

Р. А. МЕЛЬНИК, В. И. ФЕДОРЧУК

## ДЕФОРМАЦИИ УСАДКИ И ПОЛЗУЧЕСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОТЕРИ ПРЕДНАПРЯЖЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНО ОБЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Экспериментальное исследование указанных в заголовке вопросов проведено авторами с 1967 по 1969 г. в ДИСИ по оригинальной программе, учитывающей отсутствие подобных исследований, особенно с учетом нелинейной ползучести бетона. Длительным испытаниям подвергнуты образцы размерами  $100 \times 100 \times 1400$  мм: ЭУ — бетонные — для изучения усадки — 4 шт. из бетона М-600 и 3 шт. — М-700; ЭП — железобетонные преднапряженные — для исследования усадки и ползучести и их влияния на потери напряжений при центральном обжатии — 24 и 30 шт. соответственно из бетонов М-600 и 700. В каждой из 10 для каждой марки бетона групп было, как правило, два или три элемента, и лишь в двух группах — по одному. В нескольких группах были также близнецы с изолированной от влагопотерь поверхностью — по два образца, а в группе с проектным уровнем  $\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{пр}} R_{\text{пр}} = 0.50$  было две подгруппы неизолированных образцов — по два (М-600) и три (М-700) элемента. Гамма уровней создавалась для изучения линейной (условно-линейной) и нелинейной ползучести бетонов марок 600 и 700.

Для получения бетонов применены: цемент — портландский Злобнуновского ЦШК,  $R_c = 513$  кг/см<sup>2</sup>\* по ГОСТ 10178 — 62, расход 440 и 595 кг соответственно для М-600 и 700; песок — кварцевый Просляновского карьера,  $M_s = 3.2$ , объемная и удельная массы 1420 и 2510 кг/м<sup>3</sup>; щебень — гранитный из карьера Пенизевичи, крупность до 20 мм, объемная и удельная массы 1390 (1420 для М-700) и 2590 кг/м<sup>3</sup>; вода — речная днепровская; пластификатор — ССБ, расход 1 л на 1 м<sup>3</sup> смеси бетона. Для бетона М-600 применен номинальный состав смеси 1:1.09:2.97, полевой — 1:1.18:3.00. ВЦ = 0.4, удобоукладываемость 45 сек. То же для бетона М-700: 1:0.94:1.64; 1:1.02:1.68; 0.34; 60 сек.

Приготовление и виброукладку бетонной смеси осуществляли в производственных условиях Днепропетровского ЗМЖБК. Опытные образцы бетонируются на открытом стенде. Разреженные пучки арматуры с натяжением на упоры выполняли из высокопрочной проволоки класса Вр-11 (ГОСТ 8480-63)  $\phi$  5 мм, при этом обеспечено дис-

\* Рекомендованная размерность, как и кг/см<sup>2</sup> ( $\approx 10^{-1}$  Мн/м<sup>2</sup> по системе СИ).

первое армирование образцов ЭП. Контроль натяжения арматуры домкратами двойного действия ДП 55 — 300 выполняли по манометрам насосной станции и по динамометрам с помощью электронно-измерительной установки АИ-1, а также выборочно на ряде проволок — по датчикам сопротивления и электронным частотомером ИПН-6.

При достижении бетоном 70% прочности произведен мгновенный отпуск арматуры с упоров. Замеры деформаций по двум противоположным граням образцов (и уроне срединного слоя) выполняли на бляхах 500 мм переносным индикатором часового типа с ценой деления шкалы 0.01 мм. После отпуска арматуры часть образцов парализовали (слой 1—3 мм парафина, обмалка солидолом, обертка и два слоя калькой) и установили в вертикальном положении в стеллажи на 400 см. Температура воздуха в помещении лаборатории в период длительных наблюдений была на уровне  $19.5 \pm 5.5^\circ\text{C}$  и  $22.5 \pm 7.5^\circ\text{C}$  соответственно при испытаниях образцов из бетонов М-600 и 700, а влажность —  $60 \pm 19\%$ . Кроме основных образцов испытаны также контрольные кубы и призмы для определения прочности, модуля упругости и длительной деформативности бетонов при сжатии с разными уровнями постоянной нагрузки.

В момент отпуска арматуры образцов ЭП из бетона М-600 ( $\tau = 10$  сут.) его прочность в кубах с ребром 100 и 200 мм достигла 455 и 405 кгс/см<sup>2</sup>, а в призмах размерами 100x100x400 мм — 360 кгс/см<sup>2</sup>. Эти характеристики для бетона М-700 ( $\tau_0 = 15$  сут.) составили соответственно 577, 495 и 470 кгс/см<sup>2</sup>. В возрасте 28 сут. эти бетоны в указанных образцах набрали прочность (по порядку): 659, 588 и 494 кгс/см<sup>2</sup>; 763, 694 и 541 кгс/см<sup>2</sup>. При этом модули упругости достигли 395000 и 398000 кгс/см<sup>2</sup>, а к моментам обжатия составляли 312000 и 370000 кгс/см<sup>2</sup>, соответственно. Во всех случаях средний опытный модуль упругости арматуры класса Вр-IE 2  $\cdot 10^6$  кгс/см<sup>2</sup>.

