УДК 666.972.165
2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов мостов и транспортных тоннелей




В.А. Шорин, А.Ю. Вельсовский
Вологодский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ «ЛИНАМИКС» НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОРОЖНОГО ЦЕМЕНТОБЕТОНА

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния концентрации суперпластифицирующей добавки «Линамикс» (полиоксиэтиленовые производные полиметакриловой кислоты) на величину предела прочности бетона при сжатии и при изгибе. Достоверность полученных результатов подтверждена их статистической обработкой. Определены оптимальные концентрации пластификатора «Линамикс», которые находятся в диапазоне от 1,0 до 1,5 % от массы цемента. Показано, что использование оптимальных концентраций добавки в технологии быстротвердеющих высокопрочных цементобетонов для дорожного строительства позволяет экономить до 50 % высокомарочного портландцемента.

Дорожный цементобетон, состав цементобетона, пластифицирующие добавки, закон водоцементного отношения, суперпластификатор «Линамикс», марка портландцемента, оптимальная концентрация.

Актуальность

На сегодняшний день в России основным видом дорожной одежды является конструкция нежесткого типа, то есть с применением асфальтобетонного покрытия. Но существует и второй тип – конструкция жесткого типа с использованием цементобетонного покрытия. Цементобетон является отличным решением для строительства автомобильных дорог. Как показывает практика, многие страны применяют этот материал для дорожного строительства. Большая часть таких дорог имеет именно цементобетонное покрытие, поскольку они значительно прочнее и износоустойчивее по сравнению с асфальтобетонными.

С точки зрения дорожного строительства, особенно в текущих экономических условиях, ключевыми преимуществами являются экономическая и производственная эффективность использования бетона. При строительстве дороги необходимо учитывать, что конечная стоимость одного километра складывается из затрат на возведение и последующую эксплуатацию. В этом отношении бетонное полотно безусловно выигрывает. В долгосрочной перспективе эта технология является наиболее эффективной [1].

Экономические преимущества цементобетонных дорог обоснованы следующими факторами [2]:

– экономия топлива до 20 % для грузовых и до 12 % для легковых транспортных средств за счет низкого сопротивления качению;

– снижение затрат на эксплуатацию и ремонт дороги, уменьшение цикла обслуживания;

– возможность переработки отслужившего бетонного покрытия в заполнитель и его повторного использования для укрепления основания или строительства нового полотна;

– снижение расходов на транспортировку природных инертных материалов за счет рециклинга бетона и др.

Эксплуатационные затраты на бетонную дорогу существенно ниже аналогичных затрат на асфальтобетонное полотно. Жизненный цикл бетонного полотна составляет в среднем около 29 лет, асфальтобетонного – чуть более 13 лет [1]. Эксплуатационные преимущества цементобетонных дорог [2]:

– высокая безопасность движения;

– повышенная видимость на дороге в неблагоприятных погодных условиях и в ночное время;

– улучшенный водоотвод с бетонного полотна;

– отсутствие колейности и волнообразности;

– увеличение грузоподъемности автострад;

– высокая стойкость к химическим воздействиям.

Исследования, проведенные Московским автомобильно-дорожным государственным техническим университетом (МАДИ) по заказу Союза производителей цемента «СОЮЗЦЕМЕНТ», показали, что во всех дорожно-климатических зонах России экономически более выгодными являются конструкции дорожных одежд с монолитными цементобетонными покрытиями [4]. Стоимость жизненного цикла автомобильной дороги с цементобетонным покрытием может быть на 11 % ниже по сравнению с асфальтобетонным [5].

Однако у цементобетона есть существенный недостаток – низкий предел прочности при изгибе и сжатии в начальные (первые трое суток) сроки твердения. Для устранения этого недостатка в настоящее время используют суперпластифицирующие добавки, вводимые в цементобетонную смесь. Они позволяют снизить водоцементное отношение без потери по-

движности, что приводит к уплотнению структуры и повышению прочности. Суперпластификаторы относятся к третьему поколению высокоэффективных водоредуцирующих добавок. Их действие основано на электростатическом и стерическом эффектах, возникающих при адсорбции полимерных молекул на поверхности частиц цемента, что предотвращает их агрегацию и улучшает удобоукладываемость смеси [6].

Таким образом, актуальность настоящего исследования определяется необходимостью повышения прочностных характеристик дорожного цементобетона в ранние сроки твердения за счет применения добавки «Линамикс», а также установления ее оптимальной концентрации для достижения максимального технико-экономического эффекта.

