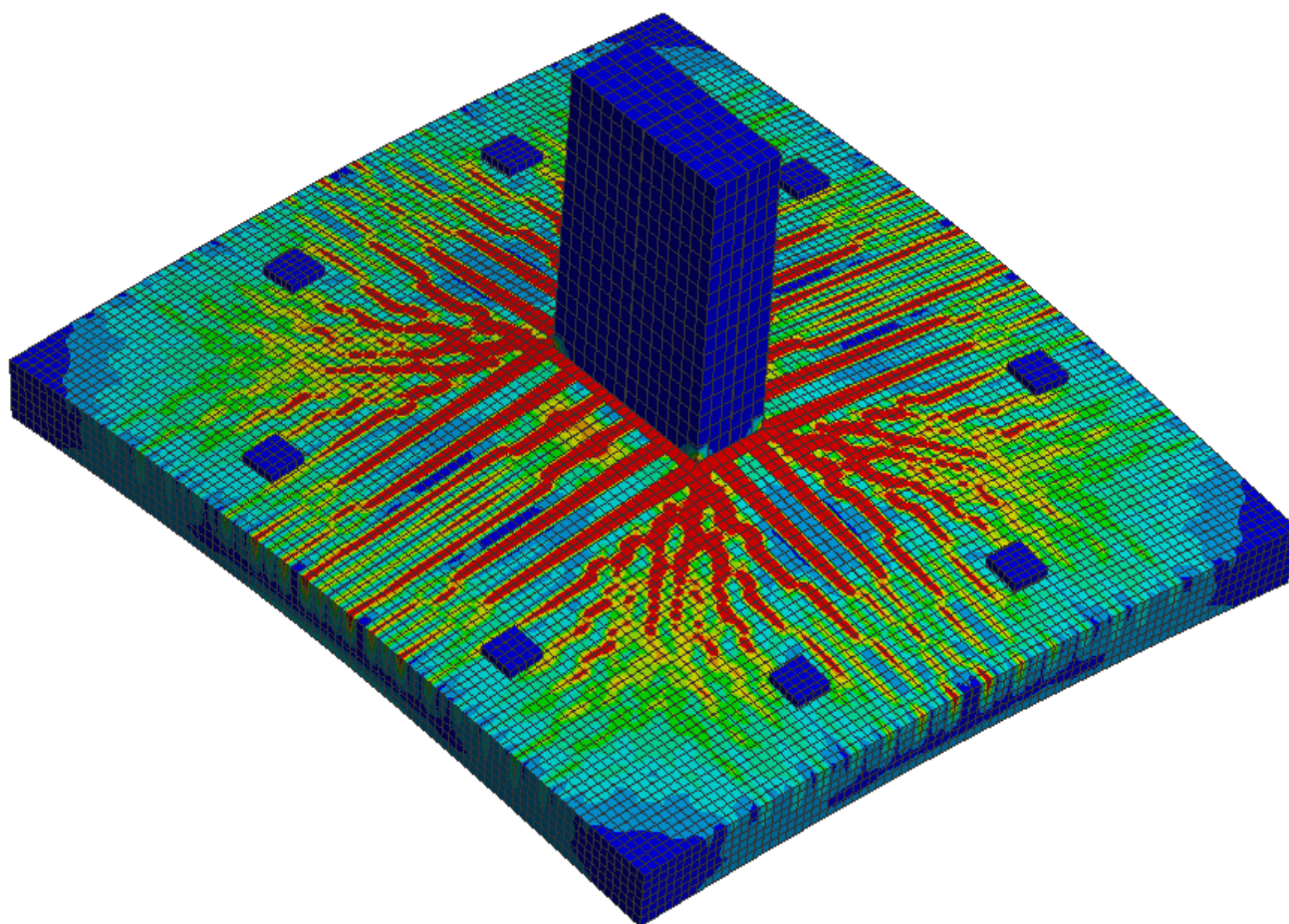


Илшат Г. Мирсаяпов, Г.Т. Апхадзе, В.Д. Симаков

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЯХ**



Казань

2023

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Илшат Т. Мирсаяпов, Г.Т. Апхадзе, В.Д. Симаков

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЯХ**

Монография

Казань

2023

2

УДК 624.012.35

ББК 38.53

М63

Мирсаяпов Илшат Т., Апхадзе Г.Т., Симаков В.Д.

