

УДК 624.012.4: 539.4

**В. И. КОРСУН, А. В. НЕДОРЕЗОВ**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ БЕТОНА ПРИ НЕОДНООСНОМ СЖАТИИ**

Представлен анализ основных методик нагружения и измерения деформаций, применяемых в испытаниях бетона при не одноосных напряженных состояниях. Изложены основные составляющие разработанной специалистами ДонНАСА методики испытаний образцов-кубов на двух- и трехосное сжатие. Экспериментально обоснованы основные конструкции антифрикционных прокладок, рекомендуемых для применения при испытаниях бетонов низкой, средней и высокой прочности. Сформированы критерии выбора конструкции антифрикционных прокладок и рекомендации относительно способов измерения деформаций. Показано, что наиболее простыми в изготовлении и позволяющими достаточно эффективно снижать трение на границах контакта опытного образца и нагружающих жестких штампов являются многослойные прокладки из слоев медной или алюминиевой фольги, чередующихся с графитовой смазкой. Для измерения деформаций бетона при не одноосном сжатии рекомендуется применение тензорезисторов и индикаторов часового типа. Высокая чувствительность тензорезисторов к локальным деформациям на поверхностях образцов бетона является причиной искажений результатов измерения деформаций при уровнях нагружения выше 0,8 от разрушающего значения. Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния опытных образцов-кубов средствами вычислительного комплекса «ANSYS» при нагружении жесткими штампами с устранением и без устранения контактного трения свидетельствует о формировании зон концентрации напряжений и поперечных деформаций, расположенных симметрично направлению нагружения.

**бетоны, способы нагружения, измерение деформаций, устранение трения, критерии, объемное напряженно-деформированное состояние**

Развитие методов расчета конструкций, базирующихся на учете работы материалов в общем случае объемного напряженного состояния, в значительной степени сдерживается отсутствием достаточного количества достоверных экспериментальных данных о процессах деформирования и разрушения бетона при сложных напряженных состояниях. Опытные данные ряда исследователей [1–4, 6–11, 13, 16–27] при сопоставимых программах нагружения имеют порой существенные расхождения вследствие методических различий в проведении испытаний образцов бетона.

Основными факторами, существенно влияющими на результаты экспериментальных исследований, являются:

- форма и размеры опытных образцов;
- способ передачи сжимающих или растягивающих усилий на образец;
- способ устранения трения на границах контакта опытных образцов с нагружающими устройствами;
- способ измерения деформаций бетона в условиях частичной или полной недоступности граней опытных образцов, закрытых элементами нагружающих устройств;
- программа не одноосного нагружения – простое (пропорциональное) или сложное (непропорциональное).

В большинстве исследований использовались образцы следующих типов:

- кубы с ребром 100 мм [18, 21, 22, 27] и 150 мм [8, 13, 10];
- призмы размерами 150×150×600 мм [1, 2, 24], 150×150×454 мм [13], 70×70×280 мм и 100×100×400 мм [11];
- цилиндры диаметром 70, 80, 100, 140, 150 мм высотой соответственно 140, 160, 200, 280, 600 мм [3, 11, 17, 23, 26];

© В. И. Корсун, А. В. Недорезов, 2014

– пластины размерами 127×127×13 мм [25], 200×200×50 мм [24], 400×400×96 мм [1, 2] и 550×400×100 мм [8];

– плоские образцы крестообразной формы размерами 400×400×96 мм с выемками по углам размерами 100×100 мм [2].

Применение образцов-цилиндров с равномерным боковым (радиальным) обжатием ограничивает область изучаемых видов напряженного состояния исключением случаев неравномерного двух- и трехосного сжатия.

Известные методики испытаний бетона при не одноосном сжатии предполагают применение условно мягкого или условно жесткого способа передачи нагрузки на образец, каждый из которых требует соответствующего способа измерения деформаций.

В исследованиях [1, 2, 8, 10, 13, 18, 21, 22, 27] реализован жесткий способ передачи давления на грани образцов с помощью жестких стальных штампов. К достоинствам жесткого способа передачи давления относятся обеспечение равномерного поля деформаций бетона в нагружаемом направлении и возможность передачи больших сжимающих напряжений вплоть до разрушения образца. К недостаткам жесткого способа относятся необходимость устранения трения на границе контакта «опытный образец – жесткий штамп», а также необходимость центрирования образца относительно физического центра тяжести, что при не одноосных испытаниях существенно усложнено.

При мягком способе нагружения создание давления на гранях образцов осуществляется посредством передачи давления рабочей жидкости, создаваемого в замкнутой гидростатической системе.

