

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Доцент Н. М. МОЛОКАНОВ

БЕССЕКЦИОННОЕ БЕТОНИРОВАНИЕ И РАННЕЕ
РАСКРУЖАЛИВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
РАСПОРНЫХ АРОК И СВОДОВ БОЛЬШИХ
ПРОЛЕТОВ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВС
1962

Доцент Н. М. МОЛОКАНОВ

1730 p

БЕССЕКЦИОННОЕ БЕТОНИРОВАНИЕ И РАННЕЕ
РАСКРУЖАЛИВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
РАСПОРНЫХ АРОК И СВОДОВ БОЛЬШИХ
ПРОЛЕТОВ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ВВЕДЕНИЕ

Развитие сети железных и автомобильных дорог связано со строительством искусственных сооружений и, в частности, с постройкой железобетонных мостов. Только в текущем семилетии необходимо построить свыше 63 тысяч мостов и малых искусственных сооружений, из них 650 больших и внеклассных мостов и более 2650 средних мостов и путепроводов. Общий объем бетонной и железобетонной кладки составит 5,7 млн. кубометров, что примерно вчетверо превышает объем работ за предыдущее семилетие.

Наиболее рациональное применение монолитного железобетона имеет место в строительстве арочных мостов средних и больших пролетов.

Строительство больших железобетонных арочных мостов, начавшееся в СССР постройкой в 1930 г. моста через Днепр у Днепропетровска на железнодорожной линии Мерефа—Херсон, выявило их значительную трудоемкость. Сроки строительства были очень длительными, а расход лесоматериалов — высокий.

На сооружение одного пролетного строения средней величины (45 м) требовалось 106 календарных дней, а сооружение большого пролета (120 м) продолжалось 480 дней. Причем, устройство подмостей кружал по трудоемкости составляло 36—54% всех трудовых затрат, связанных с возведением пролетных строений.

В послевоенный период в системе Главмостостроя при строительстве железобетонных арочных мостов получили широкое применение инвентарные металлические кружала, кабель-краны, крупноблочная опалубка и арматура, а также поточный способ производства работ. Все это значительно сократило сроки и уменьшило трудоемкость работ по сооружению железобетонных арочных мостов.

Однако после постройки уникальных мостов через Днепр сооружение железобетонных арочных мостов под железнодорожную нагрузку у нас приостановилось (если не считать сооружение моста через Оку у Горького, который выполнен

в сборном железобетоне). В то же время строительство железобетонных арочных мостов под автодорожную нагрузку не прекращается. При этом внедряется сборный железобетон в виде отдельных блоков арок. Такие блоки иногда доводятся до размера полуарок (в мостах пролетом до 50—60 м). Изготовление блоков, как правило, производится на полигонах строительных площадок.

Такое решение не всегда экономически целесообразно, так как оно не исключает «мокрых» процессов на строительстве и необходимости сооружения подмостей кружал в пролетах при монтажных блоках меньше полуарок. В последнем случае требуется устраивать плавучие подмости или промежуточные опоры. Таким образом, появляется необходимость в организации двух самостоятельных процессов: 1) «мокрого» процесса по изготовлению элементов сборного железобетона на полигонах, единовременные затраты на которые не окупаются из-за сравнительно малого количества элементов; 2) монтажных работ в пролетах с применением мощных транспортных средств, кранов и строповочных устройств, использование которых ограничивается данной стройкой.

В связи с вышеизложенным автору представляется наиболее рациональным при сооружении железобетонных арочных мостов применять сборно-монолитные конструкции, когда арки выполняются из монолитного, а надарочные строения и проезжая часть из сборного железобетона. При этом должны использоваться современные достижения науки и техники для совершенствования технологии собственно бетонных работ в пролете по сооружению арок. Здесь имеется в виду замена существующего секционного способа бетонирования арок и сводов новым, более прогрессивным, бессекционным способом (без членения арок или сводов на секции бетонирования) и сочетание последнего с ранним раскружаливанием.