Контролируемые напряжения, замеренные разными способами, оказались близко совпадающими, а неравномерность натяжения отдельных проволок в пучке составила  $\pm 3.5\%$ . Потери напряжений арматуры от релаксации  $\tau_{nr}$  были близки к вычисленным по СНиП [4] (табл. 1), а от деформаций анкеров  $\tau_{ad}$  — выше теоретических. Эти два вида потерь введены в общие потери напряжений.

Определение потерь напряжений арматуры производилось из условия совместности деформаций ее и бетона. Построенные таким образом графики потерь вызванных полными деформациями бетонов, приведены на фиг. 1 и 2. В изображенных графически процессах для образцов без изоляции отмечается наиболее интенсивное нарастание деформаций и потерь в первые 90 (для М-600) и 60 (для М-700) суток, а к 20 суткам они практически стабилизировались. Характер роста и стабилизации величин деформаций и потерь качественно совпадает для бетонов обеих марок. Некоторое превышение этих ха-

характеристик в образцах из бетона М-700 над таковыми для бетона М-600, очевидно, связано с большой разницей в расходе цемента на 1 м<sup>3</sup> смеси.

Таблица 2

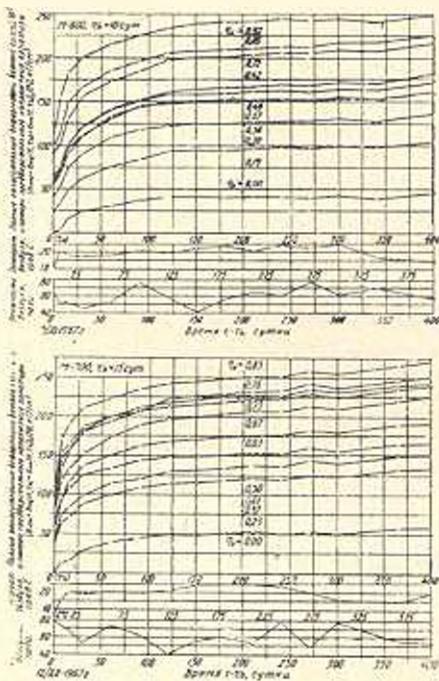
Марка бетона, вид образцов ЭП	Уровни обжатия бе- тона		Процент арми- рования, %	Примечание ссылка на табл. 1	Напряжения и потери напряже- ния, кгс/см <sup>2</sup>					Начальное упругое N <sub>0</sub>
	про- цент	действ. тепловой			$\sigma_{\text{нп}}$	$\sigma_{\text{пр}}$ ( $\sigma_3$ )	$\sigma_{\text{пн}}$ ( $\sigma_4$ )	$\sigma_{\text{пл}}$	$\sigma_{\text{го}}$	
М-600, гидратированные	0.30	0.19	1.19	106.3	6450	0	380	6070	167	7140
	0.40	0.30	2.02	109.5	6450	0	380	6070	109	11900
	0.50	0.38	2.65	120.9	6450	0	380	6070	138	16600
	0.50	0.37	1.93	114.1	8570	274	542	7754	133	15200
	0.60	0.42	2.23	120.6	8570	274	542	7754	151	18200
	0.70	0.49	2.65	121.0	8570	274	542	7754	176	21300
	0.80	0.72	2.97	125.0	11470	915	187	10368	259	32600
	0.90	0.83	3.52	122.9	11470	915	187	10368	298	36600
1.00	0.92	3.96	124.1	11470	915	187	10368	329	40900	
М-600, негидратированные	0.30	0.18	1.12	112.0	6270	0	242	6028	63	7100
	0.40	0.29	1.98	111.6	6270	0	242	6028	106	11800
	0.50	0.37	2.56	123.9	6270	0	242	6028	135	16500
М-700, гидратированные	0.30	0.23	1.81	118.8	6660	41	—	6619	109	12900
	0.40	0.32	2.61	120.1	6660	41	—	6619	151	18200
	0.50	0.41	3.44	121.8	6660	41	—	6619	192	23400
	0.50	0.50	2.20	115.5	12890	1355	—	11535	234	27000
	0.60	0.67	3.18	115.8	12890	1355	—	11535	313	36200
	0.70	0.73	3.53	119.2	12890	1355	—	11535	342	40700
	0.80	0.63	3.34	124.8	11300	904	—	10396	294	36700
	0.90	0.76	4.18	126.1	11300	904	—	10396	356	44800
1.00	0.83	4.96	125.8	11300	904	—	10396	390	49000	
М-700, негидратированные	0.30	0.25	1.94	115.5	6660	41	—	6619	117	12900
	0.40	0.32	2.60	120.6	6660	41	—	6619	152	18200
	0.50	0.40	3.43	122.1	6660	41	—	6619	191	23400
	0.80	0.62	3.28	126.7	11300	904	—	10396	250	36700
	1.00	0.79	4.47	131.8	11300	904	—	10396	372	49000

Примечание: Контролируемые напряжения арматуры образцов (М-700) приняты за вычетом потерь напряжений от деформаций анкеров, величина которых не была зафиксирована.