К достоинствам мягкого способа передачи давления относятся обеспечение равномерного давления на нагружаемых поверхностях образца и отсутствие необходимости в устранении контактного трения. Основным недостатком мягкого способа нагружения является невозможность создания равномерного поля деформаций в направлениях нагружения вследствие высокой чувствительности конструкций передающих давление мембран к местным неровностям поверхностей и местным неплотностям структуры в виде микротрещин, капилляров и пор. Это, по мнению ряда исследователей [2, 11], и является основной причиной снижения прочности бетона в сравнении с результатами при нагружении жесткими штампами при сопоставимых видах напряженных состояний. Дополнительным недостатком мягкого способа нагружения могут быть ограничения в величинах прикладываемых сжимающих напряжений, определяемые конструкциями гибких мембран в случаях применения образцов в форме кубов и призм.

Применяются различные системы измерения линейных деформаций образцов бетона в условиях не одноосных напряженных состояний: датчики индукционного типа и индикаторы часового типа, закрепляемые на специальных выносных рамках [1, 2, 8, 10, 17, 18, 21, 22, 23, 26, 27], тензорезисторы, наклеиваемые на поверхности образцов [1, 2, 3, 13, 17, 18, 21, 23, 26, 27], а также специальные лазерные устройства [22]. В части исследований для повышения точности результатов использовано одновременно нескольких систем измерения деформаций. Для крепления индукционных датчиков и приборов механического действия необходимы специальные конструкции с выносными элементами за пределы конструкций нагружающих устройств.

Тензорезисторы чувствительны к локальным деформациям и к трещинообразованию на поверхности бетона в стадии, близкой к разрушению, что вносит дополнительные погрешности в измеряемые величины.

При нагружении бетонных образцов жесткими штампами большое влияние на результаты испытаний оказывают силы трения между стальными плитами и бетонным образцом, которые сдерживают деформации материала образца в поперечном направлении, обуславливая возникновение в бетоне неоднородного объемного напряженного состояния.

При не одноосных испытаниях образцов бетона исследователями применялись два основных способа устранения влияния контактного трения: стальные штампы из отдельных стерженьков (штампы типа «щетки») [20, 21, 27] и антифрикционные прокладки [1, 2, 8, 10, 18, 22, 24]. Конструкции первого типа технически сложны в исполнении и подвержены повреждениям при высоких уровнях нагружения. Антифрикционные прокладки представляют собой, как правило, многослойные конструкции из материалов с механическими характеристиками, близкими к характеристикам бетона, или из материалов с низким коэффициентом трения. Детально принципы подбора антифрикционных прокладок рассмотрены в работе [4].

В разработанной специалистами ДонНАСА [8] методике испытания образцов-кубов на двух- и трехосное сжатие учтены все усложняющие факторы влияния, охарактеризованные выше. Способ передачи давления принят жесткий с устранением трения слоистыми прокладками из 5–6 слоев медной

или алюминиевой фольги с прослойками из графитовой смазки [7, 8]. Прокладки такой конструкции применимы также и для испытаний в условиях повышенных и отрицательных температур [7]. Конструкции специально разработанных нагружающих штампов обеспечивают размещение в их внутренних полостях подвижных рамок для крепления измерительных приборов – индикаторов часового типа МИГ-1. Конструкции рамок опираются непосредственно на грани бетонного образца. Для исключения контакта рамок с нагружающими штампами во внутренних полостях предусмотрены достаточные конструктивные зазоры.

Выбор конструкции антифрикционных прокладок осуществляется с применением следующих критериев оценки достоверности полученных результатов:

1. Примерное равенство значений прочности образцов разных форм – кубов, призм, пластин и др. при принятом способе устранения трения.

2. Примерное равенство поперечных деформаций бетона в различных уровнях по высоте образца в условиях осевого сжатия.

Первым критерием констатируется, что прочность бетона есть характеристика материала и не должна зависеть от формы и размеров опытных образцов. Выполнение второго критерия характеризует создание в образце однородного деформированного состояния, при котором силы контактного трения не оказывают сдерживающего влияния на поперечные деформации образца.

Конструкции разработанных в работах [7, 8] слоистых антифрикционных прокладок из фольги и графита применены для бетонов средней прочности классов В30–В40. Подбор их конструкции осуществлен с использованием первого из двух вышеприведенных критериев. Пробные испытания образцов-кубов из бетона класса В80 показали недостаточную эффективность прокладок разработанной в работе [8] конструкции. Напряжения, создаваемые в бетоне кубов, концентрировалось ближе к центру контактной зоны, что приводило к расколу образцов по ориентированной вертикально магистральной трещине на ранних стадиях нагружения при напряжениях порядка  $\eta \approx 0,3 \cdot R_b$ . Эти результаты показали необходимость подбора конструкций антифрикционных прокладок для образцов бетона более широкого диапазона классов по прочности от В20 до В90.

