

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-6-52-61

Гао Ш., \*Попов А.Л., Назаров Т.А.

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова

\*E-mail: tdmtrieva-bel@yandex.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА С УЧЕТОМ ЕГО СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

**Аннотация.** В данной статье на основе мезомеханического подхода разработана трехмерная модель бетона со случайным распределением заполнителя, применена пластическая модель повреждения для моделирования механических свойств бетона при одноосном сжатии и растяжении и процессов развития и формирования трещин. Путем варьирования параметров исследовано влияние многофазных характеристик бетона, включая объемную долю крупного заполнителя и свойства переходной зоны на границе раздела заполнитель-раствор (ПЗК), на диаграмму деформирования "напряжение-относительная деформация". Численное исследование показало, что объемная доля крупного заполнителя незначительно влияет на прочность бетона при раскалывании, но существенно повышает его прочность на сжатие, причем наблюдается прямая пропорциональная зависимость; свойства переходной зоны (ПЗК) между заполнителем и раствором являются важным параметром макроскопического отклика бетона. Исследование выявило, что с увеличением толщины переходной зоны прочность бетона на сжатие возрастает, однако этот прирост носит невыраженный характер; все результаты моделирования демонстрируют удовлетворительное соответствие с экспериментальными кривыми деформирования при сжатии. С учетом вычислительного времени и затрат на моделирование, параметры модели с толщиной переходной зоны 0,3 мм (ПЗК) показали наибольшую практическую целесообразность.

**Ключевые слова:** бетон, одноосное сжатие, диаграмма деформирования, мезоструктура, численное моделирование.

**Введение.** В настоящее время все чаще расчет на прочность и жесткость железобетонных конструкций осуществляется методом конечных элементов [1, 2]. Зачастую при расчете деформаций и разрушения материалов, бетон рассматривается как однородный материал с заданными механическими свойствами, из-за чего диаграмму «напряжения – относительные деформации» определяют из опытных данных [3], в итоге, такие модели не позволяют адекватно провести расчет деформаций и разрушения бетона, так как не обладают информацией о структуре бетона, которая главным образом характеризуется наличием крупного заполнителя, который в свою очередь может обладать различным фракционным составом и распределяться по объему материала случайным образом [4]. Таким образом, так как прочность бетона обладает выраженной нелинейной зависимостью как от собственной плотности, так и от прочности и плотности крупного заполнителя [5–8], научный интерес вызывает возможность получения диаграмм деформирования "напряжение - относительная деформация" от многофазных характеристик бетона, включая объемную долю крупного заполнителя и свойства переходной зоны на границе раздела заполнитель. На сегодня уже возможно моделирование структуры бетона с учетом случайного распределения крупного заполнителя различного размера методом Монте-

Карло, где неупорядоченное размещение формируется за счет присвоения объекту в случайных координатах (x, y, z) выбранных генератором случайных чисел [9]. При этом в процессе генерации микроструктуры соблюдаются три ключевых геометрических ограничения: условие взаимного непересечения частиц заполнителя (моделирование их как твердых тел), условие полной принадлежности всех частиц границам представительного элементарного объема и условие соответствия распределения их размеров заданному гранулометрическому составу, описываемому кривой Фуллера [10]. Размещение прекращается, когда объем размещенного заполнителя достигает требуемого значения.

Важной составляющей модели мезоструктуры бетона является так называемая переходная зона контакта (ПЗК), это область цементной пасты вокруг частиц заполнителя, которая нарушается присутствием заполнителя. Ее происхождение связано с упаковкой зерен цемента на поверхности гораздо более крупных зерен заполнителя, что приводит к локальному увеличению пористости и повышенной концентрации мелких частиц цемента в этой области. Благодаря многочисленным исследованиям контактной зоны стало возможным утверждать о ее толщине около 50–60 мкм [11–13], при этом несмотря на то, что данная область является частью цементной матрицы, по своим свойствам

она отличается, как от заполнителя, так и от цементного камня, как правило, ПЗК можно рассматривать как ослабленный раствор с механическими параметрами равными 60–80 % от соответствующих параметров исходного цементного камня [14]. В процессе моделирования, формирование переходной зоны на границе раздела осуществляется путем создания оболочки, расширяющейся наружу от поверхности уже сгенерированных случайных выпуклых многогранных заполнителей на заданную толщину [15].

Таким образом, актуальной задачей является моделирование бетонного массива с учетом его структурных особенностей, связанных с наличием крупного заполнителя (щебня), переходной контактной зоны и цементного раствора. Особенно это важно, когда моделируются процессы разрушения, связанные с первичным разрушением контактной зоны как наиболее уязвимой по своим механическим характеристикам [16, 17].

Целью представленного исследования явилось мезомасштабное моделирование бетона, включающее в себя три фазы: зерна крупного заполнителя, цементный-песчаный раствор и контактную переходную зону.

Для достижения цели работы поставлены следующие задачи:

1. Получение полных диаграмм напряженно-деформированного состояния бетона включающие нисходящую ветвь (стадию разупрочнения) при различном объемном содержании крупного заполнителя.

2. Получение оптимальной расчетной схемы для моделирования процесса разрушения бетона в программном комплексе ABAQUS в соответствии с экспериментальными данными.

**Материалы и методы.** В работе для получения бетона использовался портландцемент производства компании «Шаньшуй Цемент

Групп Ко., Лтд.» (провинция Шаньдун, Китай) класса прочности Р.О 42.5 по стандарту GB 175-2023, соответствующий ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108-2020 (табл. 1). В качестве крупного заполнителя использовался гранитный щебень фракции 5...20 мм, I класса лещадности формы согласно ГОСТ 8267 и мелкий заполнитель в виде среднего песка к II класса согласно ГОСТ 8736. Технические характеристики заполнителей производства компании «Хуасинь Зелёные Строительные Материалы (Усюэ)», Китай представлены в таблицах 2 и 3. В качестве суперпластификатора применялась поликарбоксилатная высокоэффективная водоредуцирующая добавка производства Zhejiang Hongqiang New Materials Co., Ltd. (Китай) с водоредуцирующей способностью 26 % и массовой долей сухого вещества 13 % (табл. 4).