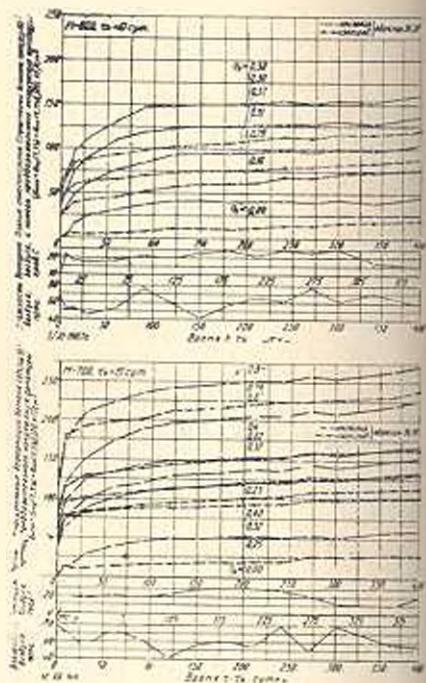
Расположение кривых в зависимости от величины уровня обжатия закономерно, хотя и отмечаются отклонения от нормы и позиции кривых (фиг. 1) для уровней 0.49 и 0.72 (бетон М-600) и 0.76 (М-700), опытные данные по которым получены на одном для каждого уровня образце.

Наибольшие величины полных потерь напряжений арматуры  $\sigma_{\text{пл}}$  (табл. 2) по отношению к ее начальному напряжению  $\sigma_{\text{нп}}$  в образцах из бетона М-600 для всей гаммы уровней составили 34.5—53.0% или в среднем 44.1%. Для бетона М-700—33.1—52.3%, в среднем 44.2%. Из рассмотрения кривых для бетона М-600 при уровнях 0.37 и 0.38 видно, что большая разница в проценте армирования об-

разцов этих двух подгрупп (проектный уровень обжатия 0.50) практически не влияет на величины полных деформаций бетона и обусловленных ими потерь напряжений арматуры.



Фиг. 1. Опытные графики полных (средних по группе образцов) относительных деформаций неизолированных бетонов М-600 и 700 и вызванных ими потерь напряжений арматуры, совмещенные с кривыми температуры и влажности воздуха.



Фиг. 2. Опытные графики полных (средних по группе образцов) относительных деформаций изолированных и неизолированных бетонов М-600 и 700 и вызванных ими потерь напряжений арматуры, совмещенные с кривыми температуры и влажности воздуха.

Сопоставление опытных данных для бетонов с изоляцией и без нее показывает (фиг. 2), что процессы нарастания во времени рассматриваемых величин заметно различны. Если и первые 7 сут. полные деформации и потери напряжений изолированных образцов были равны (или близки), либо выше, чем неизолированных близнецов, то затем эти величины оказались намного меньше аналогичных для бетонов без изоляции. Однако затухания процессов деформирования не обнаружено даже к концу наблюдений. Изоляция поверхности бетонов М-600 вызвала снижение исследуемых характеристик к 400 суткам действия обжатия при низких и средних уровнях и среднем на 27.2% что значительно превышает соответствующие цифры для бетона М-400 [7]. В образцах из бетона М-700 такое снижение достигло 23.3%, а при самом высоком уровне обжатия составило лишь 11.7%. Наибольшие величины полных потерь напряжений арматуры изолированные

образцов из бетона М-600 по отношению к начальным ее напряжениям составили по порядку увеличения уровней (табл. 2): 25.3, 28.9, 40.0%, и для бетона М-700 — 30.8, 34.3, 39.8, 31.5, 46.2%. В этом смысле различие между бетонами М-600 и 700 мало.

Таблица 2

Марка бетона, вид опытных образцов ЭП	Деформативные уровни обжатия бетона $\epsilon_0$	Потери предварительного напряжения арматуры, кгс/см <sup>2</sup>						Отноше- ние в % $\frac{\sigma_{\text{пот}}}{\sigma_{\text{об.п}}}$	Установив- шиеся на- пряжения (кгс/см <sup>2</sup> ) и усадка ( $\mu$ ) арматуры	
		$\sigma_{\text{пред}}$	$\sigma_{\text{с1}}$	$\sigma_{\text{с2}}$	$\sigma_{\text{с1+с2}}$	$\sigma_{\text{пол}}$	$\sigma_{\text{об.п}}$		$\mu_{\text{п}}$	$\mu_{\text{с}}$
М-600, чеканованные	0.19	466	912	714	1626	2092	2472	38.3	3978	4670
	0.30	324	912	1002	1914	2738	3118	48.3	3332	6530
	0.37	1100	912	1224	2136	3236	4052	47.3	4518	8860
	0.38	1164	912	1140	2052	3216	3596	55.8	2854	7800
	0.42	1240	912	1498	2410	3650	4466	52.1	4114	9660
	0.49	1320	912	1210	2122	3442	4258	49.7	4312	11800
	0.72	1840	912	1598	2510	4350	5452	47.6	6018	18900
	0.83	1966	912	1642	2556	4520	5622	45.0	5848	20600
0.92	2210	912	1650	2564	4772	5874	51.2	5596	22300	
М-600, экранированные	0.18	480	398	648	1046	1526	1768	28.2	4502	5300
	0.27	740	398	804	1202	1712	1984	31.6	4286	8400
	0.37	980	398	1030	1428	2408	2650	42.2	3620	9920
М-700, чеканованные	0.23	748	1188	748	1936	2684	2725	41.0	3935	7710
	0.32	930	1188	1022	2210	3140	3181	47.7	2369	6520
	0.41	1120	1188	1018	2206	3326	3367	50.5	2193	7740
	0.50	1326	1188	1320	2508	3834	5189	40.3	7701	18020
	0.63	1650	1188	1698	2886	4536	5440	48.2	5760	20300
	0.67	1922	1188	1700	2888	4810	6165	47.8	6725	21100
	0.73	1978	1188	1710	2898	4876	6231	48.4	6659	23500
	0.76	2000	1188	1856	3044	5044	5948	52.5	5352	23050
	0.83	2206	1188	2042	3230	5436	6340	56.1	4960	23400
М-700, экранированные	0.25	812	560	672	1232	2044	2085	31.3	4575	8550
	0.32	966	560	746	1306	2272	2313	34.7	4347	11910
	0.40	1230	560	848	1408	2638	2679	40.2	3981	14060
	0.62	1560	560	1154	1714	3274	4178	37.0	7122	25150
	0.79	2400	560	1840	1714	4800	5704	50.5	5596	26300

