

УДК 691.3

*Рунова Р.Ф., доктор техн. наук, профессор,
Руденко И.И., канд.техн.наук, ст.научн.сотр.
Научно-исследовательский институт вяжущих
веществ и материалов
Киевского национального университета
строительства и архитектуры, г. Киев*

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ БЕТОНА: НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ, УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ, ДОСТОВЕРНОСТЬ

1. Введение

Для бетона как приоритетного в современном строительстве конструкционного материала прочность является определяющим понятием, которое характеризует уровень его сопротивления воздействию нагрузки. Это простейшее классическое понятие требуют современных уточняющих комментариев, объем которых увеличивается по мере усложнения самого бетона и конструкций, для которых он предназначается. Интенсивное развитие глобализации во многих сферах деятельности человека требует максимальной гармонизации определяющих понятий и методик, касающихся такого важнейшего свойства бетона, как прочность.

Цель данного обзора – акцентирование внимания исследователей и производителей на тех вопросах, которые зафиксированы в нормативных документах Украины, касающихся всех сторон достоверности определения прочности бетона разными методами, в том числе с учетом характеристик однородности прочности.

2. Прочность как физическая величина

Необходимо представлять себе механизм разрушения бетона под нагрузкой. При осевом сжатии образцы-кубы разрушаются вследствие разрыва бетона в поперечном направлении. Наклон трещин разрыва обусловлен силами трения, которые развиваются на контактных поверхностях – между подушками пресса и гранями куба. Силы трения, направленные внутрь, препятствуют свободным поперечным деформациям куба и создают эффект обоймы. Удерживающее влияние сил трения по мере удаления от торцовых граней куба уменьшается, поэтому после разрушения куб приобретает форму усеченных пирамид, сомкнутых малыми основаниями, свидетельствуя о нормальном разрушении бетона. Все остальные конфигурации образцов после испытаний, отличающиеся от описанной, подтверждают дефектность разрушения.

В бетоне, подвергнутом сжатию, напряжения концентрируются на более жестких частицах, обладающих большим модулем упругости, вследствие чего по плоскостям соединения этих частиц возникают усилия, стремящиеся нарушить связь между частицами. В то же время в местах, ослабленных пораами и пустотами, происходит концентрация напряжений.

Известно, что вокруг отверстий в материале, подвергнутом сжатию, наблюдается концентрация сжимающих и растягивающих напряжений; последние действуют по площадкам, параллельным сжимающей силе. Поскольку в бетоне много пор и пустот, растягивающие напряжения у одного отверстия или поры накладываются на соседние. В результате в бетонном образце, подвергнутом осевому сжатию, возникает вторичное поле напряжений.

Отсутствие строгой закономерности в расположении частиц, составляющих бетон, в расположении и крупности пор приводит к тому, что при испытании образцов, изготовленных из одной и той же бетонной смеси, получают неодинаковые показатели прочности — разброс прочности.

В зависимости от разных напряжений, возникающих в бетоне под действием нагрузки, выделяют прочность при сжатии, растяжении при изгибе, раскалывании. Практически все они взаимосвязаны, а наиболее общим и конструкционно важным свойством является прочность при сжатии, поэтому ее оценке и уделяется основное внимание в нормативных документах. Основные факторы, определяющие прочность бетона, показаны на рис.1.



Рисунок 1 - Схема факторов, определяющих прочность бетона

3. Прочность бетона в нормативных документах Украины

В стандартах используются две условные характеристики прочности бетона: класс и марка. Марка характеризовала прочность бетона по стандартам типа ГОСТ и относилась к бетонам «старшего» поколения. С появлением модифицированных бетонов нового поколения возникла необходимость давать более достоверную оценку прочности с учетом неоднородности бетона как конструкционного материала, которая отразилась в понятии класс бетона по прочности. Класс бетона по прочности на осевое сжатие по определению Баженова Ю.М. характеризует временное сопротивление сжатию бетонных кубов с размером ребра 15 см, испытанных в проектном возрасте с учетом статистической изменчивости прочности. В базовом стандарте на бетон **ДСТУ Б В.2.7-176:2008 (EN 206-1:2000, NEO)**, связь которого с остальными действующими стандартами Украины показана на рис.2, класс бетона по прочности определяется на образцах цилиндрической формы (диаметр 150 мм, высота 300 мм) или кубах с ребром 150 мм при обеспеченности 95% в возрасте 28 суток в соответствии с **EN 12390-1**, изготовленных и выдержанных в нормальных условиях в соответствии с **EN 12390-2** из проб, взятых в соответствии с **EN 12350-1**.