Таблица 1

**Свойства портландцемента марки  
Р.О 42.5 GB 175-2023**

| Показатель                                               | Значение |
|----------------------------------------------------------|----------|
| Прочность при сжатии в 3-суточном возрасте, МПа          | 28,7     |
| Прочность при сжатии в 28-суточном возрасте, МПа         | 49,8     |
| Водопотребление нормальной густоты (цементного теста), % | 25       |

Таблица 2

**Технические характеристики песка**

| Показатель                                    | Значение |
|-----------------------------------------------|----------|
| Влажность, %                                  | 5.5      |
| Содержание глинистых частиц, %                | 1.8      |
| Содержание хлорид-ионов, %                    | 0.002    |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                  | 2600     |
| Пористость, %                                 | 37       |
| Содержания глинистых и илистых примесей, г/кг | 1        |
| Модуль крупности                              | 2.9      |

Таблица 3

**Технические характеристики крупного заполнителя**

| Показатель                                                             | Значение |
|------------------------------------------------------------------------|----------|
| Пористость, %                                                          | 38       |
| Гранулометрический состав заполнителя, мм                              | 5–20     |
| Дробимость, %                                                          | 9,7      |
| Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, % по массе | 6,5      |
| Водопоглощение, %                                                      | 2,74     |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                                           | 2700     |
| Прочность при сдавливании в цилиндре, МПа                              | 5,7      |
| Содержание пылевидных и глинистых частиц, %                            | 0,3      |
| Испытание на устойчивость к выветриванию, %                            | 1        |

Получение полных диаграмм напряженно-деформированного состояния бетона включающие нисходящую ветвь (стадию разупрочнения) при различном объемном содержании крупного

заполнителя выполнялось на образцах-кубах размерами 100×100×100 мм в соответствии с ГОСТ 10180. Составы были приняты исходя из

ограничений при использовании метода численной генерации случайной структуры заполнителя (агрегатов) в компьютерном моделировании бетона, в частности, достижение объемной доли крупного заполнителя более 30 % при удовлетворении условий непересекающегося размещения и соблюдения требуемого распределения диаметров частиц вычислительные затраты значительно вырастают. Поэтому на данном этапе работы объемные доли крупного назначены 30 % и 25 %. Для каждой вариации состава предусмотрено 6 образцов, общее количество – 18 шт. Образцы цементного раствора (без заполнителя) предназначены для построения диаграммы «напряжение-деформация» раствора. В цементном растворе и бетонных образцах массовое соотношение цемента к песку составляет 1:1. Удельный массовый расход используемых материалов приведен в таблице 5.

Таблица 4

### Характеристики качества суперпластификатора

| Показатель                                         | Значение            |
|----------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Физико-химические характеристики</b>            |                     |
| Внешний вид                                        | прозрачная жидкость |
| Плотность (при 20 °С) г/см <sup>3</sup>            | 1,036               |
| Показатель pH (водородный показатель)              | 4,7                 |
| Массовая доля сухого вещества, %                   | 11,09               |
| <b>Влияние на свойства бетонной смеси и бетона</b> |                     |
| Коэффициент водоредуцирующей способности, %        | 27                  |
| Содержание воздуха, %                              | 2,5                 |
| Относительная прочность на сжатие, %               | 129                 |

Таблица 5

### Составы бетонов

| № состава | Пропорции по массе (Ц:П:Щ) | Цемент, кг | Песок, кг | Щебень, кг | Вода, л | Суперпластификатор, кг | Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup> | Подвижность бетонной смеси |
|-----------|----------------------------|------------|-----------|------------|---------|------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------|
| 1.00V     | 1:1:0                      | 973        | 973       | –          | 389     | 5,835                  | $2,34 \times 10^3$                                  | 80±20мм*                   |
| 2.25V     | 1:1:1.015                  | 732        | 732       | 743        | 293     | 4,395                  | $2,504 \times 10^3$                                 | 160±30мм**                 |
| 3.30V     | 1:1:1.307                  | 682        | 682       | 891        | 273     | 4,095                  | $2,532 \times 10^3$                                 | 160±30мм**                 |

\* подвижность растворной смеси характеризуемой глубиной погружения в нее эталонного конуса (ГОСТ 5802)

\*\* подвижность бетонной смеси, оцениваемой по осадке конуса, отформованного из бетонной смеси (ГОСТ 10181)

Для каждой группы образцов были проведены испытания на одноосное сжатие (3 образца) и на растяжение (3 образца) в соответствии с ГОСТ 10180. Также испытания на одноосное сжатие (3 образца) и на растяжение (3 образца) были выполнены для образцов из цементного раствора (без заполнителя).

Реализованная в программном комплексе ABAQUS модель повреждения бетона (CDP) позволяет преодолеть ряд ограничений традиционных упругопластических моделей и обеспечивает комплексный подход к моделированию сложного неупругого поведения бетона [9]. Для моделирования процесса развития трещин и характера разрушения бетонной структуры в зависимости от компонентного состава были выполнены отдельные моделирования для крупного заполнителя (щебня), переходной зоны контакта (ПЗК) и цементно-песчаного раствора (рис. 1).