Потери напряжений арматуры от деформаций упругого обжатия бетонов  $\epsilon_{\text{об.п}}$  (табл. 2) почти линейно зависели от величины уровней обжатия. Некоторое отклонение от линейной связи обнаружено при высоких уровнях, что вызвано интенсивным неупругим деформированием бетона в первые минуты после создания обжатия. Эта почти линейная связь определяется начальными напряжениями в бетоне (табл. 1) и начальным его модулем упругости.

Средние отношения потерь напряжений от упругого обжатия к начальным напряжениям и к соответствующим полным потерям  $\sigma_{\text{пол}}$  к концу периода наблюдений соответственно составили: 14.3 и 36.8% (М-600), 15.1 и 39.3% (М-700). И здесь различие между бетонами двух смежных марок незначительно.

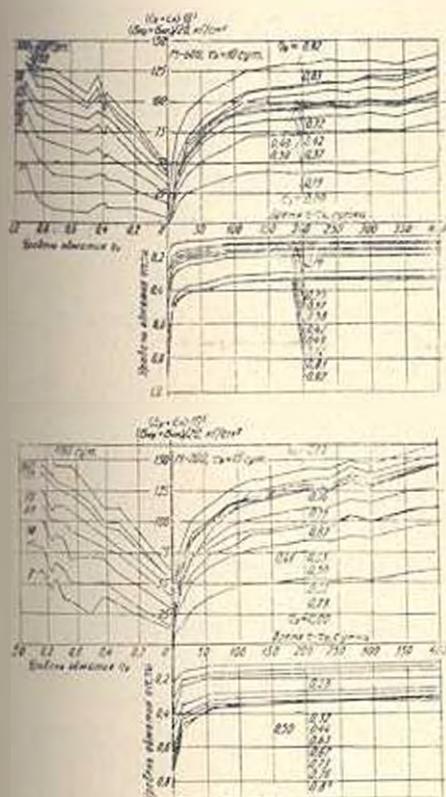
Из рассмотрения семейства кривых суммарных деформаций (и потерь  $\varepsilon_{\text{сж}} - \varepsilon_{\text{нат}}$ ) в функции времени (фиг. 3) видно, что усадка бетона без изоляции ощутимо влияет на характер длительных процессов. Наиболее интенсивно деформации бетона во времени и вызванными ими потери напряжений нарастают в первые 60—90 сут., а затем — к 120 суткам стабилизируются, особенно в образцах из бетона М-600, и в дальнейшем изменения их величины вызывались колебаниями температурно-влажностного режима воздуха. Сближение рядов кривых при высоких уровнях обжатия вызвано резким падением притяжения арматуры, особенно в первые минуты и часы после отпуска ее с упоров. Этим можно объяснить также сближение соответствующих ветвей семейства кривых текущих уровней обжатия  $\varepsilon(t, \tau_0)$ , при рассмотрении которых видно, что с точки зрения относительного минимума величины потерь напряжений оптимальными начальными уровнями обжатия для бетонов обеих марок следует считать  $\tau_0 = 0.7 - 0.8$ . Это согласуется с данными для бетона М-400 [7].

Характер семейства кривых суммарных деформаций и вызванными ими потери напряжений в функции уровня обжатия  $\tau_0$  образцов из бетона М-600 указывает на наличие нелинейной связи, особенно при  $\tau_0 > 0.50$ , причем со временем нелинейность полностью затухает в образцах без изоляции. Для бетона М-700 нелинейная зависимость четко отмечается в начале наблюдений при уровнях  $\tau_0 > 0.40$ . Замечая, что к концу наблюдений при высоких уровнях обжатия появляется даже нелинейность обратного знака — кривые (фиг. 3) располагаются выпуклостью вверх. Это происходит из-за резкого спада во времени напряжений обжатия. Такое явление отмечается нами впервые.

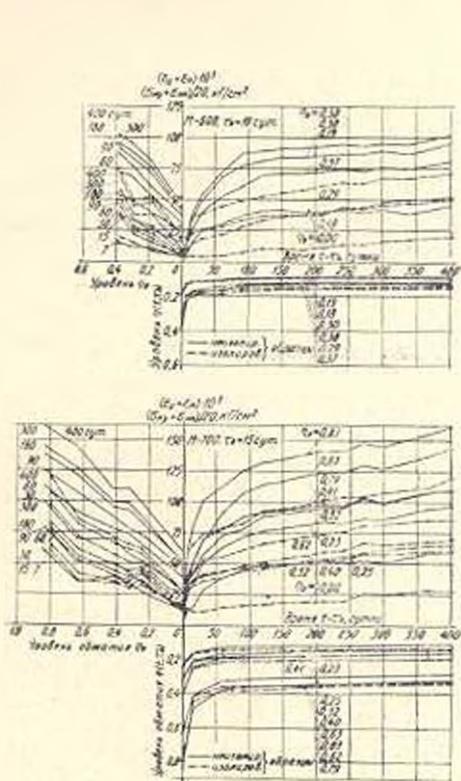
Наибольшие величины суммарных потерь напряжений арматуры по отношению к полным составили 54.4—77.8% для бетона М-600 и 59.4—72.2% — М-700. Эти отношения снижаются при повышении уровня обжатия. Средние значения отношений этих потерь к начальным напряжениям арматуры составили 31.2 (М-600) и 28.7% (М-700). Как видно, указанные показатели для обеих марок близки.

