутствии системы водоотвода.

Кроме того, определяется необходимость сопряжения уплотнительных элементов деформационного шва с гидроизоляционной мембраной в системе гидроизоляции сооружения. На основании этих требований устанавливаются порядок и способы монтажа уплотнительных элементов конструкции деформационного шва.

Пятое задание на проектирование заключается в подборе вида и типа материалов уплотнительных элементов, технические и эксплуатационные характеристики которых отвечают всем требованиям проекта. При подборе этих материалов следует учесть, что они должны обеспечивать необходимый коэффициент запаса надежности. После выбора уплотнительных материалов уточняются технология и условия их монтажа.

Блок-схема выполнения этих заданий представлена на рис. 32.

Результатом проектирования являются рабочие чертежи конструкции деформационного шва и регламент на выполнение работ по его установке. Помимо основных конструктивных решений проектные материалы должны содержать указания по:

- типу и характеристикам материала уплотнения;
- величине устраиваемого зазора деформационного шва;
- температуре устройства зазора шва;

Э.Л.Дешко. - М., Стройиздат, 1982. - 295 с, ил.

5. Волдржих Ф. Деформационные швы в конструкциях наземных зданий. Пер. с чешек. - М., Стройиздат, 1978. - 224 с, ил.

6. Зиневич А.М., Козловская АА. Антикоррозионные покрытия. - М., Стройиздат, 1989. - 112 с, ил. - (Наука - строит, пр-ву), - ISBN 5-274-00562-4.

7. ГОСТ 4.250-79. Строительство. Бетонные и железобетонные изделия и конструкции. Номенклатура показателей.

8. ГОСТ 4.212-80. Бетоны. Номенклатура показателей.

9. Физический энциклопедический словарь. Гл. ред.: Б.А.Введенский, Б.М.Бул. - М., Советская энциклопедия, 1966 (Энциклопедии. Словари. Справочники). Т.т. I-V.

10. СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия.

11. СНиП 23-01-99. Строительная климатология.

12. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии.

13. Попченко С.Н. Гидроизоляция сооружений и зданий. Л., Стройиздат, Ленинг.отд-ние, 1981. - 304 с, ил.

14. Schutz, Raymond J. Shape Factor in Joint Design, Civil Engineering - ASCE, V.32, № 10. Oct. 1962, pp. 32-36.

15. Ramberger G. Structural Bearings and Expansion Joints for Bridges - Zurich, Switzerland, IABSE-AIPC-IVBH, 2002 -92p,-ISBN3-85748-105-6.

16. ACI Conunittee 504, Guide to Sealing Joints in Concrete Structures, ACI 504R-90, Manual of Concrete Practice, 1999, part 5.

17. СН 528-80. Перечень единиц физических величин, подлежащих применению в строительстве, Москва, 1981.

18. Энциклопедия полимеров. Гл. ред. В.А.Кабанов. - М., "Советская энциклопедия", 1974. (Энциклопедии. Словари. Справочники), т. 2, 1032 стр.

19. British Standards Institution. BS ISO 11600; 2002. Building construction. Jointing products. Classification and requirements for sealants. 16 pp.

20. British Adhesives and Sealants Association (BASA). Guide to 11600 Classification of sealants, 1999, 10pp.