С учетом затрат времени на расчёты и моделирование, а также достоверности результатов симуляции, размер сетки для заполнителя, растворной матрицы и межфазной переходной зоны в модели был принят равным 2.0 мм (рис. 2-а). В соответствии с данными источников, в

данном исследовании все параметры переходной зоны контакта приняты на уровне 80 % от прочностных характеристик раствора (табл.6) [18–21]. Кроме того, некоторые исследователи устанавливают толщину ПЗК в диапазоне от 0,5 до 3 мм и обнаруживают, что изменение толщины ПЗК не оказывает существенного влияния на макроскопические механические свойства бетона [22]. В данном исследовании толщина ПЗК была последовательно установлена на уровне 0,3 мм, 0,4 мм и 0,5 мм. Характеристики для каждой фазы задавались исходя из проведенных квалификационных испытаний для каждой из фаз. Полученные данные были введены в соответствующие параметрические поля, после чего проведена отладка и выполнены расчеты модели.

Таблица 6

### Технические характеристики переходной зоны контакта (ПЗК)

| Показатель                                  | Значение |
|---------------------------------------------|----------|
| Средний предел прочности на сжатие, МПа     | 32,65    |
| Средний предел прочности на растяжение, МПа | 5,22     |

Чтобы не исказить результаты моделирования, верхняя плита (для приложения нагрузки) и нижняя плита (для наложения граничных условий) были заданы как недеформируемое жёсткое тело в конечно-элементной модели, реализованной в программном комплексе ABAQUS. В ходе моделирования контакт образца с нижней сталь-

ной плитой был задан как полностью закреплённый, а с верхней стальной плитой – как поверхностный контакт, допускающий незначительное перемещение с приложением равномерной нагрузки (рис. 2б) [23]. Согласно исследованиям [24], коэффициент трения был установлен равным 0,1.

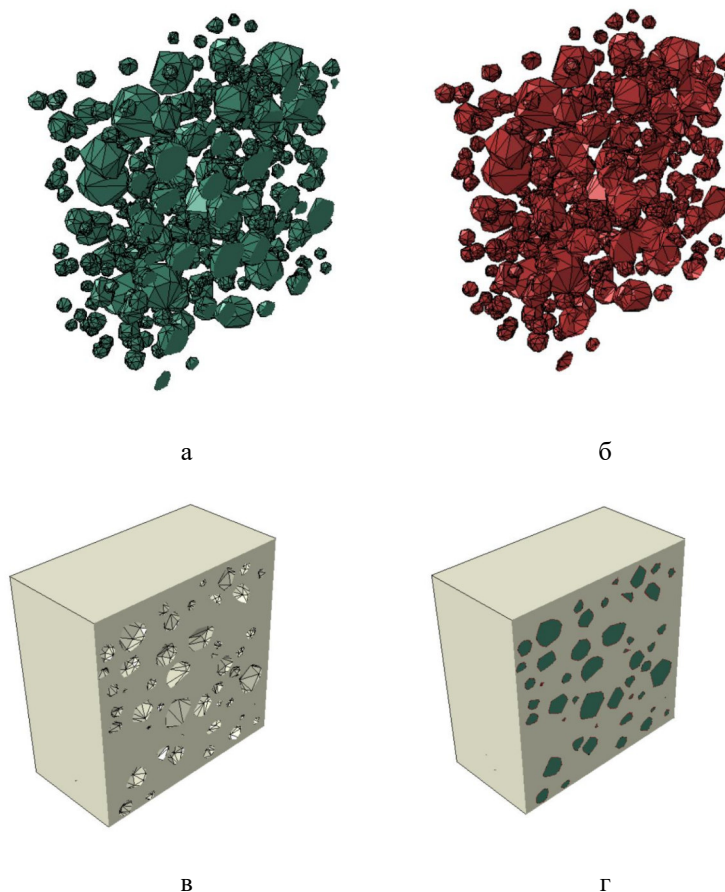


Рис. 1. Модель образца бетона с раздельным моделированием фаз: а - крупный заполнитель; б - переходная контактная зона (ПКЗ); в - цементно-песчаный раствор; г - общая схема.

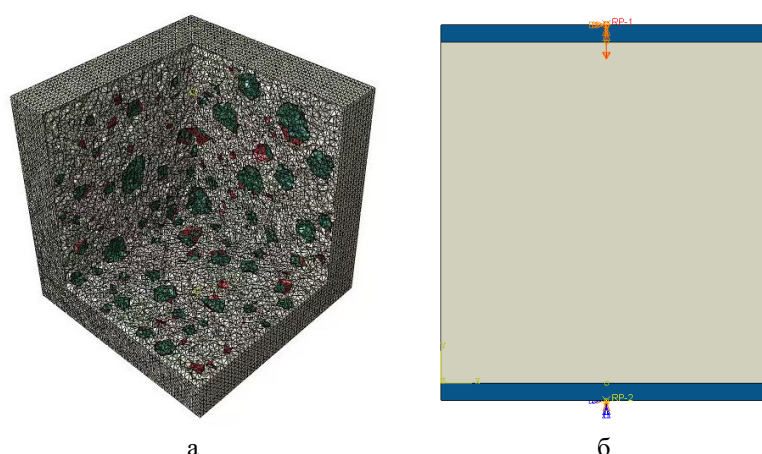


Рис. 2. Модель испытаний образцов численным моделированием:  
а – Разрез с конечно-элементной сеткой (раствор, заполнитель, ПКЗ);  
б – Условия закрепления и приложения нагрузки

**Основная часть.** Для каждого состава бетона проведены испытания на сжатие и на растяжение (табл. 7). Полученные диаграммы деформирования

при раскалывании принимались для последующего моделирования и обработки данных (рис. 3).