При подборе составов антифрикционных прокладок с целью обеспечения однородного напряженного и деформированного состояния бетона в направлениях нагружения решались две основные задачи: обеспечение равномерной передачи давления на образец от жесткого штампа и снижение контактного трения на границе контакта «жесткий штамп – образец». Тестирование антифрикционных прокладок осуществлялось в условиях осевого сжатия образцов-кубов размерами 150×150×150 мм путем сопоставления значений их прочности и деформаций с соответствующими значениями на образцах-призмах размерами 150×150×600 мм, испытанных по стандартной методике [5]. Исследования выполнены для бетонов классов по прочности В25, В40 и В80. Составы бетонов представлены в работах [9, 14, 15].

В испытаниях приняты следующие конструкции антифрикционных прокладок.

1. Конструкция № 1 (КАП-1) состоит из четырнадцати слоев алюминиевой фольги (два наружных слоя толщиной  $\delta = 0,15$  мм, двенадцать внутренних слоев толщиной  $\delta = 9$  мкм), чередующихся со слоями графитовой смазки из порошкообразного графита марки ГЛ-1 (ГОСТ 5279-74), пропитанного маслом И-40 и перемешанного до пастообразного состояния. Соединение слоев – прошивкой нитью по периметру с последующим обжатием нагрузкой 1 000–1 200 кН под прессом. Толщина прокладки после обжатия – около  $\delta = 1,25$  мм.

2. Конструкция № 2 (КАП-2) состоит из слоя жесткой резины, толщиной 1,35 мм, разрезанной на квадраты размером 10×10 мм, которые приклеивались с помощью клея на слой алюминиевой фольги толщиной  $\delta = 0,15$  мм.

3. Конструкция № 3 (КАП-3) представляет собой слой цементно-эпоксидного компаунда состава Ц:Эп = 1:2, наносимого в жидком состоянии на грани образца и выдерживаемого до полного отверждения.

4. Конструкция № 4 (КАП-4) состоит из листа цветного металла с характеристиками механических свойств, приближенными к характеристикам бетона. Испытаны три варианта прокладок данного типа:

КАП-4.1 – из листа магния марки МА8 толщиной 2 мм;

КАП-4.2 – из листа дюралюминия марки АМГ2Н толщиной 3 мм;

КАП-4.3 – из листа латуни марки Л63 толщиной 2 мм.

Наиболее лучшие результаты для рассмотренных вариантов прокладки типа КАП-4 получены при использовании их в разрезанном состоянии и совместно с прокладкой КАП-1. Соответственно

классам бетонов наиболее эффективными являются следующие комбинации антифрикционных прокладок:

КАП-4.1 + КАП-1 – для бетонов класса В25;

КАП-4.2 + КАП-1 – для бетонов класса В40;

КАП-4.3 + КАП-1 – для бетонов класса В80.

Близкие результаты получены и при использовании прокладки одного типа КАП-1, которая и рекомендуется для применения как основная и универсальная в условиях двух- и трехосного сжатия. Прокладки типов КАП-2 и КАП-3 показали приемлемые результаты только для бетонов невысокой прочности (класса В25).

Для анализа напряженно-деформированного состояния бетонного образца-куба при испытаниях на одноосное сжатие выполнено моделирование средствами программного комплекса «ANSYS» (версия 14.5). Разработано две расчетные модели, включающие бетонный образец размерами 150×150×150 мм, нагружающие штампы размерами 150×150×150 мм и плиты пресса размерами 500×500×150 мм. Отличия между моделями заключались в конструкциях нагружающих штампов. В первой модели размеры штампа в зоне контакта совпадали с размерами поперечного сечения бетонного образца, а во второй модели штамп выполнен с уменьшенными на величину конструктивных зазоров размерами сечения в зоне контакта, равными 145×145 мм. Конструкция штампа по второй модели соответствует конструкции, использованной в экспериментах при испытаниях образцов-кубов на трехосное сжатие. Общий вид расчетных моделей представлен на рис. 1.

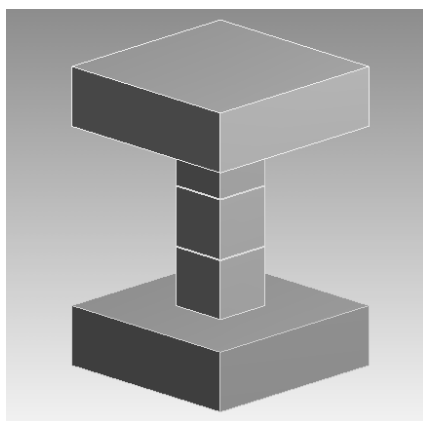


Рисунок 1 – Общий вид расчетной модели.