1. СЕКЦИОННОЕ БЕТОНИРОВАНИЕ АРОК И СВОДОВ

При сооружении массивных арочных мостов применяется исторически сложившийся секционный способ бетонирования арок, позволяющий исключить появление нежелательных напряжений в сечениях арок от деформаций подмостей-кружал, а также уменьшить проявление последствий усадки бетона.

Арки пролетом свыше 20 м разбиваются на секции бетонирования длиной 8—12 м, а между ними оставляются замыкающие клинья длиной около 1 м. Бетонирование клиньев допускается после полного окончания бетонирования секции и семидневной выстойки соседних секций.

Раскружаливание арок разрешается производить при достижении бетоном 70%-й проектной прочности.

Технологические перерывы при сооружении арок пролетом более 20 м составляют 21 сутки: 7 суток — перерыв между бе-

тонированием секций и замыкающих клиньев; 14 суток — для нарастания прочности бетона до 70%-й проектной прочности перед раскружаливанием.

Кроме того, секционный способ вызывает дополнительные расходы, вызванные:

1) постановкой опалубки для образования секций бетонирования и удалением ее;

2) обработкой торцов секций и подготовкой «клиньев» к бетонированию;

3) бетонированием замыкающих «клиньев», требующих специальной технологии для обеспечения должного сопряжения вновь укладываемого бетона с бетоном секций (чем круче арка, тем сложнее технология);

4) созданием влажной среды для бетона арок (замыкающих клиньев) на более длительный срок в связи с удлинением срока выдержки арок на кружалах в течение 7—10 дней;

5) организацией на одном пролете бетонных работ минимум в два приема — по бетонированию секций и бетонированию замыкающих клиньев, производимых с разрывом в 7—10 дней.

6) расходом средств на оплату аренды инвентарных кружал, которые дополнительно задерживаются в каждом пролете до 30 дней — на срок технологических разрывов и выполнения дополнительных работ, связанных с секционным способом бетонирования.

Помимо этого, нельзя умолчать и о конструктивном недостатке, присущем секционному способу бетонирования арок, — наличию большого количества швов, которые по своей прочности всегда ниже прочности бетона монолита и наиболее чувствительны к проявлению последствий усадки бетона, что может являться причиной возникновения дефектных мест в конструкции в период ее эксплуатации.

2. БЕССЕКЦИОННОЕ БЕТОНИРОВАНИЕ АРОК

Все это вместе взятое побудило автора еще в 1949 — 1950 гг. при строительстве многопролетного железобетонного моста отказаться от секционного бетонирования и заменить его бессекционным при сооружении распорных арок длиной 29,0 и 52,0 м.

Бессекционное бетонирование производилось за один прием с симметричной укладкой бетона от пят к замку. Была получена бесшовная конструкция, сокращен срок сооружения арок и занятости инвентарных кружал в пролете на 20%, уменьшен расход лесоматериалов на 8% и рабочей силы на 5%. Бессекционным способом были забетонированы бесшарнирные арки $l=29,0$ м в одиннадцати пролетах и $l=52,0$ м в шести пролетах.

Таблица 1

Основные размеры арок

Наименование	$l=29,0 \text{ м}$	$l=52,0 \text{ м}$
Расчетный пролет, м	29,0	52,0
Расчетная стрела, м	14,5	13,0
Пологость арок	1/2	1/4
Сечение арок прямоугольное, м:		
а) в замке	0,8×0,8	1,2×0,9
б) в четверти пролета	1,02×0,8	1,44×0,9
в) в пьете	1,6×0,8	2,15×0,9
Объем бетона в арках М200 и М250, м ³	90,0	190

Бетонирование арок $l=52 \text{ м}$ в одном пролете производилось в среднем за 64 ч.

Опыт указанного строительства послужил основанием к расширению области бетонирования железобетонных арок и сводов без деления их на секции, что получило отражение в ТУСМ-58. Здесь допускается бессекционное бетонирование арок пролетом до 50 м. Однако при этом требуется, чтобы прогиб замка кружал с арочными фермами при полной или частичной загрузке их бетоном не превышал 1/3000 пролета.