Маркировку класса по прочности бетона на сжатие по этому стандарту представляет буква „С” с дробью, в числителе которой дается прочность образцов-цилиндров, в знаменателе – прочность образцов-кубов (МПа). Эта маркировка класса по прочности была принята и при разработке стандарта на щелочные тяжелые бетоны ДСТУ Б В.2.7-25:2011.

Следует заметить, что **ДСТУ Б В.2.7-176:2008** рекомендует проводить испытания с приоритетным использованием указанных EN, которые, однако, **не адаптированы** в Украине. В то же время в этом нормативе дается ссылка на возможность использования отечественных нормативов соответственно для отбора проб бетонной смеси (**ДСТУ Б В.2.7-114:2002**), характеристики таких образцов (**ДСТУ Б В.2.7-214:2009**), для регламентирования условий выдерживания образцов (**ДСТУ Б В.2.7-224:2009**). Достаточно важной ремаркой является указание на необходимость уведомления потребителя о форме образцов, предназначенных для испытаний. Иные методы испытаний образцов обязательно подлежат согласованию между производителем и потребителем.

ДСТУ Б В.2.7-43-96 регламентирует связь между классом и средней прочностью бетона такой зависимостью:

$$B = R (1 - tV),$$

где B – класс бетона по прочности, МПа; R – средняя прочность бетона, которую следует обеспечить при производстве конструкций, МПа; t – коэффициент, характеризующий принятую при проектировании обеспеченность класса бетона (в соответствии с ДСТУ Б В.2.7-43-96 обеспеченность составляет 95% для всех видов бетонов); V – коэффициент вариации прочности бетона (фактическое значение рассчитано по методике ДСТУ Б В.2.7-224:2009 или принято равным 13,5% при отсутствии фактических значений, например, при подборе номинального состава бетона).