При моделировании приняты следующие характеристики материалов: плита пресса – абсолютно жесткое недеформируемое тело; нагружающие штампы – из стали с модулем упругости  $E_s = 2 \cdot 10^5$  МПа и с коэффициентом поперечных деформаций  $\mu = 0,3$ ; бетонный образец – из бетона класса по прочности В25 с начальным модулем упругости  $E_b = 30 \cdot 10^3$  МПа и коэффициентом поперечных деформаций  $\mu = 0,18$ .

В зонах контакта были приняты следующие коэффициенты трения: «плита пресса – нагружающий штамп»  $\mu = 0,8$ , «нагружающий штамп – бетонный образец»  $\mu = 0$  при моделировании полного устранения трения и  $\mu = 0,3$  при моделировании трения в контактной зоне. Для каждой из моделей выполнены две группы расчетов: с устранением (расчеты 1а и 2а) и без устранения контактного трения (расчеты 1б и 2б).

Представленные на рис. 2 и рис. 3 результаты расчетов свидетельствуют, что в случае полного устранения трения между образцом и нагружающим штампом моделируется симметричное, близкое к равномерному поле продольных и поперечных деформаций. Несущественные расхождения в значениях поперечных деформаций на рис. 2, б связаны с накоплением некоторой погрешности при итерационном методе расчета. В случае полного устранения контактного трения и при уменьшении размеров поперечного сечения передающих нагрузку штампов (модель № 2) наблюдается концентрация нормальных напряжений в бетоне под наружными границами штампов и соответствующая концентрация деформаций (рис. 3), что и объясняет наблюдающиеся в экспериментах отслоения наружных слоев бетона в виде лещадок по периметру образца-куба.

В случаях учета контактного трения (расчеты 1б и 2б) отмеченные выше показатели неоднородности напряженно-деформированного состояния по объему образцов-кубов проявляются более явно.