Таблица 7

**Физико-механические характеристики бетонов в зависимости от состава**

| № состава | Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup> | Средний предел прочности на сжатие, МПа | Средний предел прочности на растяжение, МПа | Модуль упругости, ГПа |
|-----------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|
| 1.00V     | 2100                                        | 40,81                                   | 6,53                                        | —                     |
| 2.25V     | 2250                                        | 44,11                                   | 6,83                                        | 38,75                 |
| 3.30V     | 2320                                        | 47,85                                   | 8,08                                        | 43,16                 |

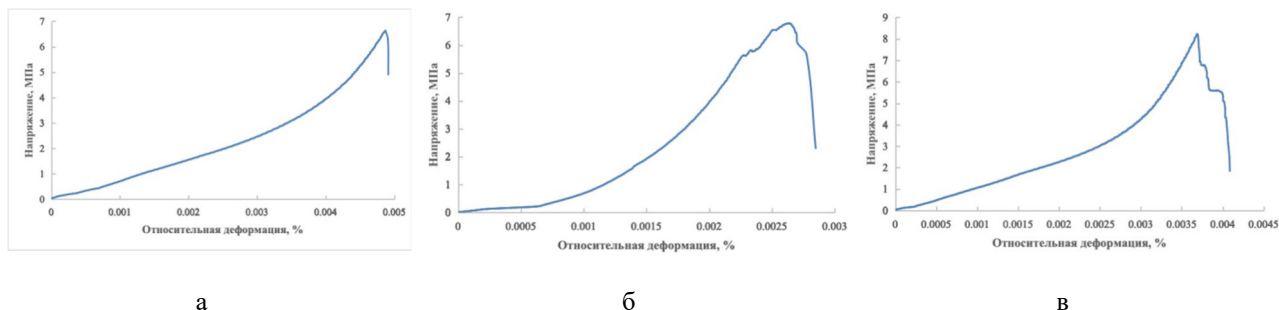


Рис 3. Диаграммы деформирования при раскалывании в зависимости от объемного содержания щебня: а – без щебня; б – 25%; в – 30 %.

В результате проведения одноосных испытаний образцов с объемным содержанием щебня 25% и 30% экспериментально определены пиковые прочности на сжатие, которые составили 44.11 МПа и 47.85 МПа соответственно и на растяжение 6.83 МПа и 8.08 МПа соответственно.

Результаты моделирования процесса разрушения бетона в программном комплексе ABAQUS показали, что характер разрушения образцов при численном эксперименте соответ-

ствует характеру разрушения при реальных испытаниях на сжатие и растяжение (рис. 4–5). На рисунках красные области представляют собой образовавшиеся и проникшие трещины; светло-желто-зеленые области указывают на начало и развитие трещин; а синие области представляют собой области без трещин. Характер разрушения, в основном, заключается в образовании наклонных и вертикальных трещин, что также соответствует результатам моделирования, приведённым в ссылочной литературе [25].

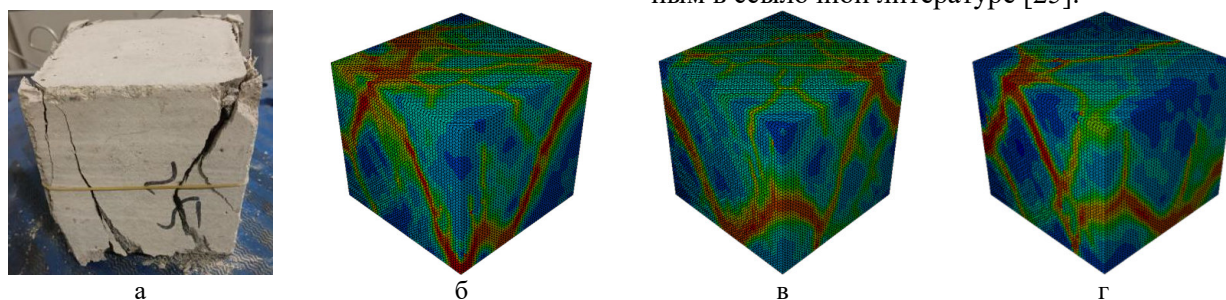


Рис 4. Характер разрушения бетона с объемным содержанием щебня 25% при испытаниях на сжатие экспериментально полученного образца (а) и при помощи моделирования при толщине ПЗК 0,3 мм (б), 0,4 мм (в) и 0,5 мм (г)

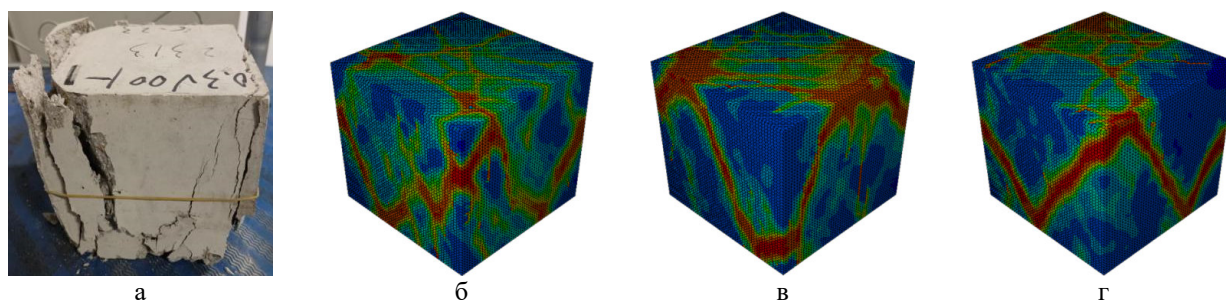


Рис 5. Характер разрушения бетона с объемным содержанием щебня 30% при испытаниях на сжатие экспериментально полученного образца (а) и при помощи моделирования при толщине ПЗК 0,3 мм (б), 0,4 мм (в) и 0,5 мм (г)

При этом отсутствие удовлетворительного характера разрушения образцов кубов согласно

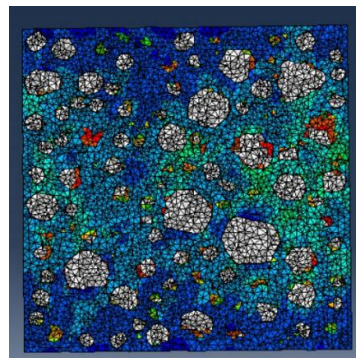
ГОСТ 10180, объясняется тем, что испытания и моделирование в данной работе были проведены



до получения полной кривой деформации (т.е. полного разрушения и распада образца на отдельные фрагменты). Критерием разрушения в ГОСТ 10180 является достижение образцом максимальной нагрузки, после которой потеря несущей способности.