Такое требование фактически исключает применение этого способа в практике мостостроения, так как и при пролетах арок или сводов до 50 м проектирование кружал с расчетным прогибом в 1/3000 пролете приведет к их утяжелению, которое значительно, если не совсем, снизит технико-экономическую эффективность применения бессекционного бетонирования арок.

Ограничения бессекционного бетонирования величиной пролета до 50 м необоснованы, а требования к жесткости кружал завышены. Это доказано автором на практике. Бессекционное бетонирование бесшарнирных арок пролетом 52 м на упомянутом строительстве производилось на металлических кружалах, запроектированных из инвентарных элементов Мостотреста, с расчетным прогибом замка, не превышающим 1/1000 пролета. Фактически прогибы кружал, замеренные в различных стадиях бессекционного бетонирования арок, составили: в замке в пределах $-8+2 \text{ мм}$ («-» подъем и «+» опускание), или до 1/6300 l , и в четверти пролета до $+9 \text{ мм}$, или 1/5580 l . Уменьшение фактических прогибов кружал объясняется тем, что при бессекционном бетонировании арок тангенциальная составляющая от веса бетона передается на опоры и

тем самым уменьшается нагрузка на кружала. Уменьшение нагрузки на кружала будет тем больше, чем круче арки.

Кроме того, по мере бетонирования и нарастания прочности бетона забетонированные части арок вступают в работу. Их можно рассматривать как балки: при шарнирных арках, шарнирно закрепленные на опорах, а при бесшарнирных — защемленные, и вторыми концами свободно лежащие на кружалах. При этом в промежуточных стадиях бетонирования кружала воспринимают на себя от забетонированных частей арок воздействие в виде опорной реакции от собственного веса балок соответствующей системы, т. е. значительная часть нагрузки передается на опоры.

Подсчитанные при этом прогибы имеют наибольшую сходимость с фактически замеренными.

В 1961 г. по предложению автора на строительстве городского моста через Волгу в Рыбинске в двух пролетах железобетонные трехшарнирные арки пролетом 78 м были забетонированы без членения на секции.

Трехшарнирные арки со стрелой подъема 10,5 м (пологость 1/7,5) имеют по всей длине пролета постоянное П-образное сечение высотой 1,8 м с толщиной стенок и ригеля 20 см. Объем бетона М450 в одной арке составляет 200 м³. Бетонирование арки было произведено за 64 ч.

Бессекционное бетонирование арок производилось на металлических кружалах, запроектированных из инвентарных элементов Мостотреста, с расчетным (упругим) прогибом в 1/825 пролета. Фактически замеренный прогиб в замке составил 49 мм, или 1/1550 пролета, т. е. значительно меньше расчетного.

Здесь впервые в практике мостостроения было произведено раннее раскружаливание арок: раскружаливание одной арки было произведено через шесть, а второй через двое суток после окончания их бетонирования.

Возможность раннего раскружаливания арок нами установлена на основании работ проф. А. В. Саталкина, опубликованных в 1956 г. в книге «Раннее нагружение бетона и железобетона в мостостроении». В работах убедительно доказана не только возможность, но и желательность нагружения бетона в раннем возрасте, так как это повышает его прочностные характеристики. Оптимальная интенсивность нагружения, выраженная в долях от временного сопротивления бетона в момент загрузки, должна составлять $\sigma_6 = 0,3 R_6$, а критическая (после чего бетон разупрочняется) — $\sigma_6 = 0,6 R_6$. Исходя из этого, раскружаливание можно производить при достижении бетоном временного сопротивления в пределах

$$\frac{\sigma_6}{0,3} > R_6 > \frac{\sigma_6}{0,6}.$$

где σ_6 — наибольшее напряжение в сечениях арок от собственного веса в момент раскружаливания;

R_6 — временное сопротивление бетона в это же время.