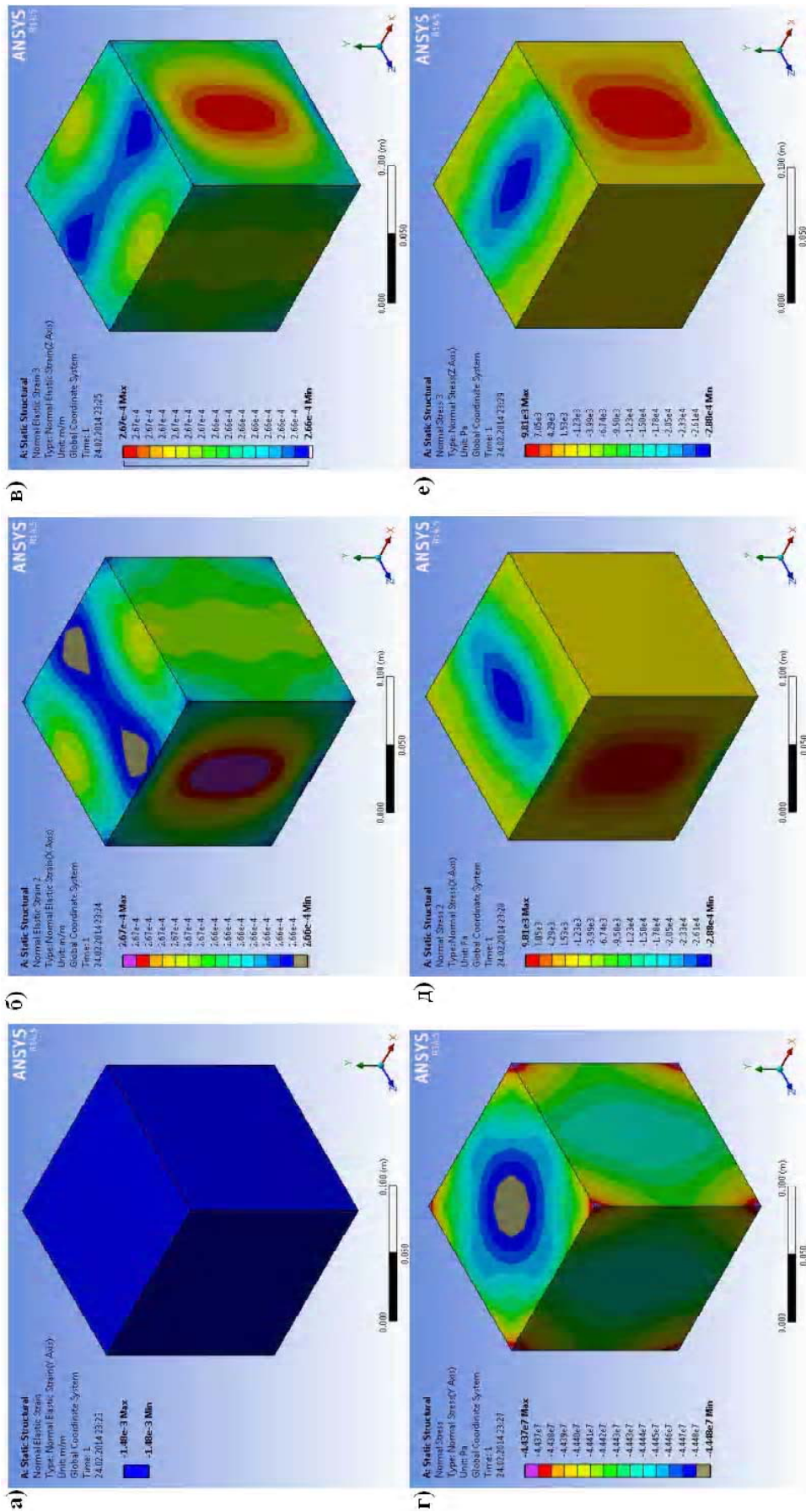


Рисунок 2 – Расчет 1 а: деформации продольные  $\epsilon_y$  (а) и поперечные  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_z$  (б, в) в модели № 1 при осевом сжатии вдоль оси «Y»; г, д, е – соответствующие нормальные напряжения вдоль осей «Y», «X» и «Z».

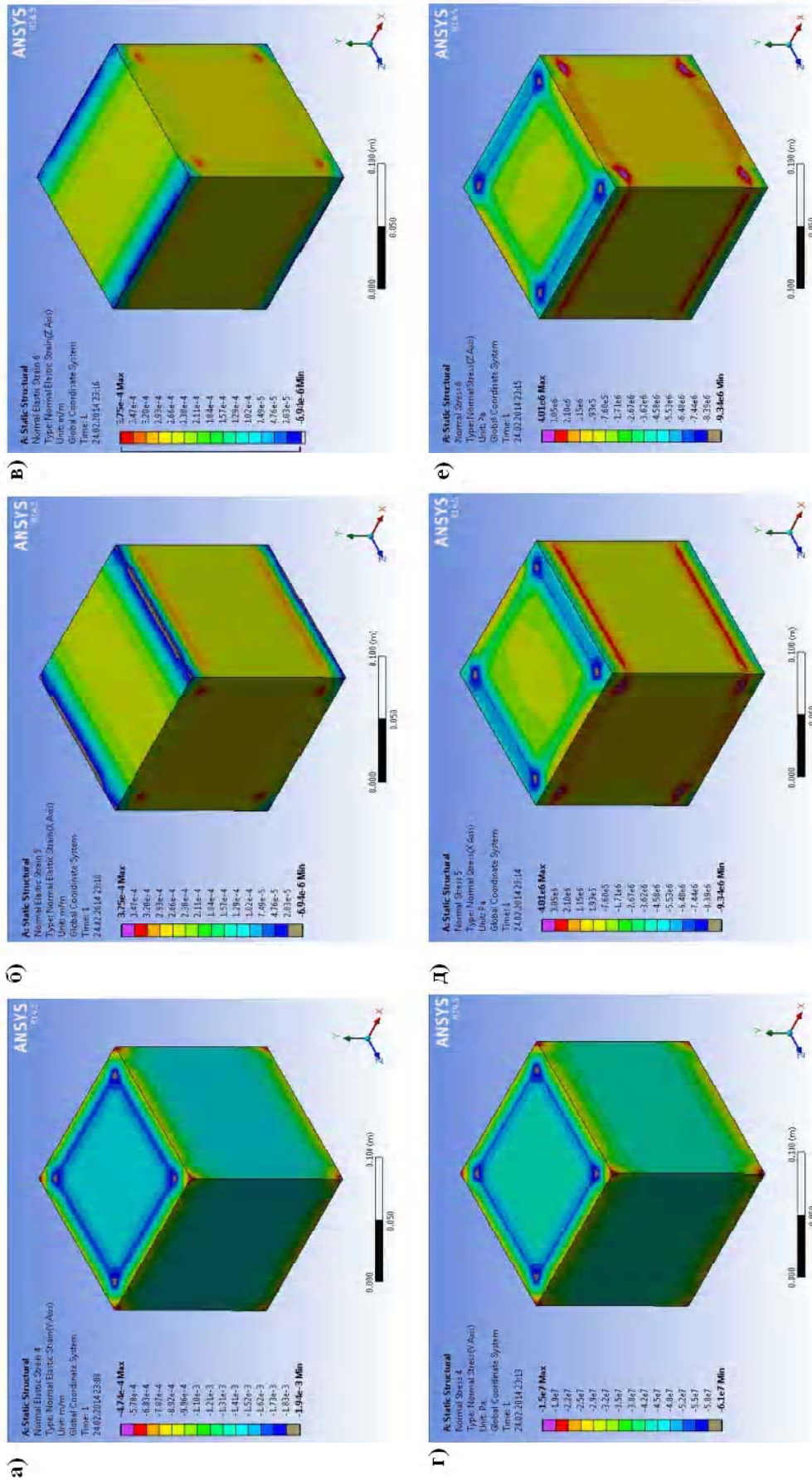


Рисунок 3 – Расчет 2 а: деформации продольные  $\epsilon_x$  (а) и поперечные  $\epsilon_y$  (б, в) в модели № 2 при осевом сжатии вдоль оси «Y»; г, д, е – соответствующие нормальные напряжения вдоль осей «Y», «X» и «Z».