Целью данной работы является исследование влияния концентрации суперпластифицирующей добавки «Линамикс» на прочностные характеристики дорожного цементобетона.

Добавка «Линамикс» представляет собой суперпластификатор на основе полиоксиэтиленовых производных полиметакриловой кислоты, обеспечивающий сохранение подвижности смеси во времени. По своим потребительским свойствам добавка «Линамикс» отвечает требованиям, предъявляемым к пластифицирующим-водоредуцирующим добавкам и добавкам, регулирующим сохраняемость подвижности бетонной смеси [3].

Поставленная цель достигалась решением следующих **задач**:

– приготовление фиксированных составов песчаных цементобетонных смесей с различным содержанием суперпластифицирующей добавки;

– приготовление образцов-балочек из лабораторных составов с различным содержанием добавки «Линамикс»;

– твердение образцов-балочек;

– испытание образцов-балочек на прочность при изгибе и сжатии;

– определение величины предела прочности при сжатии и изгибе.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в том, что впервые для суперпластификатора «Линамикс» экспериментально установлены зависимости пределов прочности при изгибе и сжатии от его концентрации в диапазоне 0,5–3,0 % от массы цемента. Выявлен экстремальный характер этих зависимостей, позволивший определить область оптимальных концентраций (1,0–1,5 %), в которой достигаются максимальные прочностные показатели. Полученные количественные данные дополняют существующие представления о механизме действия поликарбоксилатных суперпластификаторов в цементных системах с пониженным водоцементным отношением.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость проведенного исследования состоит в расширении знаний о влиянии концентрации суперпластификатора на кинетику структурообразования цементного камня в ранние сроки твердения. Подтверждено наличие оптимума дозировки, за пределами которого наблюдается снижение прочности, что объясняется эффектом перенасыщения системы и замедлением процессов гидратации цемента. Полученные результаты могут служить основой для моделирования водоредуцирующего действия добавок и разработки научно обоснованных рекомендаций по составам дорожных цементобетонов с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Используемые методы исследования

В работе использованы методы исследования, регламентированные действующими нормативными документами. Приготовление образцов-балочек размером 4×4×16 см осуществлялось из цементопесчаных смесей фиксированного состава (цемент : песок = 1:2, водоцементное отношение 0,4) с варьированием концентрации суперпластификатора «Линамикс» от 0,5 до 3,0 % от массы цемента. Твердение образцов происходило в нормальных условиях (t = 20±2 °C, влажная среда) в течение 3 суток. Испытания на прочность при изгибе и сжатии проведены по ГОСТ 10180-2012 с использованием пресса ПМ-1А-70АБ. Статистическая обработка результатов выполнялась с определением доверительных интервалов при доверительной вероятности 0,95, что обеспечило оценку воспроизводимости и достоверности полученных данных.

Результаты и их обсуждение

Приготовление балочек осуществлялось по следующей технологии: взвешивание исходных материалов; добавление всех ингредиентов в чашу для замеса и их перемешивание; формование образцов-балочек; расформование и уход за образцами. Для обеспечения нормального твердения образцы накрывали влажной тканью. Через 3 суток образцы подвергались механическим испытаниям. Сначала балочки испытывали на изгиб и вычисляли предел прочности при изгибе ($R_{изг}$) по формуле:

$$R_{изг} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2},$$

где F – разрушающая нагрузка, кН; l – расстояние между опорами 10 см; b – ширина образца; h – высота образца.

После испытания на изгиб полученные половинки образцов испытывали на сжатие и определяли предел прочности при сжатии ($R_{сж}$) по формуле:

$$R_{сж} = \frac{F}{S},$$

где F – разрушающая нагрузка, кН; S – площадь стальных пластин для передачи равномерной нагрузки на образец-полубалочку – 25 см^2.

Для подтверждения стабильности технологического регламента и качества выполнения операций при изготовлении цементо-песчаных бетонных смесей были изготовлены 12 образцов-балочек фиксированного состава (цемент – 1 ч., песок – 2 ч., вода – 0,4 ч., добавка «Линамикс» – 0,077 ч.). Результаты прочностных испытаний приведены в таблице 1.

Статистическая обработка экспериментальных результатов показала, что доверительный интервал для

предела прочности при изгибе составляет 3,2 %, при сжатии – 2,0 %. Это подтверждает высокое технологическое качество приготовления цементобетонной смеси.

