

# ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С ЦЕЛЮ СНИЖЕНИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ БЕТОННОЙ СМЕСИ

**А.Ю. МИРОНОВА**, ведущий специалист по работе с проектами Центра научно-технического сопровождения сложных объектов строительства НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, эксперт Ассоциации «Железобетон»;

**В.Р. ФАЛИКМАН**, руководитель Центра научно-технического сопровождения сложных объектов строительства НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, доктор материаловедения, канд. хим. наук, академик РИА и МИА, вице-президент Ассоциации «Железобетон»



В статье отмечается, что в связи с композиционным усложнением бетона взаимодействие его составляющих и взаимное влияние элементарных процессов твердения на технологических стадиях все более усложняются [1]. С применением современных технологий функциональные возможности компонентов, особенно цементов и добавок, значительно расширяются, и на передний план выдвигаются проблемы подбора составов бетонов нового поколения [2]. На этом фоне роль технолога в разработке рецептур и производстве бетона приобретает крайне актуальное значение.

The article notes that due to the compositional complication of concrete, the interaction of its components and the mutual influence of elementary hardening processes at technological stages are becoming more and more complicated [1]. With the use of modern technologies, the functional capabilities of components, especially cements and additives, are significantly expanded, and the issues of new-generation selecting compositions concretes are brought to the fore [2]. Against this background, the role of the technologist in the development of formulations and the production of concrete becomes extremely important.

Одной из основных задач технолога является снижение себестоимости производства бетонной смеси без потери качества и при сохранении заданных свойств и параметров бетона в конструкции.

Под эффективным подбором состава бетона подразумевается получение такого бетона (бетонной смеси), который одновременно отвечает требованиям по экономической эффективности, технологичности и экологичности.

Для обеспечения одновременно всех перечисленных критериев необходимо:

- правильно подобрать сырьевую базу, в том числе минеральные добавки;
- грамотно подойти к самому процессу подбора составов бетона, что подразумевает не только установление зависимостей между изменением свойств бетона при варьировании параметров его состава, но и учет заданной технологии строительства;
- производить корректировку назначаемых составов на основании эффективного производственного анализа.

### **Выбор сырьевой базы**

Прежде всего, необходимо подобрать материалы, удовлетворяющие требованиям нормативной документации или не вполне отвечающие ей, но, в любом случае, позволяющие получить бетон с заданными характеристиками качества, что допускается, например, ГОСТ 26663. Как правило, при этом, с точки зрения экономической эффективности, приоритет имеет локальная сырьевая база или, если точнее, материалы с наименьшей стоимостью с учетом доставки. Одновременно нередко приходится учитывать наличие «священных коров» в виде материалов, которые придется применять в любом случае вне зависимости от степени/уровня их пригодности и эффективности с технологической точки зрения (например, принадлежащие производителю карьеры, материалы, получаемые взаимозачетом и т.п.).

### **Цемент**

Требования к химико-минералогическому и вещественному составу цемента, их техническим характеристикам должны быть заданы таким образом, чтобы с учетом эффекта от остальных компонентов бетонной смеси получать требуемые свойства бетона и смеси. Если производитель бетона технологически подготовлен к производству бетонов с минеральными добавками, предпочтительным в ряде случаев будет

являться применение бездобавочных портландцементов.

### **Минеральные добавки**

Как правило, большинство производителей и потребителей бетона рассматривает минеральные добавки (МД) как продукт, дающий, в первую очередь, экономический эффект. Вместе с тем эффективность применения МД в большей степени выражена в достижении определенных технологических показателей или коррозионной стойкости [3]. Применение МД позволяет добиться таких свойств бетона и бетонной смеси, которых не удастся получить с применением только портландцемента. Иными словами, МД позволяют расширить функциональность бетонных смесей, т.е. перенести нагрузку с технологии производства строительных бетонных работ на технологию производства бетона.