## ВЫВОДЫ

1. В настоящее время не существует универсальной методики испытаний образцов бетона в условиях трехосного сжатия. Важными элементами методики являются конструкции опытных образцов, способы передачи давления на образец, способы устранения контактного трения и способы измерения деформаций.
2. Для экспериментального исследования процессов деформирования и разрушения бетона при не одноосном сжатии наиболее предпочтительным является жесткий способ передачи давления на опытный образец, как позволяющий создавать высокие уровни напряжений сжатия.
3. Для испытаний бетонов низкой, средней и высокой прочности необходим тщательный подбор конструкций антифрикционных прокладок в соответствии с критериями по показателям прочности вне зависимости от формы образцов и по равенству поперечных деформаций по высоте образца в условиях осевого сжатия.
4. Наиболее простой в изготовлении и достаточно эффективной в работе является конструкция многослойных антифрикционных прокладок из слоев медной или алюминиевой фольги, чередующихся со слоями графитовой смазки.
5. Для измерения деформаций бетона в условиях трехосного сжатия наиболее удобными являются наклеиваемые на бетон тензорезисторы, однако при нагружении сжатием выше уровня  $\eta \approx 0,8 \cdot R_b$  наблюдается замедление прироста фиксируемых деформаций укорочения бетона вследствие высокой чувствительности тензорезисторов к локальным деформациям и микротрещинам на поверхности бетона в процессе нагружения. Более точные и стабильные результаты измерения деформаций характерны для приборов механического действия (индикаторы часового типа МИГ-1, 2). Однако их применение требует разработки специальных конструкций крепления к образцу и конструкций нагружающих штампов.
6. Моделирование напряженно-деформированного состояния образцов-кубов с помощью вычислительного комплекса «ANSYS» свидетельствует о концентрации напряжений сжатия в центральной части нагружаемых граней и поперечных деформаций удлинения в контурных зонах кубов.
7. Для образцов из высокопрочного бетона, обладающего малым запасом пластических деформаций, важным в методике испытаний является обеспечение равномерного давления по плоскости нагружаемых граней для исключения раскалывания опытных образцов на ранних этапах нагружения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берг, О. Я. О прочности бетона при двухосном сжатии [Текст] / О. Я. Берг, Н. В. Смирнов // Бетон и железобетон. – 1965. – № 11. – С. 37–39.
2. Берг, О. Я. Исследование прочности и деформаций бетона при двухосном сжатии [Текст] / О. Я. Берг, Н. В. Смирнов // Труды Всесоюзного НИИ транспорт. строительства. – М., 1966. – Вып. 60. – С. 79–108.
3. Берг, О. Я. Исследование напряженного и деформированного состояния бетона при трехосном сжатии [Текст] / О. Я. Берг, Г. Г. Соломенцев // Труды Всесоюзного НИИ транспорта, строительства. – М., 1969. – Вып. 70. – С. 106–123.
4. Бич, П. М. Об испытании бетона при сложных напряженных состояниях [Текст] / П. М. Бич, П. Г. Чеснаков, В. Н. Радюк // Бетон и железобетон. – 1978. – № 2. – С. 16–17.
5. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона [Текст]. – Введ. 1982-01-01. – М. : Стандартинформ, 2005. – 14 с.
6. Кириллов, А. П. Исследования прочности бетона в сложном напряженном состоянии [Текст] / А. П. Кириллов, П. Г. Павлов // Бетон и железобетон. – 1989. – № 6. – С. 15–16.
7. Корсун, В. И. Влияние температур от  $-50^\circ$  до  $+150^\circ$  C на прочность и деформации тяжелого бетона при плоском напряженном состоянии [Текст] / В. И. Корсун, А. М. Баев // Новые технологические решения для строительной промышленности Донбасса : сборник научных трудов / Редакционная коллегия: Е. В. Горохов (отв. ред.) и др. – К. : УМК ВО, 1989. – С. 129–136.
8. Корсун, В. И. Об особенностях испытаний бетона при не одноосных напряженных состояниях в условиях температурных воздействий [Текст] / В. И. Корсун, Ю. Ю. Калмыков // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. – Макеевка, 2003. – Вип. 2003-2(39) : Будівельні конструкції, будівлі та споруди. Т. 1. – С. 198–201.
9. Корсун, В. И. Прочность и деформации высокопрочных мелкозернистых модифицированных бетонов в условиях кратковременного нагрева до  $+200^\circ$  C [Текст] / В. И. Корсун, А. В. Корсун, А. С. Волков // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса : ОДАБА, 2007. – Вип. 27. – С. 207–212.
10. Корсун, В. И. Закономерности ортотропного деформирования бетона при не одноосном сжатии [Текст] / В. И. Корсун, Ю. Ю. Калмыков, А. В. Недорезов // Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов : сборник научных трудов. Т. 1 / Российская академия архитектуры и строительных наук, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. – Воронеж : ВГАСУ, 2013. – С. 178–187.