Результаты исследования прочностных характеристик на изгиб цементо-песчаного бетона с добавкой «Линамикс» концентрацией 0,5 и 1,0 % приведены в таблицах 2 и 3.

Результаты влияния конценрации суперпластификатора «Линамикс» на величину предела прочности при изгибе приведены в сводной таблице 4.

Графическая зависимость величины предела прочности при изгибе от концентрации суперпластифицирующей добавки «Линамикс» приведена на рисунке 1.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов фиксированного состава

№ образца по порядку	Разрушающая нагрузка при изгибе (F), кН	Предел прочности при изгибе, МПа	Разрушающая нагрузка при сжатии (F), кН	Предел прочности при сжатии, МПа
1	2,36	5,52	42,74	17,09
2	2,36	5,52	47,26	18,90
3	2,41	5,64	53,90	21,56
4	2,41	5,64	43,19	17,27
5	2,52	5,90	50,62	20,23
6	2,52	5,90	51,87	20,75
7	2,57	6,01	42,36	16,94
8	2,57	6,01	40,53	16,21
9	2,29	5,36	42,12	16,85
10	2,29	5,36	40,99	16,40
11	2,60	6,08	37,72	15,09
12	2,60	6,08	45,52	18,21

Таблица 2

Результаты исследования прочностных характеристик на изгиб цементо-песчаного бетона с концентрацией пластифицирующей добавки «Линамикс», равной 0,5 %

№ балочек	Концентрация ЛМ, %	Fр, кН	Rизг, мПа	Rизг.сред, мПа
1	0,5	0,98	2,29	2,09
2		0,84	1,97	
3		0,86	2,01	

Таблица 3

Результаты исследования прочностных характеристик на изгиб цементо-песчаного бетона с концентрацией пластифицирующей добавки «Линамикс», равной 1,0 %

№ балочек	Концентрация ЛМ, %	$F_р$, кН	$R_{изг}$, мПа	$R_{изг.сред}$, мПа
1	1,0	1,28	3,00	2,81
2		1,11	2,60	
3		1,21	2,83	

Таблица 4

Влияние конценрации на величину предела прочности при изгибе

Концентрация ЛМ, %	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$R_{изг.сред}$, мПа	2,09	2,81	2,77	2,21	1,66	1,10

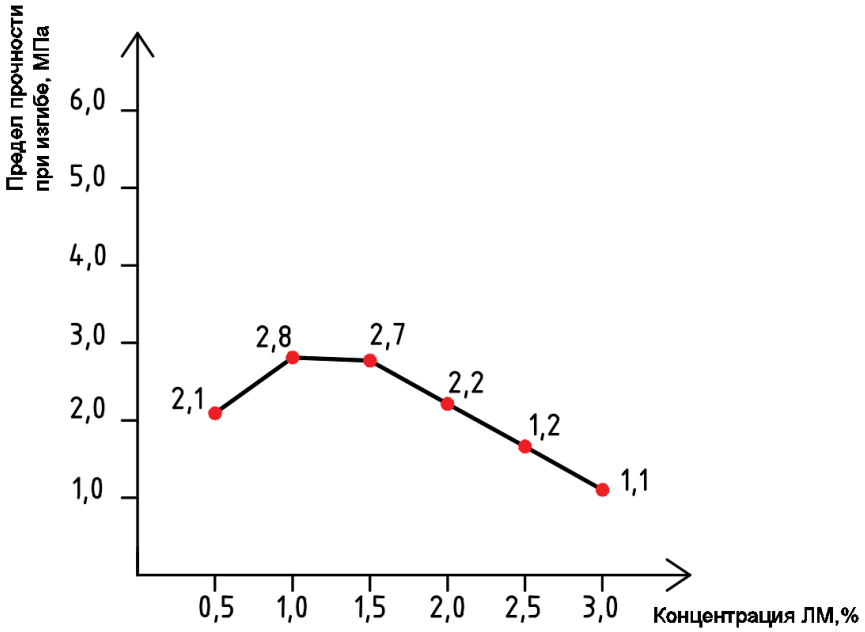


Рис. 1. Зависимость величины предела прочности при изгибе цементобетона от концентрации суперпластификатора «Линамикс»

Таблица 5

Результаты исследования прочностных характеристик на сжатие цементо-песчаного бетона с концентрацией пластифицирующей добавки «Линамикс», равной 0,5%