В нашем случае раскружаливание было произведено через двое суток после окончания бетонирования при $R_6 = 170 \text{ кг/см}^2$ и $\sigma_6 = 55 \text{ кг/см}^2$, т. е. σ_6 составляло $0,32R_6$.

На этом же строительстве нами была доказана возможность бессекционного бетонирования и раннего раскружаливания трехшарнирных арок пролетом $l = 124,0 \text{ м}$.

Основные размеры арок

Железобетонные пролетные строения имеют трехшарнирные арки двутаврового сечения постоянной величины по длине пролета.

Расчетный пролет арки $l = 124 \text{ м}$ ($f = 30,87 \text{ м}$, $\frac{f}{l} = \frac{1}{4}$), высота арки $2,5 \text{ м}$, ширина полки $1,5 \text{ м}$, толщина полки $0,5 \text{ м}$. Объем бетона М500 в арках 640 м^3 . В пролете располагаются две арки. Расстояние между их осями составляет 14 м .

Основные данные по кружалам

Металлические кружала, запроектированные из инвентарных элементов, представляют из себя трехшарнирную арку с расчетным пролетом $l = 120,24$ и $f = 30,38 \text{ м}$. В поперечном направлении кружала состоят из десяти плоских ферм, объединенных продольными и поперечными связями, а в пятовой части до узла 17 — из одиннадцати ферм.

Для полного выявления деформаций кружал, рассчитанных как трехшарнирные арки, определены их прогибы от постоянной нагрузки (собственный вес с обстройкой и опалубкой) и временной, причем последняя была разделена на две группы — нагрузка от веса распорок и подвесок с обустройствами для бетонирования подвесной проезжей части, и нагрузка от бетона собственно арок. Последняя в свою очередь рассматривалась в двух вариантах: 1) симметричное загрузление кружал от пят к замку в предположении, что бетон «зыбкий» груз (не схватившийся, свободно следующий за деформациями кружал); 2) в промежуточных стадиях бетонирования забетонированные части арок рассматриваются как жесткие балки, воздействующие на кружала опорной реакцией от собственного веса.

Прогиб кружал в замке составил: от постоянной нагрузки $+52,1 \text{ мм}$, или $1/2300$ пролета; от веса распорок с подвесками $+37,5 \text{ мм}$, или $1/3200$. Суммарный прогиб от этих нагрузок равен $+89,6 \text{ мм}$, или $1/1350$ пролета.

Прогибы кружал от бетона собственно арок по первому варианту в процессе бетонирования изменялись: в $1/6$ пролета

в пределах от +23,3 до 79,9 мм, в замке от -146,2 до +19,6 мм. По второму варианту в промежуточных стадиях бетонирования прогибы изменялись: в 1/6 пролета от +53,1 до 55,7 мм, в замке от -89,6 до -91,8 мм. При полном нагружении кружал бетоном арки прогибы составили: в 1/6 пролета 23,3, в замке 19,6 мм. Таким образом, суммарный прогиб кружал в замке составил 109,2 мм, или 1/1100 пролета.

Плавное изменение прогибов кружал и их незначительная величина (особенно от бетона собственно арок) не вызывают сомнений в возможности бессекционного бетонирования арок пролетом 124,0 м.

Напряженное состояние в арках в процессе их бетонирования

Для выявления напряжений в сечениях арок в промежуточных стадиях их бессекционного бетонирования нами произведены поверочные расчеты для всех рассмотренных арок. Расчеты показали, что эти напряжения в большинстве случаев не только меньше растягивающих, которые вызывают появление микротрещин, но и меньше допустимых для бетона соответствующей марки в раннем возрасте.

Во время бетонирования арок $l=78$ м измерялись деформации арматуры. Вычисленные по этим деформациям напряжения в бетоне качественно подтвердили правильность наших предположений, позволяющих в промежуточных стадиях рассматривать забетонированные части арок как балки соответствующей системы.

Визуальные наблюдения в процессе строительства, а также в течение эксплуатации (арки пролетом 19, 29 и 52 м эксплуатируются свыше 10 лет) свидетельствуют о том, что бессекционное бетонирование позволяет получать конструкции лучшего качества — бетон арок монолитный (без швов бетонирования), на его поверхности нет никаких трещин.