Из рассмотрения графиков на фиг. 4 можно заключить, что высказанные выше замечания по полным деформациям бетона с изоляцией и без нее и вызванным ими потерям напряжений арматуры в полной мере справедливы и в данном случае. В конце наблюдений в образцах из бетона М-600 с изоляцией потери напряжений арматуры от суммарных деформаций усадки и ползучести бетона оказались ниже, чем в близнецах без изоляции в среднем на 37.6%. Отношения наибольших величин потерь напряжений к полным выразились в среднем 65.6%, а к начальным напряжениям арматуры — 20.3%. Для бетона М-700 отношения, аналогичные только что указанным, составили соответственно: 36.0, 54.8, 19.8%. Следует особо отметить, что для бетонов М-600 и 700 при самых низких уровнях обжатия разница между суммарными деформациями неизолированных и изолиро-

ванных элементов ЭП и любой момент периода наблюдений равно разности между деформациями усадки образцов без изоляции и с изоляцией. Это, как и ранее [7], указывает на аддитивность деформаций усадки и ползучести бетонов при относительно низких уровнях обжатия, когда усилия снижаются во времени по закону релаксации. В этом случае убедительно подтверждаются выводы К. С. Карапетяна и П. А. Котикина [6]. Отмеченное явление (фиг. 4, а также фиг. 2) отсутствует при более высоких уровнях обжатия, что согласуется с выводами С. В. Александровского [1], исключая, естественно, низкие уровни, на которые эти выводы также распространялись.



Фиг. 3. Опытные графики суммарных (средних по группе образцов) относительных деформаций усадки и ползучести неизолированных бетонов М-600 и 700 и вызванных ими потерь напряжений арматуры в функции времени и начального уровня обжатия, совмещенные с кривыми текущих уровней обжатия.



Фиг. 4. Опытные графики суммарных (средних по группе образцов) относительных деформаций усадки и ползучести изолированных и неизолированных бетонов М-600 и 700 и вызванных ими потерь напряжений арматуры в функции времени и начального уровня обжатия, совмещенные с кривыми текущих уровней обжатия.

Из графиков (фиг. 4) рассматриваемых деформаций видно, что нелинейная зависимость имеет место даже при низких уровнях обжатия, хотя со временем и имеет тенденцию к полному затуханию. Характер снижения текущих уровней обжатия в изолированных элементах

тах ЭП сходен с таковым в неизолированных. Однако установившиеся к концу наблюдений значения оказались из-за влияния изоляции несколько выше соответствующих при отсутствии изоляции (фиг. 3). Оптимальные уровни обжатия можно принять равными выше отмеченным, то есть 0.7 — 0.8.

Характер кривых усадки бетонов (фиг. 1—4) в определенной мере зависит от наличия изоляции поверхности образцов. При отсутствии изоляции графики имеют три характерных участка: до 30 сут. интенсивное нарастание деформаций, с 30 до 120 сут. — более замедленное, со 120 сут. и до конца наблюдений — стабилизация процесса с наличием определенных колебаний, вызванных изменениями температуры и влажности воздуха. В изолированных образцах ЭУ характер самопроизвольного деформирования таков, что его можно отнести всецело за счет деформаций геля цементного камня, в противоположность бетону М-400 с таким же типом изоляции [7].

Потери напряжений арматуры от усадки неизолированного бетона к концу наблюдений  $\epsilon_{\text{ар}}$  (табл. 2) оказались гораздо выше вычисленных по СНиП [4] (табл. 3), при этом для бетона М-700 они превысили соответствующую величину в бетоне М-600 на 30.3%. Это связано с повышенным содержанием цемента в высокопрочном бетоне по сравнению с обычными бетонами.

К концу наблюдений усадка изолированного бетона М-600 составила  $19.9 \cdot 10^{-3}$ , что в два с лишним раза меньше, чем в бетоне без изоляции. Соответствующее значение в бетоне М-700 оказалось на 40.8% выше указанной величины усадки бетона М-600, и примерно в два раза ниже, чем при отсутствии изоляции. Опытные потери напряжений арматуры от усадки бетона также отличаются от вычисленных (табл. 3).

Деформации ползучести бетонов и вызванные ими потери преднатяжения арматуры  $\epsilon_{\text{п}}$  получены путем вычитания деформаций усадки и обусловленных ими потерь напряжений из соответствующих суммарных деформаций и потерь. Кривые рассматриваемых характеристик для бетонов без изоляции (фиг. 5) располагаются, как правило, в соответствии с начальными уровнями обжатия. К концу наблюдений некоторые из кривых незначительно сблизились, что, очевидно, вызвано (исключая данные испытаний при одном опытном образце) несовершенством приема получения деформаций ползучести в условиях неаддитивности их и деформаций усадки бетона при высоких уровнях обжатия, на что указывает также факт заметного влияния колебаний температурно-влажностного режима воздуха на характер кривых ползучести.