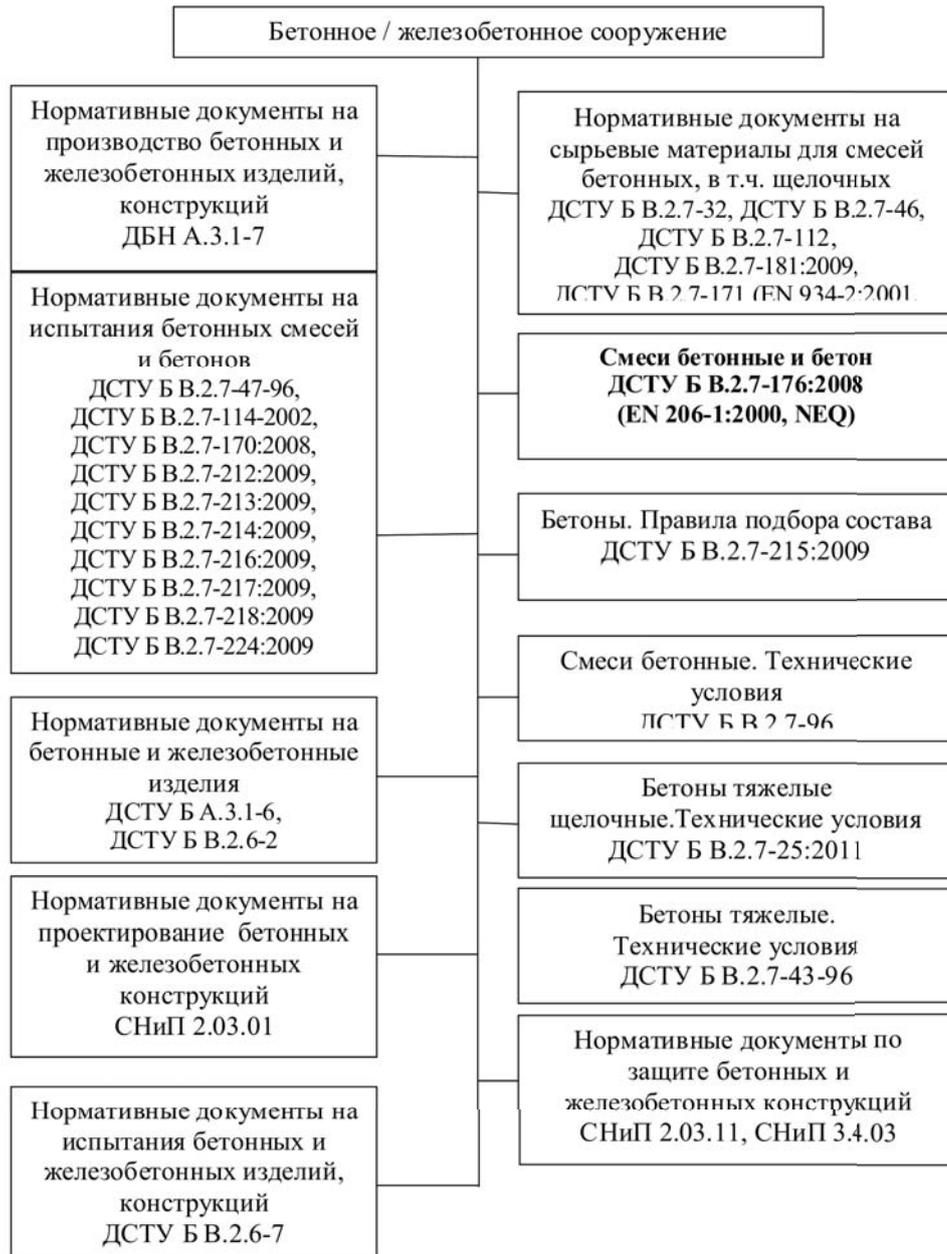


Рисунок 2 - Взаимосвязь ДСТУ Б В.2.7-176:2008 (EN 206-1:2000, NEQ) с другими нормативными документами

В таблице приложения „А” к ДСТУ Б В.2.7-43-96 приводятся соотношения между классом бетона по прочности, средней прочностью бетона и ближайшей маркой бетона по прочности, даются допустимые отклонения.

Приближение к европейским нормам в целом сопровождается повышением требований к прочности тяжелых бетонов, поскольку в ДСТУ Б В.2.7-176:2008 указывается предел С 100/115. Следует заметить, что в стандарте на щелочные бетоны ДСТУ Б В.2.7-25:2011 предусмотрен класс С110/125, что обосновано более, чем 50-летней практикой наблюдения за такими бетонами в разнообразных конструкциях, в том числе специального назначения. Современный этап развития этих бетонов обусловлен решением задач их модифицирования в направлении водоредуцирования и пластификации, что позволяет прогнозировать расширение как области применения, так и повышения прочности.

Анализ приведенных данных о прочности и ее определении в отечественных стандартах, введенных последние годы в связи с законодательным переходом на отечественные стандарты (ДСТУ) с учетом адаптационного процесса позволяет изложить некоторые обобщения.

Определенные затруднения у отечественного производителя может вызывать неоднозначность использования упомянутых нормативных документов: все указанные EN, на которые опирается базовый стандарт, не входят в перечень действующих в Украине, поскольку сам базовый стандарт ДСТУ Б В.2.7-176:2008 является документом *параллельного действия* с комплексом национальных стандартов, касающихся бетонных смесей и бетонов, бетонных и железобетонных изделий и конструкций, методов испытаний, связанных с положениями и требованиями этого стандарта на период разработки и принятия новой редакции упомянутых стандартов как идентичных европейским. В переходный период определение прочности бетона по контрольным образцам необходимо производить в соответствии с ДСТУ Б В.2.7-214:2009 до появления в нормативной базе Украины адаптированных европейских норм как подчиненных базовому ДСТУ Б В.2.7-176:2008. Этот стандарт регламентирует возможность определения прочности по образцам конкретных размеров, отличающихся от размеров, приведенных в ДСТУ Б В.2.7-176:2008, с указанием масштабных коэффициентов. Такими образцами могут быть кубы со стороной 70 – 300 мм, а также призмы и цилиндры разного диаметра (100 – 300 мм) и высоты (200-600 мм). Это позволяет производителю работать более гибко.