М63 Численный анализ нелинейного поведения железобетонных конструкций на твердотельных моделях: Монография/Илшат Т. Мирсаяпов, Г.Т. Апхадзе, В.Д. Симаков - Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2023г. -211 стр.

ISSBN 978-5-7829-0607-8

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Монография содержит теоретические основы и практические примеры твердотельного моделирования и численных расчетов железобетонных конструкций. В ней приведены основные положения и алгоритмы, необходимые для моделирования железобетонных конструкций, а также для получения корректных результатов расчета.

Основная цель монографии – разработать общий алгоритм для полного математического описания моделей реальных железобетонных конструкций с применением наиболее современных и продвинутых программных комплексов конечно-элементного анализа. Разработанный в монографии принцип моделирования и расчета железобетонных конструкций, находящихся в различных напряженно-деформированных состояниях, верифицирован достаточным количеством рассмотренных и описанных экспериментальных исследований, проведенных, в том числе, и авторами монографии.

Монография предназначена для научных работников, аспирантов и магистрантов, занимающихся в своих численных исследованиях расчетами твердотельных моделей железобетонных конструкций. Особая ценность работы заключается в том, что представленные в ней принципы и алгоритмы моделирования и расчета железобетонных конструкций могут быть использованы инженерно-техническими работниками в своей проектной деятельности, в том числе при проектировании уникальных и особо сложных объектов.

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства

Н.Н. Ласьков

Доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Механика» Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Р.Г. Каюмов

УДК 624.012.35

ББК 38.53

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2023

© Мирсаяпов Илшат Т., Апхадзе Г.Т., Симаков В.Д., 2023
ISSBN 978-5-7829-0607-8

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
Раздел 1. Анализ состояния вопроса	7
Раздел 2. Теоретические основы численного моделирования железобетона с учетом нелинейной работы бетона и арматуры	31
2.1. Определение физико-механических параметров для моделирования бетона в объемной постановке задачи.....	32
2.2. Определение физико-механических параметров для моделирования арматуры	40
Раздел 3. Верификация нелинейной модели бетона.....	43
3.1. Верификация модели бетона на стандартных образцах.....	44
3.2. Верификация модели бетона при сложном напряженно-деформированном состоянии с учетом наличия арматуры	52
Раздел 4. Моделирование и расчет несущей способности железобетонной балки при разрушении по нормальному сечению.....	66
4.1. Алгоритм моделирования и расчета	67
4.2. Сравнение результатов эксперимента и численного исследования.....	92
4.3. Моделирование предварительного напряжения арматуры.....	93
Раздел 5. Моделирование и расчет несущей способности железобетонной балки при разрушении по наклонному сечению	97
5.1. Алгоритм моделирования и расчета	99
5.2. Сравнение результатов эксперимента и численного исследования.....	119
Раздел 6. Моделирование и расчет несущей способности оголовка колонны, подверженного местному сжатию	124
6.1. Алгоритм моделирования и расчета	126
6.2. Сравнение результатов эксперимента и численного исследования.....	147
Раздел 7. Моделирование и расчет несущей способности плиты перекрытия при продавливании колонной	148
7.1. Алгоритм моделирования и расчета	150
7.2. Сравнение результатов эксперимента и численного исследования.....	175

Раздел 8. Моделирование и расчет несущей способности монолитной железобетонной рамы	176
8.1. Алгоритм моделирования и расчета	178
8.2. Сравнение результатов эксперимента и численного исследования.....	199
Заключение	200
Литература.....	202

Введение

Большинство физически нелинейных задач, с которыми приходится в настоящее время сталкиваться исследователям железобетонных и сталежелезобетонных конструкций, не поддается точному аналитическому решению. Во многих случаях учет нелинейной работы бетона приводит к огромным вычислительным затратам. При этом, зачастую единственной возможностью экспрессного анализа проблемы и её исследования является компьютерное моделирование железобетонных конструкций с применением метода конечных элементов (МКЭ, FEM) с использованием в том числе в моделях твердотельных (объемных) конечных элементов.

Применение виртуального (компьютерного) моделирования соответствует современным требованиям выполнения любой научной работы. В то же время результатами численных исследований проверяются расчетные выражения, полученные в рамках теоретических исследований.