11. Малашкин, Ю. Н. Оценка предельных состояний бетона при двухосном сжатии [Текст] / Ю. Н. Малашкин, И. М. Безгоднов // Предельные состояния бетонных и железобетонных конструкций энергетических сооружений : Материалы конференций и совещаний по гидротехнике / Ред.-изд. совет : М. Ф. Складнев (пред.) и др. – Л. : Энергоиздат, 1982. – С. 183–188.
12. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел [Текст] Т. 1 / А. Надаи. – М. : Издательство иностранной литературы, 1954. – 647 с.
13. Рекомендации по определению прочностных и деформационных характеристик бетона при одноосных напряженных состояниях [Текст] / Госстрой СССР, Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт бетона и железобетона. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1985. – 72 с.
14. Рекомендации по подбору составов тяжелых и мелкозернистых бетонов (к ГОСТ 27006-86) [Текст] / Государственный строительный комитет СССР. – М. : ЦИТП, 1990. – 88 с.
15. Рекомендации по проектированию железобетонных дымовых труб [Текст] / Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт «Теплопроект». – М. : ВНИПИ Теплопроект, 1985. – 120 с.
16. Яшин, А. В. Влияние сложного (непропорционального) нагружения на деформации и прочность бетона при трехосном сжатии [Текст] / А. В. Яшин, А. К. Кулманов // Поведение бетонов и элементов железобетонных конструкций при воздействии различной длительности : сборник научных трудов / под ред. : А. А. Гвоздева, С. М. Крылова. – М. : НИИЖБ, 1980. – С. 4–17.
17. Dupray, F. Comportement du béton sous fort confinement : Étude en compression et en extension triaxiales à l'échelle mésoscopique, s. l. : Thèse de doctorat [Текст] / F. Dupray, Université Joseph Fourier. – Grenoble, 2008. – 192 p.
18. Geel, Van E. Concrete behavior in multiaxial compression, experimental research [Текст] : Doctoral thesis / Van E. Geel. – Eindhoven, 1998. – 178 p.
19. Hilsdorf, H. Versuchstechnische Probleme beim Studium der Verformungseigenschaften des Betons [Текст] / H. Hilsdorf // Materialprüfung. – 1963. – № 5. – S. 421–428.
20. Kupfer, H. Das Verhalten des Betons unter zweiachsiger Beanspruchung [Текст] / H. Kupfer // Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität. – Dresden, 1968. – № H. 6. – P. 1515–1518.
21. Mier, Van J. G. M. Strain-softening of concrete under multiaxial loading conditions [Текст] : Doctoral dissertation / by Johannes Gerardus Maria van Mier. – Eindhoven, 1984. – 349 p.
22. Petkovski, M. Apparatus for testing concrete under multiaxial compression at elevated temperature (mac2T) [Текст] / M. Petkovski, R. S. Crouch, P. Waldron // Experimental Mechanics. – 2006. – № 46. – P. 387–398.
23. Essais de fluage confinés et thermo-régulés sur enrobés bitumineux: expérimentation et modélisation [Текст] / J. Sohm, T. Gabet, P. Hornych, J. M. Piau // 20 Congrès Français de Mécanique, August 28<sup>th</sup> – September 2nd, 2011, Besançon, France / Association Français de Mécanique. – Besançon : AFM, Maison de la Mécanique, 2011. – P. 1–6.
24. Schröder, S. Festigkeit und Verformungseigenschaften des Betons bei zweiachsiger Druckbeanspruchung [Текст] / S. Schröder, H. Opitz // Bauplanung Bautechnik. – 1968. – 22. Jg. Heft 4. – P. 190–196.
25. Tasuji, M.E. Stress-strain response and fracture of concrete in biaxial loading [Текст] / M. E. Tasuji, F. O. Slate, A. H. Nilson // ACI Journal, Proceedings. – 1978. – V. 75, No. 7. – P. 306–312.
26. Thomas, G. Comportement triaxial du béton sous fortes contraintes: Influence du trajet de chargement, s. l. [Текст] : Thèse de doctorat / G. Thomas. – Saint-Martin-d'Hères, 2006. – 186 p.
27. Torrenti, J. M. Comportement multiaxial du beton: aspects experimentaux et modelisation, s. l. [Текст] : Thèse de doctorat / J. M. Torrenti. – Champs-sur-Marne, 1987. – 350 p.