4. Условия испытаний при определении прочности бетона

Регламентирование условий испытаний бетона является чрезвычайно важным для объективной оценки прочности. Эти условия начинаются с грамотного *отбора проб* бетонной смеси, что необходимо делать в соответствии с требованиями ДСТУ Б В.2.7-114-2002. При этом испытания смеси должны производиться не позже, чем через 10 минут после отбора пробы, а формирование образцов – не позже 20 минут.

Следует заметить, что такие условия чаще всего соблюдаются в лаборатории завода-производителя, но могут нарушаться при отборе проб на объекте. Это отражается на однородности консистенции смеси и соответственно удобоукладываемости при изготовлении образцов и их прочности. Температура бетона отобранной пробы может изменяться в пределах только 5 град за все время проведения измерений и изготовления образцов. Это необходимо учитывать особенно в зимний период для исключения резкого охлаждения смеси, а в летний период учитывать требование в части сохранения водосодержания смеси ДСТУ Б В.2.7-214-2002 уделяет достаточно много внимания условиям *формования образцов*. Несмотря на кажущуюся простоту самой операции она предусматривает ее отдельные элементы как очень конкретно регламентированные. Нарушение этих требований чаще всего состоит в использовании виброуплотнения для кажущегося улучшения условий приготовления образца. Однако при вибрировании модифицированных химическими добавками смесей нарушается поровая структура материала. При этом может быть улучшена прочность, но не обеспечены условия для морозостойкости, особенно в случае присутствия специально введенной воздухововлекающей добавки.

Подготовку проб и испытания бетонных смесей регламентирует EN 12350:1999 (неадаптированный) в составе 7 частей, на которые дает ссылку ДСТУ Б В.2.7-176:2008 (рис.3). Можно предполагать, что принципиальных различий между этими нормами и прокомментированными отечественными не выявлено, что и позволяет их рекомендовать для применения.

Твердение контрольных образцов, как свидетельствует ДСТУ Б В.2.7-224:2009, может происходить в разных условиях, что связано с характером бетонной конструкции (сборная или монолитная) и типом прочности (проектная, отпускная, передаточная). Для определения проектной прочности образцы должны твердеть в нормальных условиях согласно ДСТУ Б В.2.7- 214: 2009 при температуре $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности не менее $95\pm 5\%$. Отпускная и передаточная прочность определяется на образцах, которые твердеют в условиях твердения конструкции. Прочность контрольных образцов бетона монолитных конструкций определяется при их хранении как в нормальных условиях лаборатории производителя, так и на строительной площадке в условиях, одинаковых с условиями конструкции. Последнее вызывает различные толкования:

- обеспечение одинаковых условий твердения монолитной конструкции по всему ее объему и образцов малореально;
- результаты определения прочности в заводской лаборатории и на объекте оказываются несопоставимыми и не ясно, каков статус той прочности, которая определена на образцах приобъектных.

Приведенные отечественные нормативные требования по обеспечению условий твердения образцов для определения прочности бетона допускают некоторые неточности, особенно в части приобъектных условий твердения. Можно полагать, что норма приобъектных испытаний является недостаточно четкой и требует для получения потребителем объективной характеристики прочности бетона проводить дополнительные испытания в *независимой лаборатории*.

Процедуры, связанные с регламентированием условий твердения бетонных образцов, изложены в 7 частях EN 12390:2000 (неадаптированные).



Рисунок 3 - Блок-схема связи ДСТУ Б В.2.7-176:2008 (EN 206-1:2000, NEQ) с неадаптированными стандартами EN

5. Достоверность результатов испытаний

В оценке достоверности показателя прочности бетона обязательной характеристикой является ее однородность. Ее составляющими согласно ДСТУ Б В.2.7-224:2009 являются среднее квадратическое отклонение (S_m) и коэффициент вариации (V_c).

Физический смысл определения S_m состоит в том, чтобы размах между единичными значениями прочности бетонных образцов в контролируемой партии (W_m) был минимальным, а число образцов в серии (a) максимальным, тогда среднее квадратичное отклонение будет стремиться к минимуму согласно зависимости $S_m = W_{m/a}$.