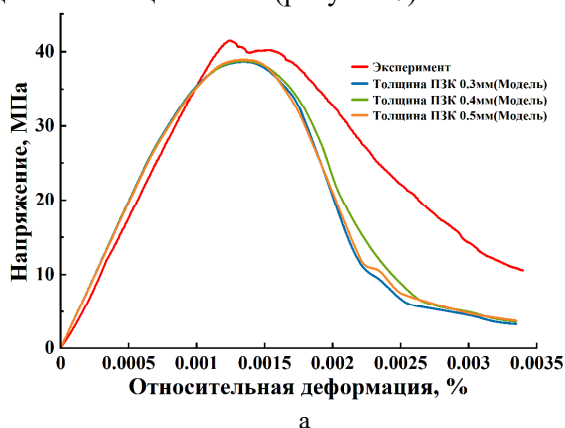
а



б

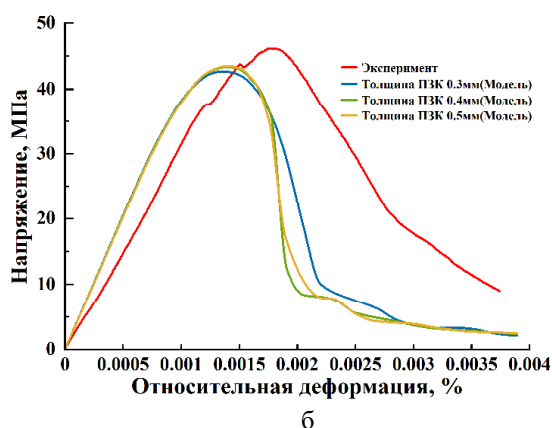
Рис 6. Характер разрушения бетона с содержанием щебня 25% в момент максимальной нагрузки экспериментально полученного образца (а) и при помощи моделирования (б)

В ходе проведения численных экспериментов также фиксировались значения разрушающей нагрузки при сжатии образцов кубов и получены кривые "напряжение-относительная деформация" в зависимости от объемного содержания щебня и толщины ПЗК (рисунок 7). Эти значения



а

соответствуют экспериментально полученным значениям разрушающей нагрузки при сжатии и растяжении образцов кубов и кривым деформации сжатия в зависимости от объемного содержания щебня.



б

Рис 7. Кривые деформации сжатия полученные в результате моделирования в зависимости от принятой толщины ПЗК и объемного содержания щебня: а – 25%; б – 30 %.

Для образцов с объемным содержанием щебня 25% результаты моделирования при толщинах переходной зоны (ПЗК) 0.3 мм, 0.4 мм и 0.5 мм составили 38.62 МПа, 38.73 МПа и 38.89 МПа соответственно, при этом максимальная относительная погрешность по сравнению с экспериментальными данными не превышала 13%.

Для образцов с объемным содержанием щебня 30% результаты моделирования при тех же значениях толщины ПЗК составили 42.67 МПа, 43.35 МПа и 43.47 МПа соответственно, с максимальной относительной погрешностью менее 11%.

Полученные данные свидетельствуют о незначительном влиянии толщины ПЗК на результаты моделирования, причём погрешность моделирования в данном исследовании оказалась ниже, чем в работе [22].

**Выводы.** Разработана и реализована в программном комплексе ABAQUS мезомасштабная конечно-элементная модель бетона, которая учитывает его неоднородную структуру, включающую три ключевые фазы: зерна крупного заполнителя, цементно-песчаный раствор и переходную контактную зону (ПЗК) между ними.

Проведенные численные эксперименты показали хорошее качественное соответствие характера разрушения моделируемых образцов экспериментальным данным при одноосном сжатии. Модель корректно воспроизводит разрушение бетона согласно которой наклонные и вертикальные трещины в основном развивается вдоль направления распределения заполнителя. Внутренние микротрещины постепенно расширяются, объединяются и образуют сквозные магистрали, что в конечном итоге

приводит к макроскопическому разрушению структуры. Установлено, что увеличение объемного содержания крупного заполнителя с 25% до 30% приводит к росту расчетной прочности бетона на сжатие, что качественно согласуется с экспериментальными данными.

Исследование влияния толщины переходной контактной зоны в диапазоне 0,3–0,5 мм показало, что данный параметр оказывает незначительное влияние на результаты моделирования прочности при сжатии. Расхождение между результатами для разных толщин ПЗК минимально, а максимальная относительная погрешность между расчетными и экспериментальными значениями прочности не превысила 13%. В рамках принятой модели (с параметрами ПЗК, составляющими 80% от параметров раствора), с учетом вычислительного времени и затрат на моделирование, параметры модели с толщиной переходной зоны 0,3 мм показали наибольшую практическую целесообразность.