К сожалению, в нашей стране уровень применения МД явно недостаточен. Это касается и уровня нормативной документации. Запрета на использование МД, естественно, нет. В общих чертах информация касается, как правило, применения цемента с минеральными добавками, но для введения минеральных добавок в состав бетона, а особенно взамен цемента, существует целый ряд подводных камней и нормативных барьеров. Кроме этого, если за рубежом потенциальные преимущества применения МД описаны непосредственно в текстах нормативных документов (НД) на МД, как это сделано, например, в EN 206:2013 (в стандарте указано, что конечная прочность в постпроектном возрасте и/или сопротивление воздействию определенных сред эксплуатации бетона, приготовленного с применением микрокремнезема, зол-уноса и шлаков, выше, чем у бетона, приготовленного только с применением портландцемента), то в наших НД такой информации потенциальный потребитель увидеть не может. Отсюда следует, что вне зависимости от назначения бетона, от технологии производства бетонных работ, от условий эксплуатации, потребитель желает получать бетон, изготовленный исключительно с применением портландцементов без добавок, как в составе цемента, так и в составе бетона, что заведомо противоречит международной практике [4].

Минеральные добавки в составе бетона могут решить одну или одновременно несколько задач и выполнить несколько функций:

- добавка-наполнитель, увеличивающая плотность упаковки и регулирующая

связность, расслаиваемость, пластичность, усилие сдвига;

- замещение доли цемента для получения бетона с равнозначными показателями качества;

- повышение эксплуатационных характеристик и долговечности бетонов;

- центр кристаллизации, обеспечивающий ускорение процессов гидратации, структурообразования и твердения бетонов;

- снижение тепловыделения;

- уменьшение опасности щелочной реакции заполнителей.

Для оценки эффективности МД с точки зрения снижения или прироста прочности при замещении минеральным заполнителем цемента можно использовать понятие «индекс цементирующей эффективности». Если индекс равен 1, то цемент замещают минеральной добавкой 1:1; если ниже единицы, то расход минеральной добавки для получения того же уровня прочности должен быть выше, чем расход замещаемого цемента и наоборот.

Одна и та же минеральная добавка в разных условиях (разные сырьевые материалы, доля замещения и общее содержание вяжущего) может показывать различную эффективность.

На рис. 1 приведены графические зависимости прочности от расхода вяжущего «цемент плюс минеральная добавка на основе шлака» для:

а) высокоактивного бездобавочного портландцемента ЦЕМ I 52,5 Н (прочность 58 МПа за 28 сут), быстрого твердения (31 МПа за 2 сут) и с невысоким содержанием щелочей (0,6%) и  $C_3A$  6%;

б) активного бездобавочного портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н (28 сут – 54 МПа), быстрого твердения (2 сут – 33 МПа), с высоким содержанием щелочей (1,1%) и содержанием  $C_3A$  8-9%;

в) портландцемента с минеральными добавками ПЦ 400 Д20 (28 сут – 50 МПа), с повышенным содержанием щелочей (0,9%) и содержанием  $C_3A$  6-7%.

*Примечание:* наиболее корректным является описание зависимости прочности бетона от Ц/В отношения; однако здесь и далее для наилучшей наглядной интерпретации полученных данных варьируемым показателем будет являться именно расход вяжущего.

Представленные зависимости отражают известный факт: наибольшую цементирующую эффективность гидравлические мине-