№ балочек	Концентрация ЛМ, %	$F_р$, кН	$R_{сж}$, мПа	$R_{сжатие.сред}$, мПа
1	0,5	7,52	3,01	3,47
		8,67	3,47	
2		7,81	3,12	
		9,01	3,60	
3		8,63	3,45	
		10,47	4,19	

Таблица 6

Результаты исследования прочностных характеристик на сжатие цементо-песчаного бетона с концентрацией пластифицирующей добавки «Линамикс», равной 1,0%

№ балочек	Концентрация ЛМ, %	$F_р$, кН	$R_{сж}$, мПа	$R_{сжатие.сред}$, мПа
1	1,0	12,53	5,01	5,03
		14,48	5,79	
2		14,02	5,61	
		8,96	3,58	
3		11,93	4,77	
		13,50	5,40	

Таблица7

Влияние конценрации пластифицирующей добавки «Линамикс» на величину предела прочности при сжатии

Концентрация ЛМ, %	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$R_{сжат.сред}$, мПа	3,47	5,03	5,91	4,31	3,62	2,92

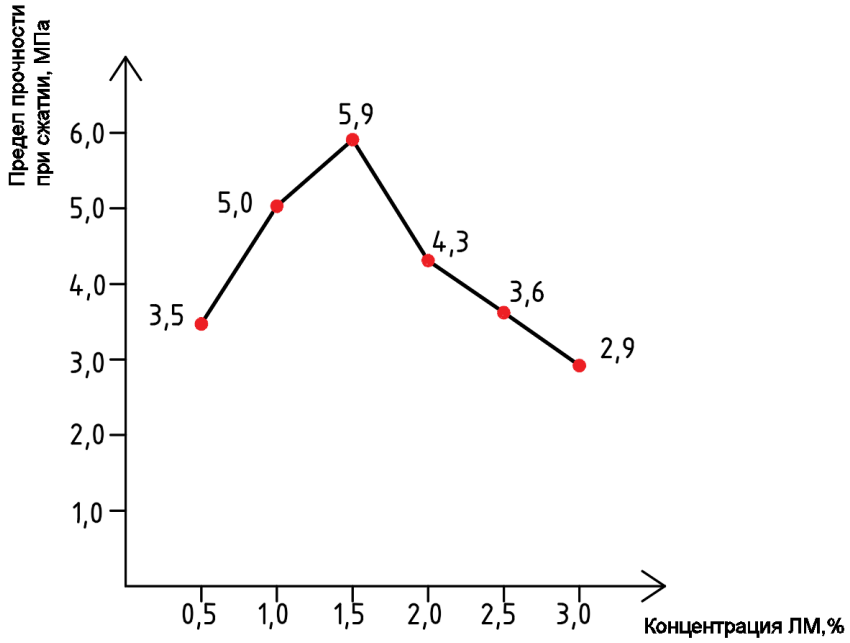


Рис. 2. Графическая зависимость величины предела прочности при сжатии цементобетона от концентрации суперпластификатора «Линамикс»

Из графической зависимости видно, что предел прочности при изгибе сначала увеличивается, достигая максимума при концентрации 1,0–1,5 %, а затем снижается.

Результаты испытаний на сжатие для концентраций 0,5 и 1,0 % представлены в таблицах 5 и 6.

Результаты влияния концентрации суперпластификатора «Линамикс» на величину предела прочности при сжатии приведены в сводной таблице 7.

Графическая зависимость величины предела прочности при сжатии от концентрации добавки «Линамикс» приведена на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что максимальная прочность при сжатии достигается при концентрации добавки 1,5 %. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к снижению прочности, что связано, вероятно, с перенасыщением системы и замедлением процессов гидратации цемента. Аналогичные результаты были получены другими исследователями при изучении влияния суперпластификаторов на прочность дорожных цементобетонов [7, 8]. Установлено, что превышение оптимальной дозировки может приводить к замедлению твердения и снижению прочности в ранние сроки [9].

Статистическая обработка результатов показала, что доверительный интервал для предела прочности при изгибе составляет в среднем 4,8 %, при сжатии – 5,5 %, что подтверждает высокую воспроизводимость результатов и достоверность полученных данных.