Модель позволила получить полные диаграммы «напряжение-относительная деформация» в ABAQUS, включающие нисходящую ветвь, для бетонов с разным содержанием заполнителя. Сопоставление расчетных и экспериментальных кривых деформирования демонстрирует удовлетворительную корреляцию, что подтверждает адекватность выбранной модели поврежденной пластичности бетона (Concrete Damaged Plasticity) и заданных параметров материалов для мезомасштабного моделирования.

Таким образом, разработанная трехфазная мезоструктурная модель доказала свою эффективность для анализа связи между структурой бетона и его механическим поведением. Генерация случайной структуры заполнителя и формирование оболочки ПЗК позволили адекватно воспроизвести реальное строение материала.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pešić N., Živanović S., Dennis J., Hargreaves, J. Experimental and finite element dynamic analysis of incrementally loaded reinforced concrete structures // *Engineering Structures*. 2015. Vol. 103. Pp. 15–27. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.07.037
2. Kolchunov V.I., Dem'yanov A.I., Naumov N.V., Mikhaylov M.M. Calculation of the stiffness of reinforced concrete structures under the action of torsion and bending // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1425. No. 1. P. 012077. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012077
3. Słowik M. The analysis of failure in concrete and reinforced concrete beams with different reinforcement ratio // *Archive of Applied Mechanics*. 2019. Vol. 89. No. 5. Pp. 885–895. DOI: 10.1007/s00419-018-1476-5

4. Yang Zhenjun, Huang Yujie, Yao Feng, Liu Guo-hua. Three-dimensional meso-scale cohesive fracture modeling of concrete using a Python script in ABAQUS // *Engineering Mechanics*. 2020. Vol. 37. No. 8. Pp. 158–166. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.09.0559 (chn)

5. Черноусов Н.Н., Бондарев Б.А., Стурова В.А., Бондарев А.Б., Ливенцева А.А. Аналитические зависимости влияния плотности материала на прочность и деформативность конструкционного бетона при осевом сжатии // *Строительные материалы*. 2022. № 5. С. 58–67. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-802-5-58-67.

6. Matveeva O.I., Baishev N.K., Makarov A.I., Popov A.L., Pavlyukova I.R., Grigoriev N.A. Enhancing lightweight concrete strength through modified zeolite-alkaline porous aggregate: composition optimization and structural application // *Magazine of Civil Engineering*. 2024. No. 1(125). DOI: 10.34910/MCE.125.7.

7. Алфимова Н.И., Лесовик В.С., Агеева М.С., Трунов П.В., Шадский Е.Е. Влияние высокотемпературного воздействия на прочность модифицированного цементного камня // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2015. № 6. С. 25–29.

8. Володченко А.Н., Строкова В.В. Особенности технологии получения конструкционно-теплоизоляционных ячеистых бетонов на основе нетрадиционного сырья // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 1. С. 138–143. DOI: 10.12737/24193.

9. Li Dong, Jin Liu, Du Xiuli, Liu Jing-bo, Zhang Shuai, Yu Wen-xuan. A theoretical prediction model of concrete macroscopic mechanical properties considering the influence of mesoscopic composition // *Engineering Mechanics*. 2019. Vol. 36. No. 5. Pp. 67–75. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.12.0996 (chn)

10. Xu W.X., Chen H.S. Numerical investigation of effect of particle shape and particle size distribution on fresh cement paste microstructure via random sequential packing of dodecahedral cement particles // *Computers & Structures*. 2013. Vol. 114. Pp. 35–45. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.10.009

11. Huang Y., Yang Z., Ren W., Liu G., Zhang Ch. c 3D meso-scale fracture modeling and validation of concrete based on in-situ X-ray Computed Tomography images using damaged plasticity model // *International Journal of Solids and Structures*. 2015. Vol. 67–68. Pp. 340–352. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2015.05.002

12. Prasad M., Manghnani M.H., Wang Y., Zinin P.V., Livingston R.A. Acoustic microscopy of portland cement mortar aggregate/paste interfaces // *Journal of Materials Science*. 2000. Vol. 35. Pp. 3607–3613. DOI: 10.1023/A:1004873815763.

13. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1998. 768 с.

14. Zhang Yi, Zhang Xiang-ru, Wu Hao, Hu Feng. 3D mesoscale model and quasi-static mechanical analysis of concrete behavior // *Engineering Mechanics*. 2024. Vol. 41. No. 8. Pp. 80–92. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.06.0549

15. Fang J., Pan Y., Dang F., Zhang X., Ren J., Li N. Numerical reconstruction model and simulation study of concrete based on damaged partition theory and CT number // *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 24. P. 4070. DOI: 10.3390/ma12244070

16. Li Jian, Jin Liu, Yu Wenxuan, Du Xiu-li. Meso-simulation on dynamic biaxial compressive strength criterion of concrete // *Engineering Mechanics*. 2023. Vol. 40. No. 11. Pp. 71–80. (In Chinese). DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.01.0091

17. Guo W.H., Ye T.J., Chen D.S. Cohesive model-based numerical simulation and probabilistic constitutive modeling of concrete tensile fracture // *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2025. Vol. 56. No. 2. Pp. 586–597. DOI: 10.12989/cac.2008.5.4.389 (chn)

18. Maleki M., Rasoolan I., Khajehdezfuly A., Jivkov A.P.. On the effect of ITZ thickness in meso-scale models of concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 258. 119639. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119639

19. Wang J., Li X., Jivkov A.P., Li Q.M., Engelberg D.L. Interfacial transition zones in concrete meso-scale models – balancing physical realism and computational efficiency // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 293. P. 123332. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123332

20. Lu Y., Song Z., Tu Z. Analysis of dynamic response of concrete using a mesoscopic model incorporating 3D effects // *International Journal of Protective Structures*. 2010. Vol. 1. No. 2. Pp. 197–218. DOI: 10.1260/2041-4196.1.2.197