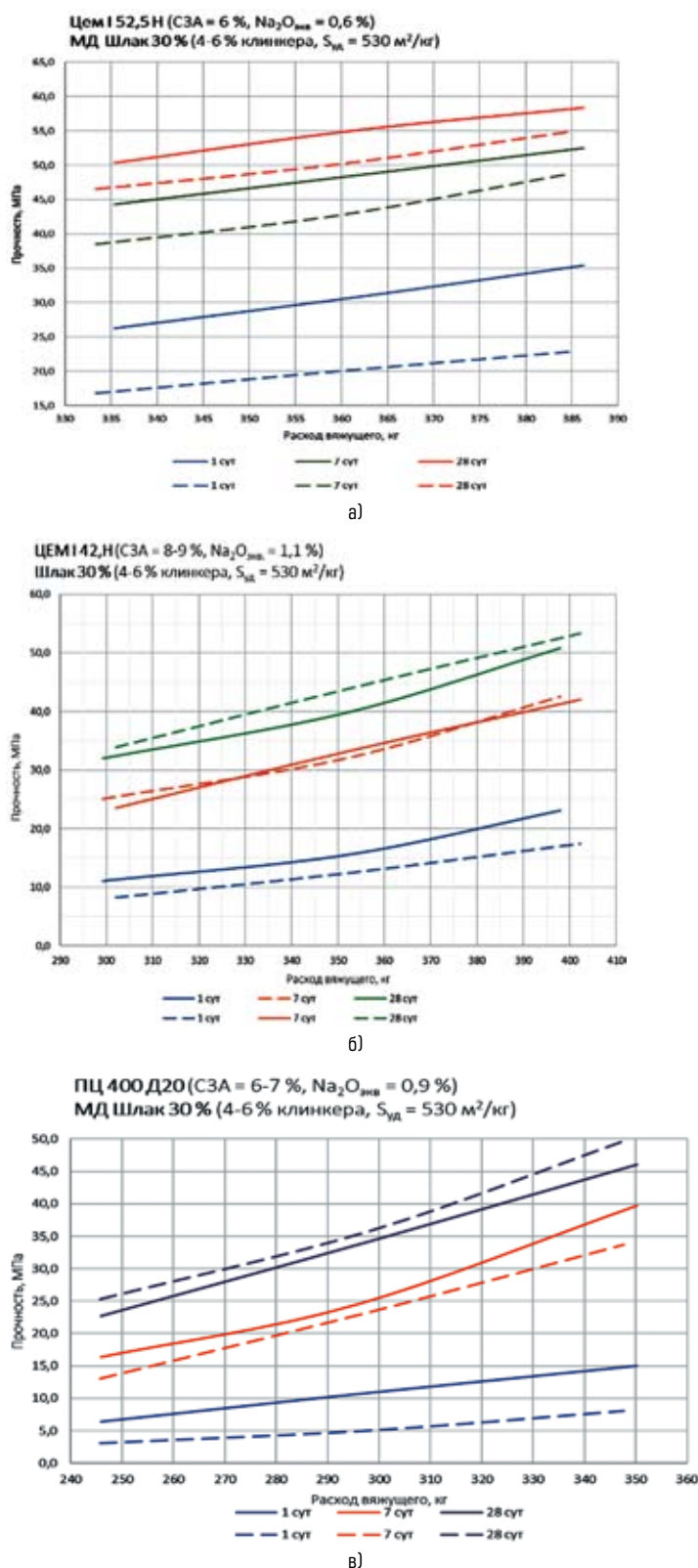


Рис. 1. Графические зависимости прочности бетона от расхода вяжущего

ральные добавки проявляют при совместном использовании с высокощелочными цементами (что, в целом, также актуально и для пуццолановых минеральных добавок).

Выбор минерального наполнителя должен быть выполнен с учетом поставленных задач: экономических, экологических, тех-

нологических. В некоторых случаях может быть эффективным применение сразу нескольких видов минеральных наполнителей. Например, в качестве активных минеральных добавок (АМД), которая эффективно в точки зрения прочности заменяет цемент, производитель применяет шлак, а в качестве МД, которая эффективно регулирует реологические и тиксотропные свойства бетонной смеси — тонкомолотую каменную муку, существенно превосходящую цемент по величине удельной поверхности.