Получено 09.01.2014

**В. І. КОРСУН, А. В. НЕДОРЄЗОВ**  
**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИПРОБУВАНЬ БЕТОНУ ПРИ**  
**НЕОДНОВІСНОМУ СТИСКУ**  
**Донбаська національна академія будівництва і архітектури**

Представлено аналіз основних методик навантаження та вимірювання деформацій, які застосовуються у випробуваннях бетону при неодновісних напружених станах. Викладено основні складові розробленої фахівцями ДонНАБА методики випробувань зразків-кубів на двох-і тривісне стискання. Експериментально обґрунтовано основні конструкції антифрикційних прокладок, рекомендованих для застосування при випробуваннях бетонів низької, середньої та високої міцності. Сформовано критерії вибору конструкції антифрикційних прокладок та рекомендації щодо способів вимірювання деформацій. Показано, що найбільш простими у виготовленні і такими що дозволяють досить ефективно знижувати тертя на границях контакту дослідного зразка і навантажувальних жорстких штампів є багат шарові прокладки з шарів мідної або алюмінієвої фольги, що чергуються з графітовим мастилом. Для вимірювання деформацій бетону при неодновісному стисненні рекомендується застосування тензорезисторів та індикаторів годинникового типу. Висока чутливість тензорезисторів до локальних деформацій на поверхнях зразків бетону є причиною відхилення результатів вимірювання деформацій при рівнях навантаження вище 0,8 від руйнівного значення. Теоретичний аналіз напружено-деформованого стану дослідних зразків-кубів засобами обчислювального комплексу «ANSYS» при



навантаженні жорсткими штампами з усуненням і без усунення контактної тертя свідчить про формування зон концентрації напружень і поперечних деформацій, розташованих симетрично напрямку навантаження.

**бетони, способи навантажування, вимір деформацій, усунення тертя, критерії, об'ємний напружено-деформований стан**

VOLODYMYR KORSUN, ANDRII NIEDORIEZOV  
IMPROVED METHODS OF CONCRETE TESTS AT MULTIAXIAL  
COMPRESSION

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The analysis of the basic methods of loading and strain measurement used in the concrete multiaxial stress state tests are presented. Main components of the methods of specimen (cubes) test at two- and triaxial compression developed by specialists from DonNACEA are given. The basic structure of antifriction pads which are recommended for use in concrete tests of low, medium and high strength are experimentally proved. The criteria for selecting structure of antifriction gaskets and recommendations with respect to the methods of strain measuring are formed. It is shown that multilayer gaskets from layers of copper or aluminum foil which alternate with graphite greasing are most simple to produce and effectively allow to reduce the friction at the borders of the test specimen and loading stamps. Strain gauges and dial gauges are recommended to use for measurement of concrete strain under multiaxial compression. Strain gauges high sensitivity to local strains on the surfaces of concrete specimens is the reason of the result distortions of strain measurement at loading levels higher than 0,8 from the destructive values. Theoretical analysis of the stress-strain state of specimens (cubes) with using the CAD system «ANSYS» indicates the formation of stress concentration regions and lateral strains disposed symmetrically to loading direction.

**concrete, loading methods, measurement of strains, friction eliminating, criteria, the volumetric stress state**

**Корсун Володимир Іванович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізобетонних конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розробка методів розрахунку залізобетонних конструкцій для загального випадку об'ємного напруженого стану з урахуванням силових і температурно-вологісних впливів різної тривалості.

**Недорезов Андрій Володимирович** – асистент кафедри залізобетонних конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: експериментальні дослідження процесів деформування і руйнування бетону при складних напружених станах.

**Корсун Владимир Иванович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: разработка методов расчета железобетонных конструкций для общего случая объемного напряженного состояния с учетом силовых и температурно-влажностных воздействий различной длительности.

**Недорезов Андрей Владимирович** – ассистент кафедры железобетонных конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: экспериментальные исследования процессов деформирования и разрушения бетона при сложных напряженных состояниях.

**Korsun Volodymyr** – DSc (Eng.), Professor, Head of the Reinforced Concrete Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of analysis for general case of three dimensional stress reinforced concrete structures taking into account the temperature and moisture effects of different duration.

**Niedoriezov Andrii** – assistant of the Reinforced Concrete Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: experimental studies of concrete deformation and fracture under complex stress states.