21. Liu J., Yang W., Yu W., Du X. Dynamic compressive failure and size effect in lightweight aggregate concrete based on meso-scale simulation // *Engineering Mechanics*. 2020. Vol. 37. No. 3. Pp. 56–65. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.01.0012 (chn)

22. Liu L., Li X., Cheng Y., Du X. Compression simulation of three-dimensional meso-scale concrete based on friction debonding method // *Chinese Journal of Applied Mechanics*. 2025. Vol. 42. No. 5. Pp. 1129–1138. (chn)

23. Wu Z., Zhang J., Yu H., Ma H., Fang Q. 3D mesoscopic analysis on the compressive behavior of coral aggregate concrete accounting for coarse aggregate volume and maximum aggregate size // *Composite Structures*. 2021. Vol. 273. 114271. DOI: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.114271

24. Li L., Jia J.Q. Study on the mechanical properties of post-filling coarse aggregate concrete under multiaxial compression // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 417. 135282. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135282

25. Zhang Yuhang. Investigation on the Damage Behavior of Concrete Based on 3D Meso-scale Modeling. Taiyuan University of Technology, 2020. (chn)

#### Информация об авторах

**Гао Шуай**, аспирант кафедры прикладная механика и строительное материаловедение. E-mail: hss\_gaoshuai@126.com. Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д. 58.

**Попов Александр Леонидович**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой прикладной механики и строительного материаловедения. E-mail: surrukin@gmail.com. Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д. 58.

**Назаров Тимур Александрович**, заведующий лабораторией кафедры проектирования, строительства и технологий. E-mail: nazarovta@yandex.ru. Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д. 58.

Поступила 16.12.2025 г.

© Гао Ш., Попов А.Л., Назаров Т.А., 2026

**Gao S., \*Popov A.L., Nazarov T.A.**

*M.K. Ammosov North-Eastern Federal University*

*Russia, 677000, Yakutsk, Belinskogo St., 58*

*E-mail: tdmitrieva-bel@yandex.ru*

## FINITE ELEMENT MODELING OF CONCRETE FAILURE CONSIDERING STRUCTURAL FEATURES

**Abstract.** This study presents a three-dimensional random aggregate model of concrete based on meso-mechanics and applies a plastic-damage constitutive model to simulate the mechanical behavior, including crack development and patterns, of concrete under uniaxial compression and tensile loading. By varying parameters, the influence of multi-phase characteristics of concrete – such as the volume fraction of coarse



aggregate and the interfacial transition zone (ITZ) between aggregate and mortar – on the stress-strain relationship was investigated. Numerical results indicate that the volume fraction of coarse aggregate has a negligible effect on the splitting tensile strength of concrete but significantly enhances its compressive strength, showing a positive correlation; the properties of the interfacial transition zone (ITZ) are a critical parameter governing the macroscopic response of concrete. The study found that as the thickness of the ITZ increases, the compressive strength of concrete improves, though the enhancement is not pronounced; all simulation results show good agreement with experimental compressive stress-strain curves. Considering computational time and modeling costs, the interfacial transition zone with a thickness of 0.3 (ITZ) is shown to be more suitable.

**Keywords:** Concrete, Uniaxial Compression, Stress-Strain Curve, Meso-Structure, Numerical Simulation.

## REFERENCES

1. Pešić N., Živanović S., Dennis J., Hargreaves, J. Experimental and finite element dynamic analysis of incrementally loaded reinforced concrete structures. *Engineering Structures*. 2015. Vol. 103. Pp. 15–27. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.07.037
2. Kolchunov V.I., Dem'yanov A.I., Naumov N.V., Mikhaylov M.M. Calculation of the stiffness of reinforced concrete structures under the action of torsion and bending. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1425. No. 1. P. 012077. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012077
3. Słowik M. The analysis of failure in concrete and reinforced concrete beams with different reinforcement ratio. *Archive of Applied Mechanics*. 2019. Vol. 89. No. 5. Pp. 885–895. DOI: 10.1007/s00419-018-1476-5
4. Yang Zhenjun, Huang Yujie, Yao Feng, Liu Guo-hua. Three-dimensional meso-scale cohesive fracture modeling of concrete using a Python script in ABAQUS. *Engineering Mechanics*. 2020. Vol. 37. No. 8. Pp. 158–166. (In Chinese). DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.09.0559
5. Chernousov N.N., Bondarev B.A., Sturova V.A., Bondarev A.B., Livenceva A.A. Analytical Dependencies of the Influence of Material Density on the Strength and Deformability of Structural Concrete under Axial Compression [Analiticheskie zavisimosti vliyaniya plotnosti materiala na prochnost i deformativnost konstrukcionnogo betona pri osevom szhatii]. *Construction Materials [Stroitel'nye Materialy]*. 2022. No. 5. Pp. 58–67. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-802-5-58-67. (rus)
6. Matveeva O.I., Baishev N.K., Makarov A.I., Popov A.L., Pavlyukova I.R., Grigoriev N.A. Enhancing lightweight concrete strength through modified zeolite-alkaline porous aggregate: composition optimization and structural application. *Magazine of Civil Engineering*. 2024. No. 1(125). DOI: 10.34910/MCE.125.7.
7. Alfimova N.I., Lesovik V.S., Ageeva M.S., Trunov P.V., Shadskiy E.E. Influence of High-Temperature Exposure on the Strength of Modified Cement Stone [Vliyanie vysokotemperaturnogo vozdeystviya na prochnost modifitsirovannogo cementnogo kamnya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2015. No. 6. Pp. 25–29. (rus)
8. Volodchenko A.N., Strokova V.V. Features of the Technology for Producing Structural and Thermal Insulation Cellular Concretes Based on Non-Traditional Raw Materials [Osobennosti tekhnologii polucheniya konstrukcionno-teploizolyacionnyh yacheistyh betonov na osnove netraditsionnogo syrya]. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov [Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova]*. 2017. No. 1. Pp. 138–143. DOI: 10.12737/24193. (rus)
9. Li Dong, Jin Liu, Du Xiuli, Liu Jing-bo, Zhang Shuai, Yu Wen-xuan. A theoretical prediction model of concrete macroscopic mechanical properties considering the influence of mesoscopic composition. *Engineering Mechanics*. 2019. Vol. 36. No. 5. Pp. 67–75. (In Chinese). DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.12.0996
10. Xu W.X., Chen H.S. Numerical investigation of effect of particle shape and particle size distribution on fresh cement paste microstructure via random sequential packing of dodecahedral cement particles. *Computers & Structures*. 2013. Vol. 114. Pp. 35–45. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.10.009
11. Huang Y., Yang Z., Ren W., Liu G., Zhang Ch. c 3D meso-scale fracture modeling and validation of concrete based on in-situ X-ray Computed Tomography images using damaged plasticity model. *International Journal of Solids and Structures*. 2015. Vol. 67–68. Pp. 340–352. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2015.05.002
12. Prasad M., Manghnani M.H., Wang Y., Zinin P.V., Livingston R.A. Acoustic microscopy of portland cement mortar aggregate/paste interfaces. *Journal of Materials Science*. 2000. Vol. 35. Pp. 3607–3613. DOI: 10.1023/A:1004873815763.
13. Batrakov V.G. Modified Concretes. Theory and Practice [Modifitsirovannyye betony. Teoriya i praktika]. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, 1998. 768 p. (rus)
14. Zhang Yi, Zhang Xiang-ru, Wu Hao, Hu Feng. 3D mesoscale model and quasi-static mechanical analysis of concrete behavior. *Engineering Mechanics*. 2024. Vol. 41. No. 8. Pp. 80–92. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.06.0549 (chn)
15. Fang J., Pan Y., Dang F., Zhang X., Ren J., Li N. Numerical reconstruction model and simulation study of concrete based on damaged partition