#### **Крупный и мелкий наполнитель**

Практически любой крупный и мелкий наполнитель, удовлетворяющий изготовителя и потребителя по гранулометрическому составу, может быть применен в составе бетона, но его минералогия и химический состав, характеристики качества, в том числе реакционная способность по отношению к щелочам цемента, ограничивают:

- возможное содержание такого заполнителя по объему в составе бетона;
- назначение (сферу применения) бетона с таким заполнителем;
- диапазон показателей качества (например, класс бетона по прочности или марку по морозостойкости), при которых экономически целесообразно применение такого заполнителя.

Наибольшей технологической эффективности можно добиться, применяя, как минимум, две отдельные фракции крупного заполнителя. В современных зарубежных производствах используют до пяти-шести отдельных фракций, максимально оптимизируя кривые рассева [5]. Однако в большинстве случаев, ориентируясь на значительно более низкую стоимость, производители бетона выбирают крупный наполнитель в виде смеси фракций.

Применение песков разных групп по крупности также позволяет существенно расширить функциональность бетона — определенные требования к технологическим показателям бетонной смеси можно обеспечить как песком, содержащим в своем составе тонкие фракции в достаточном количестве, так и минеральными добавками.

#### **Химические добавки**

Химические добавки вносят существенный вклад в функциональность бетонных смесей и бетона [6]. Как правило, при производстве бетонных смесей химические добавки представлены в виде готового комплексного продукта, подходящего для

решения относительно узкого спектра поставленных задач.

Например, если бетонный завод имеет четыре линии подачи добавок на дозаторы и производит:

- бетонную смесь товарную с сохраняемостью два часа (добавка №1);
- железобетонные изделия (добавка №2);
- бетоны с  $F_{1200}$  и выше с воздухоудержанием от 4% (добавка №3);
- бетонную смесь для бетонов под упрочнитель (добавка №4), то для введения противоморозной добавки (добавка №5) или увеличения сохраняемости до 4 часов (добавка №6) потребуются определенные технологические решения: в лучшем случае, модернизация технологической линии путем увеличения числа линий подачи добавок, в худшем — регулярная промывка имеющейся штатной линии подачи с целью ликвидации остатков ранее использованных добавок. При этом наличие дополнительных технологических линий в любой момент может оказаться также недостаточным.

Решением, позволяющим добиться наибольшей эффективности производства, может являться раздельное дозирование компонентов химических добавок, обеспечивающих водоредуцирование, сохраняемость, стабилизацию, воздухоудержание, ускорение/противоморозный эффект и т.п., с неизменным учетом их совместимости [7].

Решением, позволяющим добиться наибольшей эффективности производства, может являться раздельное дозирование компонентов химических добавок, обеспечивающих водоредуцирование, сохраняемость, стабилизацию, воздухоудержание, ускорение/противоморозный эффект и т.п., с неизменным учетом их совместимости [7].

Например, в качестве сильной водоредуцирующей основы можно использовать такие добавки на основе эфиров поликарбонатов, которые практически не обеспечивают сохраняемость бетонной смеси свыше 1-1,5 часов. Такую добавку можно использовать для бетона железобетонных изделий или для товарного бетона при малом «плече» доставки.

Для бетонных смесей, к которым предъявляются требования повышенной сохраняемости свыше 1,5 часов, можно в качестве замедлителей, в дополнение к водоредуцирующей добавке, вводить добавки с выраженным замедляющим эффектом. В их основе также могут быть эфиры поликарбонатов; при этом они могут не проявлять водоредуцирующий эффект, либо проявлять его в незначительной степени.

Третья линия может предназначаться для подачи добавки на основе лигносульфонатов — компонента, обеспечивающего эффект слабого замедления схватывания,



замедления твердения и стабилизации смеси. В этом случае, например, появится возможность вводить стабилизирующий компонент в бетонные смеси, к которым предъявляются повышенные требования по динамической стабильности, или которые склонны к сегрегации и водоотделению (большая высота сбрасывания, повышенная протяженность линии подачи автобетононасосом, низкое содержание тонких фракций в бетоне и т.п.).