* *

По инициативе автора и при его непосредственном участии бессекционный способ бетонирования арок был применен в следующих случаях:

1) при бетонировании двух фасадных бесшарнирных арок пролетом 19 м Днепропетровского вокзала;

2) при бетонировании бесшарнирных арок пролетных строений моста через Днепр длиной 29 м в одиннадцати пролетах (22 арки) и 52 м в шести пролетах (12 арок);

3) при бетонировании трехшарнирных арок пролетных строений моста через Волгу в Рыбинске длиной 78 м в двух пролетах моста (4 арки). В последнем случае бессекционное бетонирование сочеталось с ранним раскружаливанием арок.

Арки раскружались через 6 и 2-е суток после окончания их бетонирования.

Кроме этого, автором изучена возможность бессекционного бетонирования и раннего раскружания арок длиной 124 м, при этом рассматривались арки как трехшарнирные, так и бесшарнирные.

Во всех случаях арки бетонировали (кроме арок пролетом 19 и 29 м) на металлических кружалах, запроектированных из инвентарных элементов Мостотреста с расчетным прогибом в замке 1/1000 пролета.

Бессекционное бетонирование в сочетании с ранним раскружанием арок, помимо повышения качества конструкций, исключает ряд работ, связанных с образованием секций и бетонированием замыкающих клиньев, резко сокращает технологические перерывы, связанные с отдельным бетонированием секций и замыкающих клиньев и длительной выстойкой арок на кружалах до их раскружания, что улучшает технологию работ, сокращает сроки и стоимость строительства.

Современные способы получения высокопрочных и быстротвердеющих бетонов должны значительно повысить эффективность бессекционного бетонирования и раннего раскружания арок как в мостостроении, так и в промышленном строительстве.

3. Экономический эффект бессекционного бетонирования и раннего раскружания арок и сводов

Для выявления экономического эффекта бессекционного бетонирования и раннего раскружания составлены графики работ по сооружению арок пролетом 29, 52, 73 и 106 и 124 м в двух вариантах: при секционном бетонировании с обычными сроками раскружания и бессекционным бетонировании с ранним раскружанием.

При секционном бетонировании приняты следующие технологические перерывы: выстойка секций до бетонирования «клиньев» при любой величине пролета — 3-е суток; выдерживание арок на кружалах после бетонирования «клиньев» — 7 суток для пролетов до 78 м и 14 для остальных. Распалубка во всех случаях по времени производится в период выдерживания арок на кружалах.

Кружала для пролетов 29 и 52 м монтируются полуарками с пловучих подмостей. В остальных пролетах монтаж производится в полунавес с помощью кабель-кранов. Основные показатели графиков сведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что бессекционное бетонирование и раннее раскружание за счет сокращения технологических перерывов и исключения работ по устройству замыкающих «клиньев» значительно снижает общие сроки работ по соору-

Таблица 2

Основные показатели графиков

Пролеты Наименование работ	Измеритель	В а р и а н т ы ¹									
		l=29 м		l=52 м		l=78 м		l=109 м		l=124 м	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Монтаж и обстройка кружал	Сутки	3	3	3	3	13	13	72	72	74	72
Работы, связанные с подготовкой к бетонированию секций		10	10	11	11	11	10	49	44	41	41
Бетонирование секций		1	1	3	3	3	3	8	8	6	6
Работы и технологические перерывы, связанные с бетонированием «клиньев»		5	—	6	—	6	—	6	—	6	—
Работы и технологические перерывы, связанные с подготовкой к раскружливанию		9	4	9	4	10	5	20	9	19	8
Общий срок работ до раскружливания	Сутки %	23 100	14 61	27 100	16 59	32,5 100	26,5 82	115 100	98 84	127 100	111 87
То же без монтажа кружал		20 100	11 55	24 100	13 54	19,5 109	13,5 69	43 100	26 61	53 100	37 70

¹ Первый вариант — секционное бетонирование; второй — бессекционное.