На основании выполненных экспериментальных исследований можно сделать следующие **выводы**:

1. Оптимальная концентрация суперпластификатора «Линамикс» для дорожного цементобетона находится в диапазоне 1,0–1,5 % от массы цемента. При этих концентрациях достигаются максимальные значения предела прочности при изгибе (2,77–2,81 МПа) и при сжатии (5,03–5,91 МПа) в возрасте 3 суток.

2. Использование добавки в оптимальных дозировках позволяет повысить прочность при сжатии на 58–70 % по сравнению с минимальным значением (при концентрации 0,5 %).

3. Увеличение концентрации суперпластификатора свыше 1,5 % приводит к снижению прочностных показателей, что делает его экономически нецелесообразным.

4. Применение оптимальной дозировки «Линамикс» в технологии быстротвердеющих высокопрочных цементобетонов для дорожного строительства обеспечивает возможность экономии до 50 % высокомарочного портландцемента за счет улучшения удобоукладываемости и снижения водоцементного отношения без потери прочности.

5. Полученные результаты могут служить основой для разработки практических рекомендаций по составу дорожных цементобетонов с использованием суперпластификатора «Линамикс», обеспечивающих повышенную раннюю прочность и долговечность покрытий.

Литература

1. Гончаров, М. В. Бетонные дороги: мировой опыт и перспективы в России / М. В. Гончаров // Технологии бетонов. – 2017. – № 1–2. – С. 36–38.

2. Харченко, А. И. Опыт HeidelbergCement в строительстве цементобетонных дорог на примере Европы и Грузии / А. И. Харченко. – URL: http://www.rucem.ru/ (дата обращения: 19.04.2021). – Текст : электронный.

3. Лакеев, С. Н. Основы производства пластификаторов : учебное пособие / С. Н. Лакеев, И. О. Май-

данова, О. В. Ишалина. – Уфа : Издательство УГНТУ, 2015. – 163 с.

4. Эксперты представили преимущества цементобетонных дорог на международном транспортном форуме в Новосибирске // Строительная газета. – 2024. – URL: https://stroygaz.ru/news/infrastructure/eksperty-predstavili-preimushchestva-tsementobetonnykh-dorog-na-mezhdunarodnom-transportnom-forume-v/ (дата обращения: 31.03.2026). – Текст : электронный.

5. Баранова, Д. А. Транспортное обеспечение развития городских агломераций: выпускная квалификационная работа магистра / Д. А. Баранова ; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2024.

6. Polycarboxylate Superplasticizers Used in Concrete: A review / Narayana Rao U. V., Sairam Kumar N. V., Kavitha Ch. [et al.]. – DOI: 10.52756/ijerr.2024.v38.012 // International Journal of Experimental Research and Review. – 2024.

7. Патент RU 2817509 C1. Бетонная смесь для дорожных покрытий : заявл. 15.11.2023 : опубл. 16.04.2024, бюл. № 11. / авторы: Иванов А. В., Петров С. Н. – 8 с.

8. Техническое заключение ФАУ «РОСДОРНИИ» № 02-17/2024 по применению добавок «Линамикс СП-180» в дорожных цементобетонах. – Москва : ФАУ «РОСДОРНИИ», 2024. – 15 с.

9. ГОСТ Р 70767-2023. Добавки химические для бетонов и строительных растворов. Суперпластификаторы. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2023. – 28 с.

10. Шляхова, Е. А. Повышение прочностных показателей дорожного бетона / Шляхова Е. А., Карачевский А. А., Чэнь Ялунь // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 7. – URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2025/10205 (дата обращения: 31.03.2026). – Текст : электронный.

V.A. Shorin, A.Yu. Velsovsky
Vologda State University

INVESTIGATION OF SUPERPLASTICIZING ADDITIVE «LINAMIX» EFFECT ON ROAD CEMENT CONCRETE CHARACTERISTICS

This paper presents the results of experimental studies on the effect of the concentration of the superplasticizer «Linamix» (polyoxyethylene derivatives of polymethacrylic acid) on the compressive and flexural strength of concrete. The reliability of the results was confirmed by statistical analysis. The optimal concentrations of the «Linamix» plasticizer were determined to be between 1.0 % and 1.5 % of the cement weight. It has been shown that the use of optimal concentrations of additives in the technology of fast-hardening high-strength cement concretes for road construction allows for up to 50 % savings in high-grade Portland cement.

Road cement concrete, composition of cement concrete, plasticizing additives, law of water-cement ratio, superplasticizer «Linamix», grade of Portland cement, optimal concentration.