Кроме того, численное моделирование дает возможность прогнозировать напряженно-деформированное состояние объекта исследования на этапе его проектирования и минимизирует затраты на экспериментальную отработку принятых конструктивных решений.

В данной работе, в качестве инструмента для численных исследований выбран программный комплекс «ANSYS2022R2», имеющий наиболее широкие возможности для анализа напряженно-деформированного состояния железобетонных, сталежелезобетонных и композитобетонных конструкций. Например, как будет подробно описано ниже, данный программный пакет может учитывать раскрытие, развитие трещин и их вклад в напряженно-деформированное состояние конструкции на любом этапе нагружения. Большим преимуществом ПК «ANSYS» в том числе является то, что он признаётся учеными-исследователями и экспертами во всём мире.

«ANSYS» имеет встроенные средства связи с наиболее известными CAD и BIM-системами (включая AutoCAD, Revit и др.) с помощью универсальных графических или специализированных форматов файлов. Но в целях ознакомления с основными принципами моделирования, импортирование из CAD и BIM-систем в данной работе не рассматривается.

1. Анализ состояния вопроса

В настоящее время все исследования физически нелинейного поведения железобетонных конструкций делятся по двум основным направлениям.

Первое направление исследований в своей основе исходит из предпосылки линейного распределения относительных деформаций по сечению конструкции и нелинейного распределения напряжений в нем же. То есть основной предпосылкой данного направления исследований является строгая выполнимость гипотезы плоских сечений. Данный принцип и метод расчета, получивший свое развитие в нашей стране начиная с конца 80-х годов прошлого столетия и позже введенный в СНиП [53], а в последующем и в Свод Правил [54], именуется расчетом согласно нелинейной-деформационной модели (кратко НДМ) или диаграммным методом расчета. В последнее время вся имеющаяся теория в рамках данного подхода получила название деформационной теории прочности железобетонных сечений.

Основная суть данного подхода заключается в разбиении всей площади нормального к продольной оси элемента на конечные площадки: для элементов находящихся при воздействии изгибающего момента в одной плоскости – на элементарные полоски конечной высоты и шириной равной ширине сечения элемента; а для элементов, находящихся при воздействии моментов в двух плоскостях (или при косом изгибе) – на элементарные площадки с равной шириной и высотой, значительно меньших габаритов (не менее чем в 10 раз) рассматриваемого сечения. При этом главным параметром контроля решения в данном подходе является кривизна сечения, которая связывает с одной стороны действующие внутренние усилия и жесткость сечения, а с другой стороны относительные деформации и расстояние до нейтральной оси сечения. Решение задачи в диаграммном методе расчета находится путем использования итерационного подхода с контролем сходимости решения по кривизне рассматриваемого сечения. Как правило, для получения достаточно точного решения по отысканию кривизны сечения, а в последующем и любых иных параметров сечения, достаточно не более 5-10 итераций решения.

В рамках данного подхода используются кривые деформирования бетона (зависимости напряжений от относительных деформаций в бетоне) при одноосном напряженно-деформированном состоянии: криволинейные, упрощенные кусочно-линейные (двухлинейные, трехлинейные и др.). По одноосным диаграммам деформирования исходя из значений относительных деформаций по центру каждой элементарной площадки сечения определяются напряжения, после чего вычисляются секущие модули деформации бетона для каждой площадки, а после выполнения суммирования по всем площадкам - общая жесткость и обновленная кривизна сечения на текущем итерационном шаге расчета.

В нелинейной деформационной модели за критерий прочности и трещинообразования принимается достижение заранее известных предельных относительных деформаций в бетоне или арматуре.

Серьезным преимуществом данного направления (деформационной теории прочности) является относительная простота расчетных положений, позволяющая получать решения по определению основных параметров напряженно-деформированного состояния сечений железобетонных конструкций (высоты сжатой зоны бетона, напряжений в арматуре, кривизны сечения и др.) с достаточной точностью в сравнении с упрощенными инженерными методами.