Коэффициент вариации указывает на особенности работы производителя бетона: минимизация этого показателя позволяет предприятию минимизировать требуемый уровень прочности в пределах класса. Например, при $V_c = 13,5\%$ (стандарт) и необходимости поставки бетона класса по прочности В40 его фактическая средняя прочность должна составлять 51,4 МПа, в то же время при $V_c = 8,0\%$ она может быть 46,0 МПа, а при $V_c = 6,0\%$ соответственно 44,4 МПа.

Согласно ДСТУ Б В.2.7-176:2009 однородность прочности характеризуется тремя критериями соответствия прочности при сжатии заданным требованиям. Они предполагают производить оценку соответствия на образцах 28 суточного твердения:

- из m образцов по средним значениям результатов испытаний - **критерий 1**;
- каждого отдельного результата испытаний образцов - **критерий 2**;
- для подтверждения того, что каждый отдельный член семейства бетонов принадлежит этому семейству - **критерий 3**.

Следует заметить, что производителям бетона еще предстоит освоить оценку соответствия по методике ДСТУ Б В.2.7-176:2009 для максимальной гармонизации отечественных требований в части прочности бетона с европейскими нормами.

6. Пример комплексной оценки прочности бетона в конструкции

Современное строительство отличается тем, что наряду с массовыми объектами жилищного и гражданского назначения реализует сложные архитектурные проекты, для которых требуется независимое сопровождение бетонирования с обязательной комплексной оценкой прочности бетона. Рассмотрим это на примере объекта в виде плиты ростверка общим объемом бетона класса по прочности В30 в пределах 10 тыс. м³, который был уложен при непрерывной подаче в течение 38 часов.

Производителем бетона осуществлена поставка смеси с помощью 10-кубовых автобетоновозов, разгрузка которых производилась с помощью бетононасосов. После проверки удобоукладываемости смеси по принятой схеме отбора проб изготавливались образцы, которые твердели в приобъектных условиях в специально подготовленном боксе при среднесуточной температуре воздуха в пределах 12-18°C и влажности до 50% в течение 7 суток, после чего были доставлены в лабораторию, где твердели в нормальных условиях до испытаний в возрасте 28 суток.

Анализ результатов контроля прочности бетона при сжатии по образцам (рис. 4) показывает, что размах в сериях образцов достигал $W_{sj}=15$ МПа при колебании значений средней прочности в сериях от 37 до 59 МПа. Выполнение контроля по 49 сериям образцов подтвердило получение достоверного значения средней прочности бетона конструкции $R_s=48,2$ МПа, т.е. его соответствие проектному классу В30.

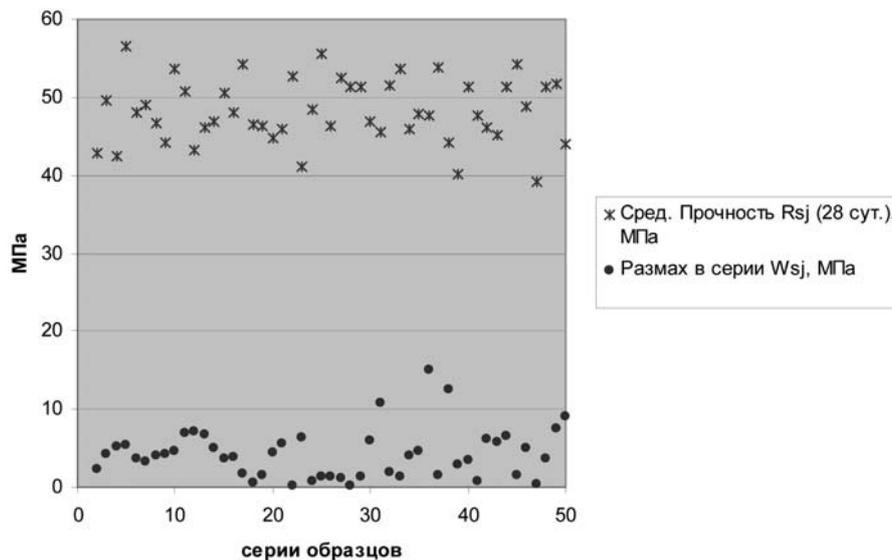


Рисунок 4 - Разброс значений средней прочности бетона и размаха прочности бетона в контрольных сериях образцов

При широком диапазоне изменения значений внутрисерийного коэффициента вариации прочности бетона при сжатии (рис. 5), его среднее значение по испытанным 49 сериям образцов составляет $V_c=7,8\%$, т.е. в пределах допустимых значений (предприятием регламентировано $V_c=8,0\%$).