Таким образом, производитель бетонной смеси может, подбирая пропорции, обеспечивать всего тремя базовыми продуктами весь спектр потребностей по сохраняемости и стабильности бетонной смеси для широкого номенклатурного ряда, тем самым максимально достигая как технологическую, так и экономическую эффективность.

### Продукция рециклинга

Большой интерес вызывает применение шламовой воды, образующейся после промывки оборудования и транспортных средств. Шламовая вода имеет в своем составе частицы:

- цемента – в зависимости от времени, прошедшей от затворения бетонной смеси. До момента использования шламовой воды этот цемент еще может обладать определенной гидравлической активностью.

- пылевидные и глинистые частицы (ПиГ), а также алевритовые фракции от отмывания песка и щебня, которые нужно учитывать не только как тонкую фракцию в составе бетона, но и как компонент с повышенной щелочностью.

Цемент, ПиГ и щелочи могут влиять на качество получаемых смесей и бетона как положительно, так и отрицательно, и решение о применении шламовой воды, количестве допустимой замены должно быть принято на основании требований к конкретному бетону (бетонной смеси), условий среды его эксплуатации и с учетом требований ГОСТ 23732-2011.

Возможное содержание активного цемента необходимо учитывать при производственном анализе качества выпускаемой продукции. Результаты испытаний бетона с содержанием шламовой воды должны анализироваться отдельной группой, т.к. ложноположительные результаты не должны применяться для коррекции номинального состава.

ПиГ могут быть полезны в бетонных смесях, которым не помешает повысить уровень

связности и вязкости (тощие смеси, смеси с повышенной пластичностью, смеси для подачи автобетононасосом (АБН) с бетоноводом большой протяженности). Их повышенное содержание может обеспечить большую плотность упаковки зерен за счет чего, вероятно, получается поднять прочность и водонепроницаемость бетона. В то же время, введение шламовой воды отрицательно сказывается на морозостойкости бетона как за счет вредных глинистых компонентов, так и за счет содержащихся в шламе щелочных оксидов от омытых материалов.

При этом щелочные оксиды могут быть полезны для большего проявления потенциальных гидравлических свойств гидравлических вяжущих (шлаков).

В любом случае, подход при применении шламовой воды должен быть следующим: потенциальные положительные свойства лучше не учитывать в связи с тем, что добиться их регулярности и стабильности невозможно, а потенциальные отрицательные свойства должны быть учтены в обязательном порядке.

### Эффективный подбор состава бетона

Эффективным можно назвать такой подбор состава, который, во-первых, в пределах использования одной сырьевой базы позволяет назначить широкую номенклатуру номинальных составов бетона, а, во-вторых, с точки зрения задания на подбор, позволяет с уверенностью назначать номинальный состав, обеспечивающий запас на уровне «необходимо и достаточно».

Иными словами, на одной сырьевой базе производитель должен подобрать номинальные составы бетона в широком диапазоне прочности для разных технологий производства строительных работ и при этом быть уверенным, что варьирование качества сырьевых материалов в тех пределах, которые тяжело регулировать или которым сложно обеспечить необходимую стабильность, не позволит привести к недопустимому уровню несоответствия, обеспечивая при этом также отсутствие чрезмерных запасов, снижающих экономическую эффективность.

Для обеспечения стабильности показателей качества бетонной смеси и бетона можно использовать две концепции:

1. Приложить максимум усилий для обеспечения однородности гранулометри-

ческого состава компонентов, их технических показателей и химического состава. Как показывает практика в масштабах целой страны на протяжении нескольких десятилетий, – это не наша история. К нам на производство стабильно поступают заполнители разной крупности, дробимости, лещадности, природные карьерные пески естественной гранулометрии. У нас также нет возможности не то, чтобы влиять на показатели качества цемента, но его поставщики часто даже не предупреждают об их изменениях и отклонениях, включая химический и минералогический состав.