К основным проблемам деформационной теории прочности сечений железобетонных конструкций, с точки зрения всеобъемлющего её применения в практике, можно отнести:

- невозможность анализа любого вида наклонных к нормальной оси элемента площадок разрушения железобетонных сечений, то есть метод неприменим для сечений, в которых хотя бы одна из главных площадок не перпендикулярна оси элемента;

- невозможность анализа массивных (массивные и толстые фундаменты, стены, в том числе стыки монолитных конструкций) и серьезные сложности, возникающие при анализе тонкостенных (стены, плиты перекрытий) конструкций, находящихся в сложном напряженно-деформированном состоянии;

- значительное увеличение количества вычислений при определении напряженно-деформированного состояния статически неопределимых железобетонных конструкций;

- сложности с преобразованием и калибровкой диаграмм деформирования при длительном, а также динамическом нагружении, которые до сих пор требуют дополнительных экспериментальных исследований ввиду влияния на них множества факторов.

Для более наглядного описания первой и второй из этих проблем приведем экспериментальные графики зависимости напряжений от деформаций для одного и того же бетона с одинаковыми физико-механическими характеристиками: в первом случае (рис. 1.1, а) располагающегося в сжатой зоне нормального сечения изгибаемой балки при чистом изгибе, то есть бетон здесь подвержен только одноосному сжатию; во втором случае (рис. 1.2, б) тот же самый бетон располагается в зоне сжатия-растяжения (наклонная полоса между наклонными трещинами при одновременном действии поперечной силы и изгибающего момента) и в третьем случае (рис. 1.3) тот же бетон располагается в сжатой зоне стыка монолитной плиты с колонной при неравномерном трехосном сжатии.

Как видно из сравнения данных графиков, изменение вида напряженно-деформированного состояния для исследуемого бетона с одноосного сжатия на сжатие с растяжением приводит к уменьшению предела прочности в 1,5 раза и предельных деформаций сжатия более чем в 2 раза. Изменение напряженно-деформированного состояния с одноосного на неравномерное трехосное сжатие привело к увеличению предела прочности почти в 5 раз и увеличению предельных деформаций сжатия почти в 2 раза.

Данный наглядный пример показывает, что деформационная теория прочности железобетона на текущий момент её развития не позволяет описать сложные напряженно-деформированные состояния железобетонных конструкций в связи с использованием в основе своего подхода одноосных диаграмм деформирования бетона, которые по сути своей могут описывать только нормальные сечения стержневых элементов (балок, колонн) при воздействии изгибающих моментов и продольных сил.

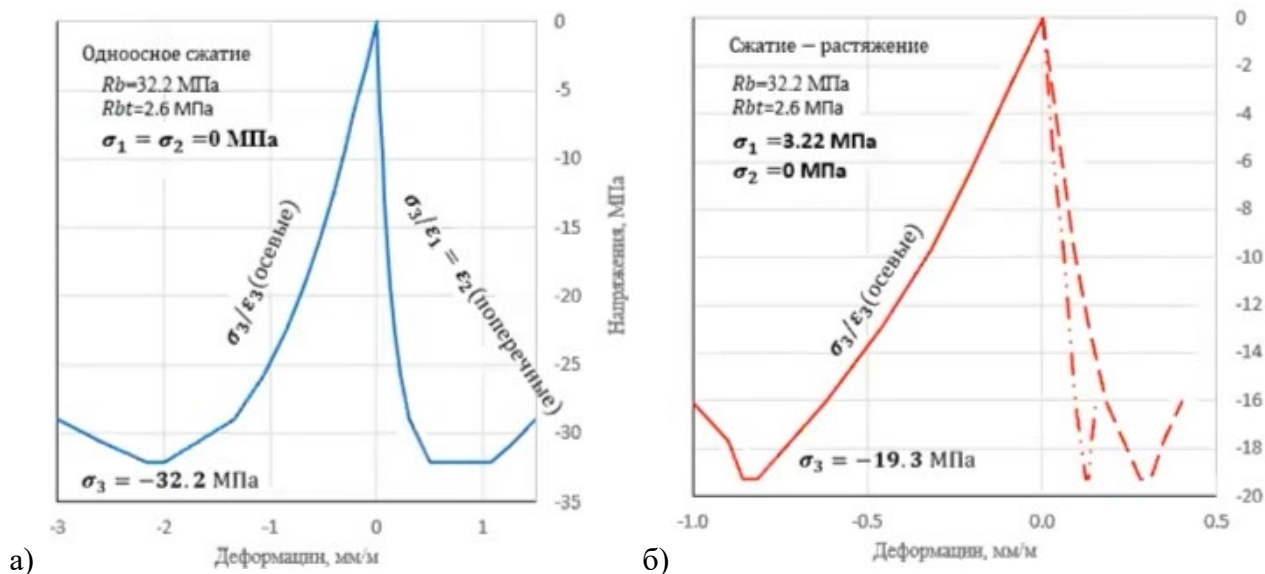


Рис. 1.1. Кривые деформирования сжатого бетона (зависимость «напряжения-деформации») в зоне чистого изгиба балки при одноосном сжатии (а) и в зоне одновременного действия момента и поперечных сил при сжатии с растяжением (б)