жению арок: при средних пролетах (до 50 м) — на 40% и при больших — на 20%; сроки работ, непосредственно связанных с бетонированием арок (без монтажа кружал), сокращаются от 30 до 45%.

Сокращение общих сроков работ дает возможность ускорить оборачиваемость инвентарных кружал, значительно повышает коэффициент использования всего парка машин, предусмотренного проектом производства работ по сооружению железобетонных мостов, позволяет уплотнить рабочий день бригад. Все это обеспечивает снижение стоимости работ.

Общие сроки работ по сооружению арок (не только средних пролетов, но и больших) свидетельствуют о том, что арки могут быть сооружены за летний период. Последнее обстоятельство очень важно при сравнении вариантов, когда решается вопрос о выборе типа конструкции и материала проектируемого моста. На наш взгляд, во многих случаях возможно отдавать предпочтение железобетонным арочным мостам. в сборно-моноконтинентной конструкции.

ВЫВОДЫ

Практическая работа автора по внедрению бессекционного бетонирования и раннего раскружачивания арок (сводов) при строительстве уникальных железобетонных арочных мостов, теоретические и экспериментальные данные позволяют сделать следующие рекомендации:

1. Порядок бетонирования моноконтинентных железобетонных арок и сводов должен быть предусмотрен проектом с соблюдением приводимых ниже правил:

а) при пролетах до 125—150 м арки и своды разрешается бетонировать непрерывно, без деления на секции, с одновременной симметричной укладкой бетонной смеси в обе полу-арки от пят к замку;

б) прогиб замка кружал с арочными фермами, при полной или частичной загрузке их бетоном, не должен превышать 1/1000 пролета. В промежуточных стадиях забетонированные части арок могут рассматриваться как балки: при шарнирных арках шарнирно закрепленные на опорах (при бесшарнирных — защемленные) и вторыми концами свободно лежащие на кружалах;

в) темп бетонирования арок должен сочетаться с интенсивностью нарастания прочности бетона в арках с таким расчетом, чтобы в процессе бетонирования арок в них не возникали напряжения, вызывающие образование микротрещин в бетоне раннего возраста;

г) с целью предварительного обжатия кружала необходимо загружать раздельно: вначале бетоном распорки (а при арках с ездой посередине — и арматурой подвесок с обустройством

на них для сооружения проезжей части), а затем уже бетоном собственно арок;

д) чтобы избежать увеличения защитного слоя арматуры, последнюю необходимо укладывать с монтажными стыками в предзамковых секциях кружал; стыки подлежат сваривать в момент подхода к ним бетонной кладки.

2. Раскружаливание арок следует производить, когда временное сопротивление бетона в арках достигает величины в пределах

$$\frac{\sigma_6}{0,3} > R_6 > \frac{\sigma_6}{0,6},$$

где σ_6 — наибольшее напряжение в бетоне арок от собственного веса в момент раскружаливания;

R_6 — временное сопротивление бетона арок в момент раскружаливания.

3. Чтобы обеспечить нормальную среду для бетона в раннем возрасте, проектом производства работ должны быть предусмотрены мероприятия, обеспечивающие обильное смачивание распалубленных поверхностей арок, а в очень жарких и ветреных климатических условиях и прикрытие этих поверхностей.

Основное содержание диссертации опубликовано в статьях:

1. Молоканов Н. М. Сплошное бетонирование железобетонных арок. Стеклография. Мостотрест, 1950.
2. Молоканов Н. М. и Воронков Н. И. Бессекционное бетонирование распорных железобетонных арок и сводов. «Транспортное строительство» № 4, 1951.
3. Молоканов Н. М. Бессекционное бетонирование железобетонных арок и сводов. Сб. Главмостостроя № 3, 1955.
4. Молоканов Н. М. и Быков Н. В. Бессекционное бетонирование и раннее раскружаливание арок. «Транспортное строительство» № 4, 1962.