При этом именно на основании этой концепции в нашей профессиональной среде принято, проведя некий подбор состава бетона, утвердить определенный номинальный состав и зафиксировать в нем расход цемента и основных компонентов, позволяя себе, как максимум, варьирование расхода воды и пересчет заполнителей на влажность и может быть варьирование вида и расхода пластифицирующих добавок, влияющих на сохраняемость и расслаиваемость. Таким образом, как бы ни менялось качество сырьевых компонентов, мы делаем вид, что либо этих колебаний вообще нет, либо убеждаем самих себя, что влияние колебаний несущественно и в любом случае состав можно не менять ни при каких условиях.

Необязательно, что это приводит к несоответствию (к браку). Чаще всего колебания показателей качества сырьевой базы банально закладываются в вариацию и предупредительно учитываются при назначении номинального состава, снижая тем самым эффективность подбора. Кроме снижения экономической эффективности, при этом также могут быть ухудшены те показатели, которые напрямую зависят от содержания в бетоне цемента: тепловыделение, усадка, ползучесть и т.п.

2. Большую эффективность, но вместе с тем и намного большую «наукоемкость» представляет собой концепция, основанная на предварительном прогнозировании изменения показателей качества бетона при варьировании параметров состава бетона и качества сырьевых материалов. Если невозможно обеспечить тотальную воспроизводимость одного номинального состава, необходимо провести больше работ при подборе состава, учесть влияние каждого из варьируемых показателей и регулярно изменять номинальный состав в соответствии с актуальной ситуацией.

Если первая концепция еще может позволить проводить работу по подбору состава «по старинке»: с неопределенным запасом, по некоей одной точке и «прикинутому на коленке» составу, то вторая концепция подразумевает установление большого количества зависимостей на этапе начального подбора, использование расчетных программных продуктов, сложный анализ данных производственного контроля, что требует от технолога, занимающего такой работой, определенного уровня компетентности и высокого уровня способности к прогнозированию и оценке неопределенности, если, не сказать больше, к предсказанию.

К сожалению, в рамках одной статьи невозможно изложить все нюансы инновационной технологии подбора. Поэтому более подробно об алгоритме обеспечения эффективного состава бетона можно узнать на курсах повышения квалификации «Особенности технологий производства и контроля качества товарного бетона», проводимых НИЦ «Строительство», при содействии Ассоциации «Железобетон». По окончании курса выдается удостоверение НИЦ «Строительство» о повышении квалификации.

Дополнительную бесплатную информацию и консультацию можно получить по телефонам: +7 (495) 174-73-80 (контактное лицо Комкова Елена Александровна).

Для записи на курс присылайте заявки по адресу [komkova@cstroy.ru](mailto:komkova@cstroy.ru).

---

#### Библиографический список

1. Ушеров-Маршак А.В. Взгляд в будущее бетона. *Строительные материалы*, №3, 2014, с. 6-7.
2. Collepardi M. *The new concrete*. Publ. Graf. Tintoretto, 2006, – 421 p.
3. Фаликман В.Р. Минеральные добавки в современной технологии бетона. *Conference Proceedings of ICCX Russia – 2020, 01 – 04 December 2020, St. Petersburg, Russia, CPI*, 58p., pp. 12-23.
4. *Cembureau 2020 Activity Report, May 2021*, Brussels, – 50 p.
5. Alexander M., Mindess S. *Aggregates in Concrete*. Taylor and Francis Group, 2005, 435 p.
6. Liu J., Yu C., Shu X., Ran Q., Yang Y. *Recent advance of chemical admixtures in concrete*. *Cement and Concrete Research*, Volume 124, October 2019, 105834.
7. Bedard, Cl., Mailvaganam, N.. *The Use of Chemical Admixtures in Concrete. Part II: Admixture-Admixture Compatibility and Practical Problems*. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2006, DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:1(2).