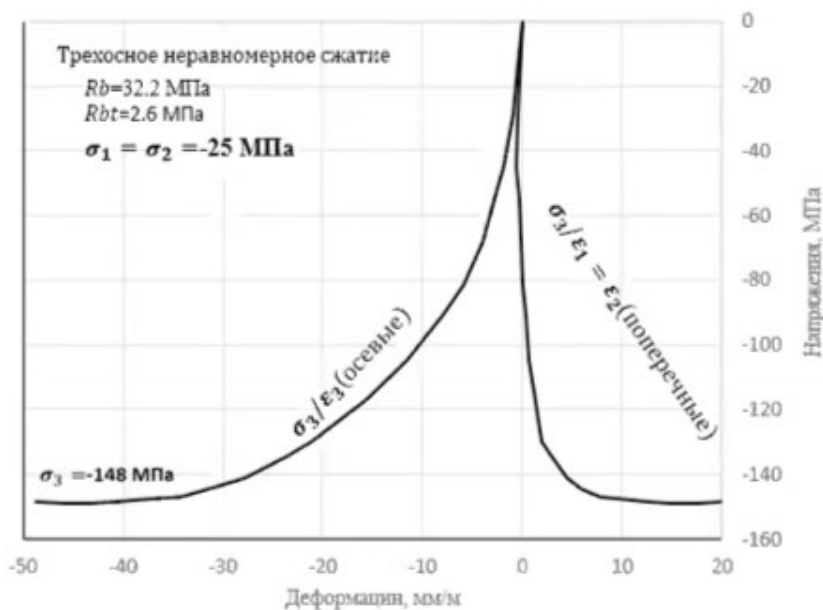


Рис. 1.2. Кривые деформирования сжатого бетона (зависимость «напряжения-деформации») в зоне трехосного сжатия на стыке монолитной плиты и колонны

Основы для последующих множественных разработок различных аппроксимирующих диаграмм и функций, используемых в нелинейной деформационной модели для описания реальных кривых деформирования бетона при одноосном сжатии, были заложены О.Я. Бергом [2,3] в начале 50-х годов прошлого столетия. Принципы и алгоритмы деформационной теории прочности были заложены отечественными учеными в области бетона и

железобетона, среди которых стоит отметить Залесова А.С [7], Карпенко Н.И. и Мухамедиева Т.А. [10]. В последнее время теория получила развития в работах таких авторов как Лазовский Д.Н. [16], Трёкин Д.Н. [55], Шевченко А.В. [58] и др. В зарубежной практике развитием диаграммного подхода к расчетам железобетонных конструкций занимались такие ученые как Bentz E.C. [63], Al-Noury S.I. [60] и многие др.

Попытки решить одну из проблем деформационной теории прочности, а именно приспособления её к расчету наклонных сечений железобетонных конструкций, предпринимались в отечественной практике в работе Силантьева А.С. [51], а в зарубежной практике также в работе E.C. Bentz [63].

Второй подход к анализу и исследованию железобетонных конструкций, лишенный вышеописанных проблем и ограничений, основывается на теории пластичности (прочности) бетона вкуче с механикой разрушения (повреждения) твердого анизотропного тела. Решения задач в данном случае получаются только с применением метода конечных элементов и использованием шагово-итерационных подходов, так как количество вычислений, необходимых для получения корректных результатов, намного превышает число вычислений в деформационной теории прочности, итерационные решения, в котором могут быть за короткое время получены достаточно быстро с применением невысоко эффективных вычислительных средств и даже ручным счетом.