При использовании неразрушающего метода контроля прочности в соответствии с требованиями ДСТУ Б В.2.7-220:2009 обработка результатов выполнена по показателям разброса значений средней прочности (рис. 6) и коэффициента вариации (рис.7).

При этом статистический анализ был выполнен по 115 точкам, в каждой из которых было произведено от 3 до 5 единичных замеров. Полученное значение средней прочности бетона конструкции $R_s=47,3$ МПа близко к полученному по контрольным образцам значению ($R_s=48,2$ МПа),

что подтверждает достоверность результата значений средней прочности и коэффициента вариации.

Интересной и важной дополняющей характеристикой прочности бетона в части ее однородности по объему конструкции является ее дефектоскопия, которая выполнена на объекте с использованием дефектоскопа А1220 «МОНОЛИТ» при одностороннем доступе ультразвуковой волны на глубину до 100 см. Всего было прозвучено 530 точек с охватом более 60 зон конструкции. В результате получены сигналограммы, по характеру которых можно качественно судить об однородности бетона. Установлено, что в наиболее ответственных зонах дальнейшего нагружения конструкции плиты таких отклонений не фиксируется, что позволило ее оценить как пригодную для дальнейшего продолжения строительных работ по проекту.

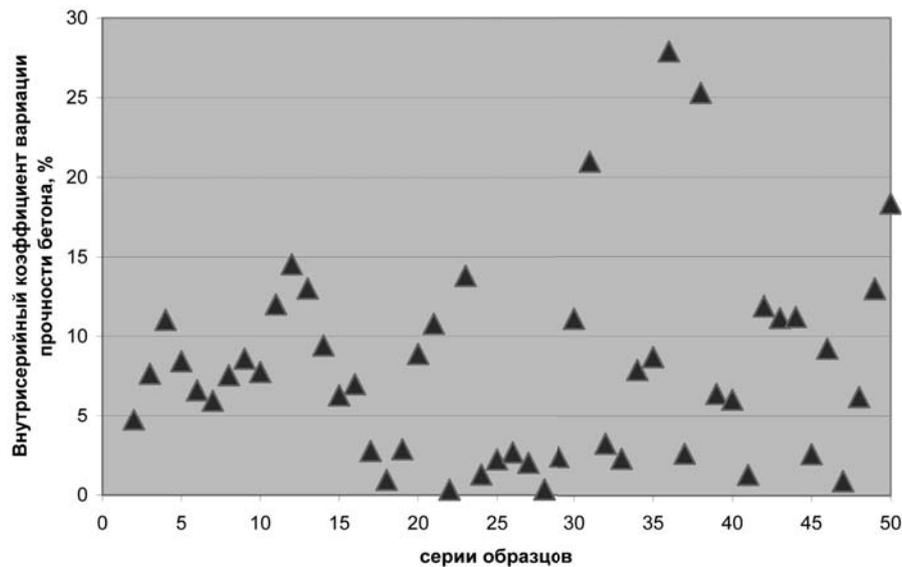


Рисунок 5 - Разброс значений внутрисерийного коэффициента вариации прочности образцов бетона при сжатии