Из рассмотрения семейства кривых (фиг. 5), определяющих зависимость исследуемых величин от уровня обжатия, видно, что резко выраженная нелинейность имеет место при  $\epsilon_{\text{об}} > 0.50$  и 0.40 соответственно для бетонов М-600 и 700, однако со временем она заметна

смягчается. Это подтверждает ранее сделанные выводы А. А. Гвоздева [3], К. С. Карапетяна [5], И. И. Улицкого [8]. Весьма характерным в данном случае является то, что нелинейность полностью затухает и даже переходит при высоких уровнях в полную качествен-

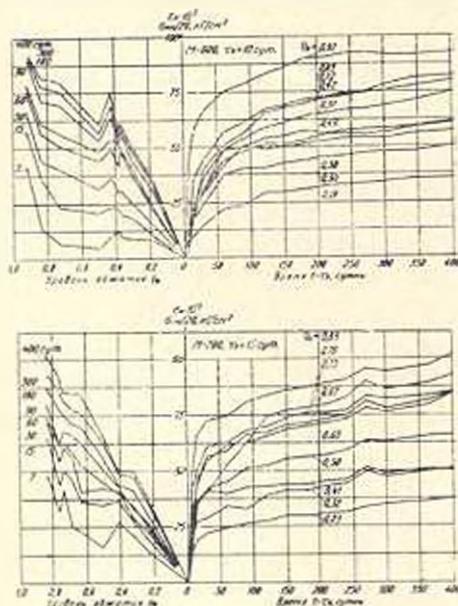
Таблица 3

Марка бетона, вид образцов ЭУ и ЭП	Уровень обжатия	Вычисленные согласно СНиП II-V. 1-62 [4] потери преднапряжения арматуры ( $\sigma_{\text{ср}} \text{ см}$ ) от усадки и ползучести высокопрочных бетонов и расхождение в % по отношению к опытными величинам за время (в сутках) действия обжатия $t-t_0$				
		15	30	90	180	400
М-600, испаривающиеся	0.00	166/ 47.5	300/ 40.0	389/ 48.3	428/ 47.3	492/ 46.0
	0.19	258/ 22.9	468/ 55.0	608/ 28.8	702/ 14.0	768/ 7.6
	0.30	419/ 16.4	759/ 54.3	985/ 22.2	1139/ 30.0	1243/ 24.1
	0.37	514/ 30.5	930/ 51.5	1209/ 20.9	1396/ 22.2	1525/ 21.6
	0.38	523/ 15.7	947/ 61.0	1230/ 20.8	1422/ 38.9	1553/ 36.3
	0.42	582/ 25.4	1055/ 45.7	1370/ 27.2	1482/ 23.8	1730/ 15.5
	0.49	679/ 66.4	1230/ 97.1	1597/ 66.4	1845/ 72.8	2018/ 66.8
	0.72	1646/ 256.8	2982/ 271.0	3870/ 244.0	4470/ 222.0	4890/ 205.6
	0.83	2250/ 212.5	4075/ 361.0	5290/ 333.0	6110/ 329.0	6690/ 307.0
0.92	2735/ 137.2	4950/ 274.0	6420/ 308.0	7415/ 358.0	8110/ 337.0	
М-600, испаривающиеся	0.00	166/ 80.1	300/ 257.5	389/ 156.0	428/ 114.0	492/ 23.0
	0.18	244/ 14.0	442/ 52.4	574/ 36.7	664/ 20.7	724/ 11.7
	0.29	408/ 14.6	738/ 65.9	959/ 83.1	1108/ 96.5	1212/ 100.1
	0.37	521/ 16.5	945/ 36.6	1226/ 45.3	1418/ 48.3	1550/ 50.5
М-700, испаривающиеся	0.00	166/ 42.1	300/ 47.4	389/ 57.0	428/ 58.4	492/ 58.7
	0.23	341/ 9.8	617/ 39.6	802/ 51.7	925/ 55.2	1011/ 35.2
	0.32	475/ 13.3	860/ 49.3	1117/ 69.7	1290/ 57.0	1410/ 37.9
	0.41	602/ 17.5	1091/ 33.4	1418/ 66.8	1637/ 87.0	1789/ 75.9
	0.50	723/ 4.5	1328/ 57.8	1722/ 68.8	1990/ 77.3	2178/ 65.0
	0.63	1320/ 89.8	2475/ 205.0	3210/ 157.9	3715/ 165.5	4055/ 138.9
	0.67	1592/ 74.3	2885/ 156.2	3745/ 167.9	4335/ 210.0	4740/ 178.9
	0.73	1955/ 90.3	3540/ 192.5	4595/ 215.0	5305/ 249.0	5800/ 239.0
	0.76	2130/ 144.0	3860/ 256.0	5005/ 301.5	5790/ 270.5	6330/ 241.0
0.83	2565/ 95.5	4650/ 220.0	6030/ 274.0	6970/ 299.5	7620/ 273.0	
М-700, испаривающиеся	0.00	166/ 23.3	300/ 35.1	389/ 21.6	428/ 12.6	492/ 12.1
	0.25	366/ 28.2	664/ 10.3	862/ 39.0	996/ 56.5	1092/ 62.5
	0.32	475/ 12.0	860/ 74.8	1117/ 98.7	1290/ 102.2	1413/ 89.4
	0.40	600/ 22.4	1089/ 90.4	1411/ 119.0	1631/ 117.5	1785/ 110.7
	0.62	1309/ 111.0	2365/ 187.2	3070/ 241.0	3550/ 236.3	3880/ 236.0
	0.79	2315/ 113.8	4230/ 237.0	5490/ 311.5	6340/ 302.8	6960/ 278.0