theory and CT number. *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 24. 4070. DOI: 10.3390/ma12244070

16. Li Jian, Jin Liu, Yu Wenxuan, Du Xiu-li. Meso-simulation on dynamic biaxial compressive strength criterion of concrete. *Engineering Mechanics*. 2023. Vol. 40. No. 11. Pp. 71–80. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.01.0091 (chn)

17. Guo W.H., Ye T.J., Chen D.S. Cohesive model-based numerical simulation and probabilistic constitutive modeling of concrete tensile fracture. *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2025. Vol. 56. No. 2. Pp. 586–597. DOI: 10.12989/cac.2008.5.4.389 (chn)

18. Maleki M., Rasoolan I., Khajehdezfuly A., Jivkov A.P.. On the effect of ITZ thickness in meso-scale models of concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 258. 119639. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119639

19. Wang J., Li X., Jivkov A.P., Li Q.M., Engelberg D.L. Interfacial transition zones in concrete meso-scale models – balancing physical realism and computational efficiency. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 293. 123332. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123332

20. Lu Y., Song Z., Tu Z. Analysis of dynamic response of concrete using a mesoscopic model incorporating 3D effects. *International Journal of Protective Structures*. 2010. Vol. 1. No. 2. Pp. 197–218. DOI: 10.1260/2041-4196.1.2.197

21. Liu J., Yang W., Yu W., Du X. Dynamic compressive failure and size effect in lightweight aggregate concrete based on meso-scale simulation. *Engineering Mechanics*. 2020. Vol. 37. No. 3. Pp. 56–65. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.01.0012 (chn)

22. Liu L., Li X., Cheng Y., Du X. Compression simulation of three-dimensional meso-scale concrete based on friction debonding method. *Chinese Journal of Applied Mechanics*. 2025. Vol. 42. No. 5. Pp. 1129–1138. (chn)

23. Wu Z., Zhang J., Yu H., Ma H., Fang Q. 3D mesoscopic analysis on the compressive behavior of coral aggregate concrete accounting for coarse aggregate volume and maximum aggregate size. *Composite Structures*. 2021. Vol. 273. 114271. DOI: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.114271

24. Li L., Jia J.Q. Study on the mechanical properties of post-filling coarse aggregate concrete under multiaxial compression. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 417. 135282. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135282

25. Zhang Yuhang. Investigation on the Damage Behavior of Concrete Based on 3D Meso-scale Modeling. *Taiyuan University of Technology*, 2020. (chn)

#### *Information about the author*

**Gao Shuai**, graduate student of the Department of Applied Mechanics and Construction Materials Science. E-mail: hss\_gaoshuai@126.com. North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova. Russia, 677000, Yakutsk, st. Belinskogo, 58.

**Popov, Alexander L.** Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Applied Mechanics and Construction Materials Science. E-mail: surrukin@gmail.com. North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova. Russia, 677000, Yakutsk, st. Belinskogo, 58.

**Nazarov, Timur A.** head of the laboratory of the Department of Design, Construction and Technology. E-mail: nazarovta@yandex.ru. North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova. Russia, 677000, Yakutsk, st. Belinskogo, 58.

*Received 16.12.2025*

#### **Для цитирования:**

Гао Ш., Попов А.Л., Назаров Т.А. Моделирование методом конечных элементов процесса разрушения бетона с учетом его структурных особенностей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. №6. С. 52–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-6-52-61

#### **For citation:**

Gao S., Popov A.L., Nazarov T.A. Finite element modeling of the concrete failure considering structural features // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2026. No. 6. Pp. 52–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-6-52-61