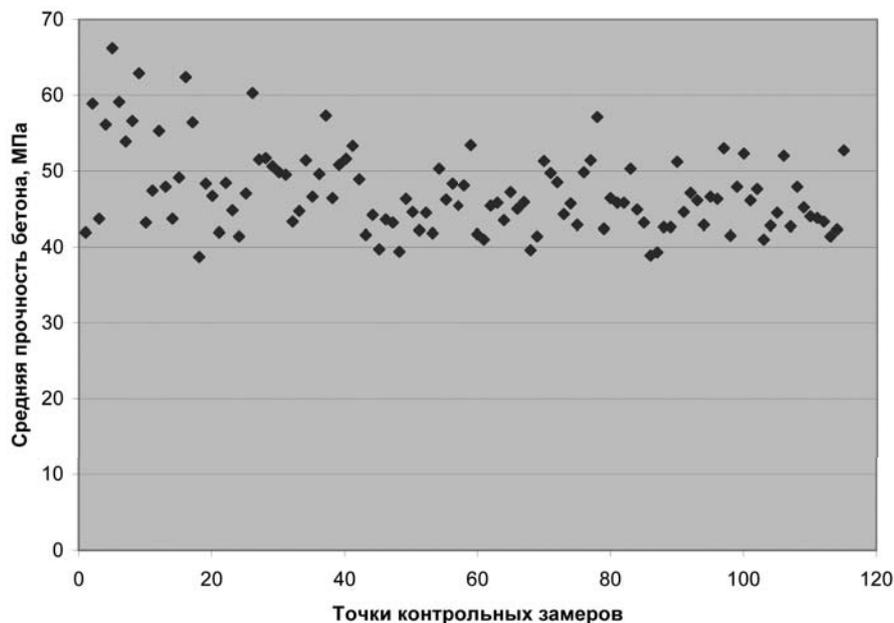


Рисунок 6 - Разброс значений средней прочности бетона при сжатии в точках контрольных замеров при неразрушающем методе контроля

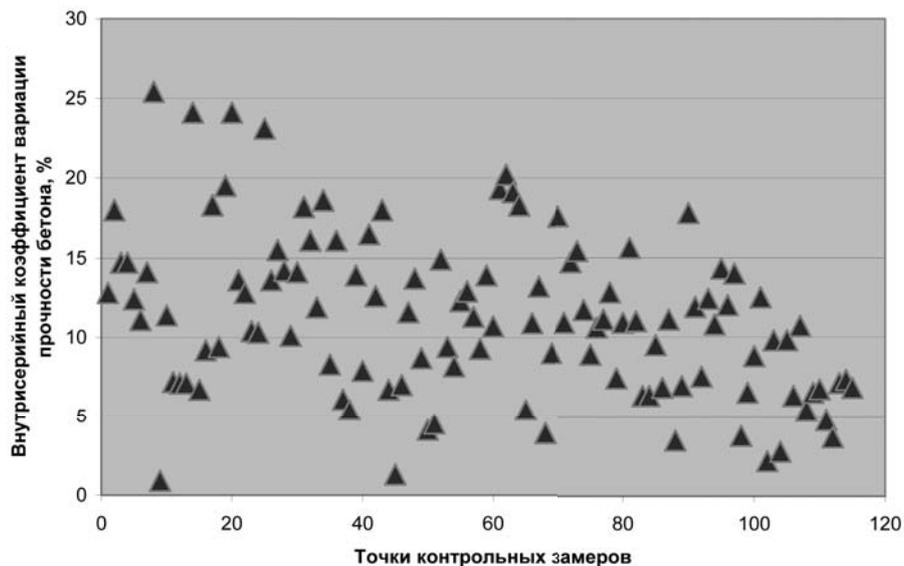


Рисунок 7 - Разброс значений внутрисерийного коэффициента вариации прочности бетона при сжатии при неразрушающем методе контроля

Общие выводы

1. Расширение сотрудничества Украины со странами ЕС сопровождается вхождением на отечественный строительный рынок международных компаний, которые в соответствии с законодательством Украины должны работать согласно ее нормативной базы. Это повышает ответственность производителей основного конструкционного материала, каким является бетон, за обеспечение его качества в соответствии с изменяющимися нормативными требованиями.
2. Практика работы с ведущими отечественными компаниями-производителями и потребителями бетона свидетельствует о целесообразности выполнения комплексной оценки прочности бетона, которая включает лабораторные и приобъектные испытания со статистической оценкой достоверности испытаний, а также испытание бетона в конструкции неразрушающими методами.
3. Подтверждение эффективности щелочных бетонов многолетней отечественной и зарубежной практикой их применения, нашедшая отражение в нормативных документах, позволяет обратить особое внимание исследователей на необходимость решения всех вопросов, касающихся определения прочности бетонов нового поколения этой группы.