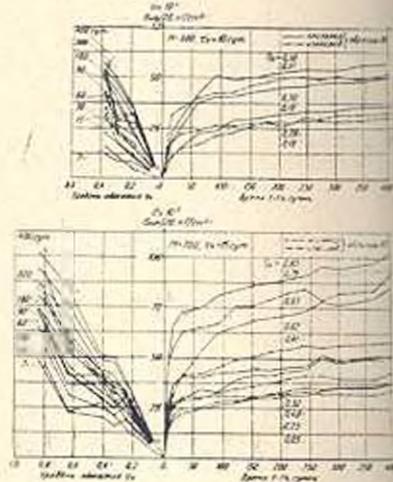
Примечание: Вычисленные значения приведены в числителе, в знаменателе — процент расхождения по отношению к опытными величинам потерь, принятым за 100%.

ную форму — участки кривых располагаются выпуклостью вверх. Такой кажущийся парадоксальным эффект вполне закономерен, так как нелинейность рассматривается относительно начального уровня снижающихся во времени по закону релаксации сжимающих напряжений. Картина оказывается подобной ранее отмеченной К. С. Карапетяном [5] и др. для условий постоянных напряжений, если деформации ползучести отнести к текущим напряжениям или к их относительным уровням.

Наибольшие величины потерь напряжений арматуры от ползучести бетона М-600 без изоляции по отношению к полным потерям и начальным напряжениям составляют в среднем 33,8 и 16,3%, соответственно. Аналогичные значения для бетона М-700 выражаются 34,2 и 14,2%. Как видно из табл. 2, величины потерь напряжений арматуры от ползучести бетона М-700 несколько выше, чем для бетона М-600, что определяется расходом цемента.



Фиг. 5. Опытные графики средних по группе образцов относительных деформаций ползучести неизолированных бетонов М-600 и 700 и вызванных ими потерь напряжений арматуры и функции времени и начального уровня обжатия.



Фиг. 6. Опытные графики средних по группе образцов относительных деформаций ползучести изолированных бетонов М-600 и 700 и вызванных ими потерь напряжений арматуры [в функции времени и начального уровня обжатия].

Из рассмотрения графиков исследуемых процессов и функций уровня обжатия (фиг. 6) видно, что имеет место нелинейная зависимость даже при самом низком из испытанных уровней  $\sigma_0$  и образцах с изоляцией, чего нельзя сказать о бетонах с неизолированной поверхностью. К концу наблюдений потери напряжений в изолированных образцах из бетона М-600 были в среднем на 12,8% ниже, чем в неизолированных, составив от величины полных потерь и начальных напряжений в среднем 43,8 и 13,7%, соответственно. Аналогичные значения для бетона М-700 выразились 19,2; 34,3 и 22,6%.

Изменение влажности воздуха практически не влияет на ползучесть бетона с изоляцией. Так, например, резкое снижение влажности воздуха к 270 суткам наблюдений (с 79 до 49%) и некоторое падение

температуры (на 8 С) вызвало заметное уменьшение ползучести в бетоне М-700 с изоляцией, и повышение ее — при отсутствии изоляции.

Общие потери напряжений арматуры неизолированных образцов ЭП относительно более высоки, чем в соответствующих близнецах с изоляцией (табл. 2).

Сопоставление опытных величин потерь напряжений арматуры от усадки и ползучести бетонов с вычисленными по СНиП [4] показывает (табл. 3), что методика расчета по нормам не обеспечивает надлежащей точности применительно к высокопрочным бетонам, особенно при высоких уровнях обжатия, так как эти бетоны обладают сравнительно умеренной нелинейностью, а это не учитывается формулами норм. В этом смысле хороший результат обеспечивают формулы теории старения [8], выведенные на основе функции напряжений Н. Х. Арутюняна [2], а также новые формулы, полученные первым из авторов статьи с применением предложенной им функции напряжений в виде одночленной параболической зависимости степени  $n = 2$  или 1.5.

Днепропетровский инженерно-строительный институт

Получила 3 XI 1970

В. А. МЕЛИСЬ, Д. Е. ЗВЯНЦОВА

ԲԱՐՁՐ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ԲԵՏՈՆՆԵՐԻ ԿՐԻՄԱՆ, ՈՒ ՍՈՂՔԻ ԳԵՅՈՐԾԱՑՈՒՄՆԵՐԸ  
ԵՎ ՆՐԱՆՑ ԱԶԳԻՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԿՈՆՏՐՈՆԱԿԱՆ ՇՐՋԱՍԵՂՄՎԱՍՏ ՏԱՐՐԵՐԻ  
ՆԱԽՆԱԿԱՆ ԼՈՐՎԱԾՔԻ ԿՈՐՈՒՄՏՆԵՐԻ ՎՐԱ

Ա Վ Փ Ա Փ Ո Վ

Հոդվածում լուսարանվում են բարձր ամրության М-600 և 700 բետոնների (մեկուսացումով և առանց մեկուսացման) կծկման և սողքի (զծային, ս, զծային) լրիվ ու զուամարային զեֆորմացիաների փորձնական հետազոտության արդյունքները և Եր-Մ դասի արմատության նախնական լարվածքի նշանցով պայմանավորված կորուսաները երկաթբետոնյա տարրերի կենտրոնական չրջասեղման դածր, միջին և բարձր մակարդակների դեպքում:

Ստացված են լրացուցիչ սեղիկություններ բետոնի կծկման և սողքի զեֆորմացիաների ադիաբիություն մասին սեղմման դածր մակարդակի դեպքում ոչ ադիաբիություն մասին՝ միջին և բարձր մակարդակների դեպքում: Ինքզում են սեղմման մակարդակների օպտիմալ փորձնական մեծությունները, որոնք կազմում են բետոնի պրիդմային ամրության 70—80%:

Համաձայն СНиП 11-В. 1-62 հաշված М-600 և 700 բետոնների լարումների կորուսաները կծկումից և սողքից խիստ տարբերվում են փորձնականից, որ էջում է սոյլ փաստի հաշվածման անհրաժեշտությունը նոր նորմաների կազմման մամունակ:

## THE DEFORMATIONS OF SHRINKAGE AND CREEP OF HIGH-STRENGTH CONCRETES AND THEIR INFLUENCE ON THE LOSSES OF THE PRESTRESSING OF AXIALLY PRESTRESSED ELEMENTS

R. A. MELNIK, V. I. PHEDORCHUK

### S u m m a r y

The article deals with the results of research high-strength low and high portland cement concretes M—600 and 700 of two distinctive compositions with 440 and 595 kg of the cement in  $1 m^3$  of the concrete mixture. The peculiarity of the experiments is the study of deformation of shrinkage and creep (linear, conditionally-linear and nonlinear) of high-strength concretes in axially prestressed elements uninsulated and insulated from moisture losses measuring  $100 \times 100 \times 100 mm$  as well as the influence of these deformations on the losses of prestressing under the conditions of prolonged influence of low, mean and high levels of prestressing, created by high tensile steel wire of periodical type with different percentages of reinforcement of cross-sections.

Sharp distinction in consumption of portland cement M—500 in high-strength concretes of two adjacent marks 600 and 700 results in certain qualitative and quantitative peculiarities of prolonged deformation. Thus, the shrinkage of concrete M—700 is higher than that of concrete M—600, and the extent of the nonlinear creep in the function of the initial level of prestressing is lower.

It is noted that in due course nonlinearity of creep fades and turns at high levels into new qualitative form: the proper sections of curves are disposed with convexity upwards relative to the axis of abscissa. This effect is natural, because nonlinearity of the creep is examined in the function of initial level of prestressing, coming down according to the law of relaxation such effect will be absent, if the deformation of the creep is taken to the current levels of stresses.

The insulation of the surface of the concrete noticeably brings down its shrinkage and creep, and unelastic deformation of the concrete one can liken to its behaviour in a large massive.

In these experiments the additivity of deformations of shrinkage and creep of concretes under low levels of prestressing and the non-additivity—under mean and high—are noted. The experimental quantities of optimum levels of prestressing, making up to 70–80 percent of prism strength of concretes, are found. The loss of stresses due to shrinkage and creep calculated by current rates sharply differs from experimental, especially at high levels of prestressing, because these concretes possess moderate nonlinearity, and the formulas of rates don't take it into account. In this respect a good result was obtained

by the well-known formula of the theory of ageing, deduced by I. I. Ulitsky with the use of the function of stresses of N. Kh. Arutunian, and also by new formulas, deduced by the first of the authors of this article with the use of his function of stresses, in the form of a monomial parabolical dependence of exponent 2 or 1.5.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александровский С. В. О влиянии длительного действия внешней нагрузки на режим высыхания и усадку бетона. Сб. трудов НИИЖБ „Исследование свойств бетона и железобетонных конструкций“, вып. 4. Госстройиздат, М., 1959.
2. Арутунян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехтеориздат, М.—Л., 1952.
3. Гвоздев А. А. Ползучесть бетона и пути ее исследования. Сб. статей ЦНИИС „Исследование прочности, пластичности и ползучести строительных материалов“. Госстройиздат, М., 1955.
4. Госстрой СССР. Строительные нормы и правила, ч. II, раздел В, гл. 1, Бетонные и железобетонные конструкции, Нормы проектирования (СНиП II—В. 1—62). Госстройиздат, М., 1962.
5. Карапетян К. С. Влияние старения бетона на зависимость между напряжениями и деформациями ползучести. Изв. АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, т. 12, № 4, 1959.
6. Карапетян К. С., Котикян Р. А. Влияние масштабного фактора на усадку бетона и зависимости от влажности среды. Изв. АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, т. 17, № 2, 1964.
7. Медвильник Р. А. Экспериментальное исследование влияния нелинейной ползучести бетона на потери предварительного напряжения. Сб. „Строительные конструкции“, вып. 5. Изд. Будівельник, К., 1967.
8. Улицкий И. И., Фанстель И. В. Определение потерь предварительного напряжения в железобетонных элементах при нелинейной ползучести бетона. Изв. вузов МВО СССР. „Строительство и архитектура“, № 9, Новосибирск, 1959.