Теория пластического течения или теория прочности бетона разрабатывалась многими отечественными и зарубежными учеными путём математического описания граничной (предельной) поверхности прочности бетона, располагаемой в осях главных напряжений, используя математические преобразования, принятые в теории механики твердого деформируемого тела. Множество точек на предельной поверхности прочности графически описывает все множества напряженно-деформированных состояний бетона во всех возможных предельных стадиях разрушения, а любые точки, попадающие во внутренний объем, ограничиваемый поверхностью прочности, соответствуют всевозможным напряженно-деформированным состояниям бетона в допредельных стадиях работы. Для примера на рис. 1.3 приведена

модифицированная замкнутая поверхность прочности бетона, предложенная Будариним А.М. в работе [4].

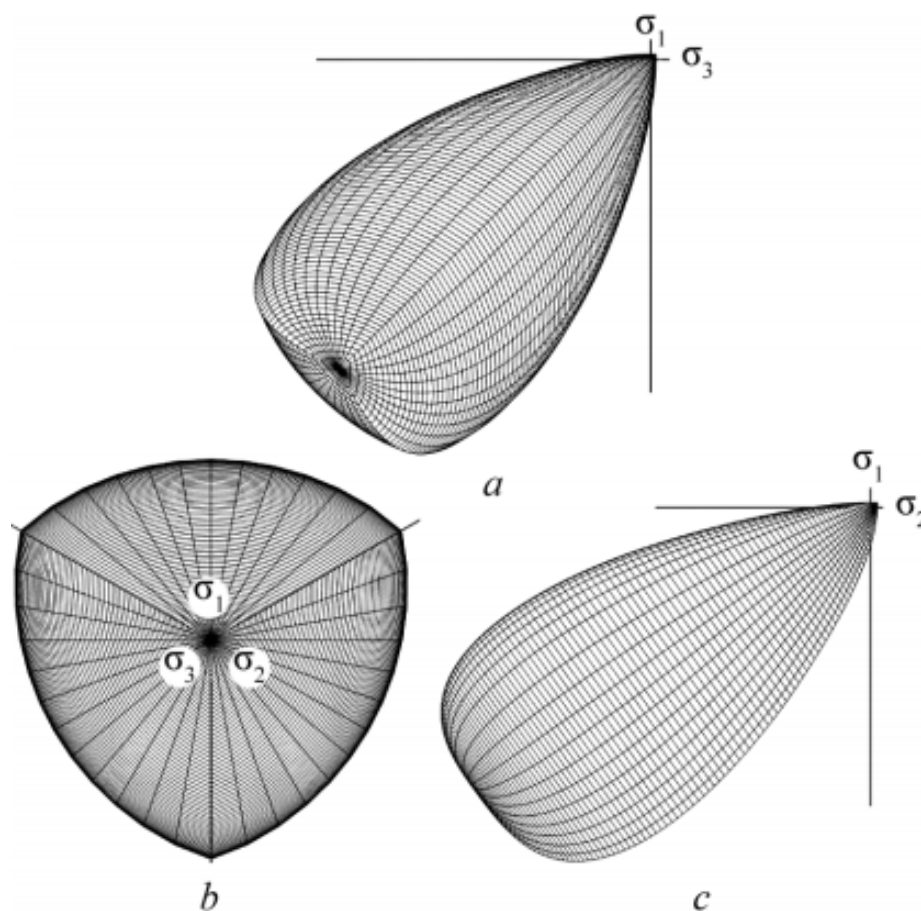


Рис. 1.3. Пример модифицированной замкнутой поверхности прочности с шатром [4]
(*a, c* – виды на меридианные плоскости, *b*–вид на девиаторную плоскость)

В отечественной практике проблемами создания и развития теорий прочности и пластичности бетона и железобетона занимались такие учёные-исследователи, как: Гениев Г.А. [6], Карпенко Н.И. [9], Лейтес Е.С. [17], Клованич С.Ф. [13], Семенов А.С [20], Филоненко-Бородич [57], Яшин А.В. [59].

Зарубежное развитие теорий прочности и пластичности бетона отражено в работах множества учёных, среди которых стоит упомянуть: WillamK.J. [85], MenetreyP. [76], JangB.L. [70], ChenW.F. [65], FossumA.F. [68].

Для оценки корректности разработанных и разрабатываемых теорий прочности бетона выполняются сложные, с технической точки зрения, экспериментальные исследования бетонных образцов при двухосном сжатии, сжатии с растяжением, трехосном сжатии и пр. На рис. 1.4 приведено сравнение

некоторых разработанных теорий прочности при двухосном сжатии с результатами выполненных экспериментов другими авторами.

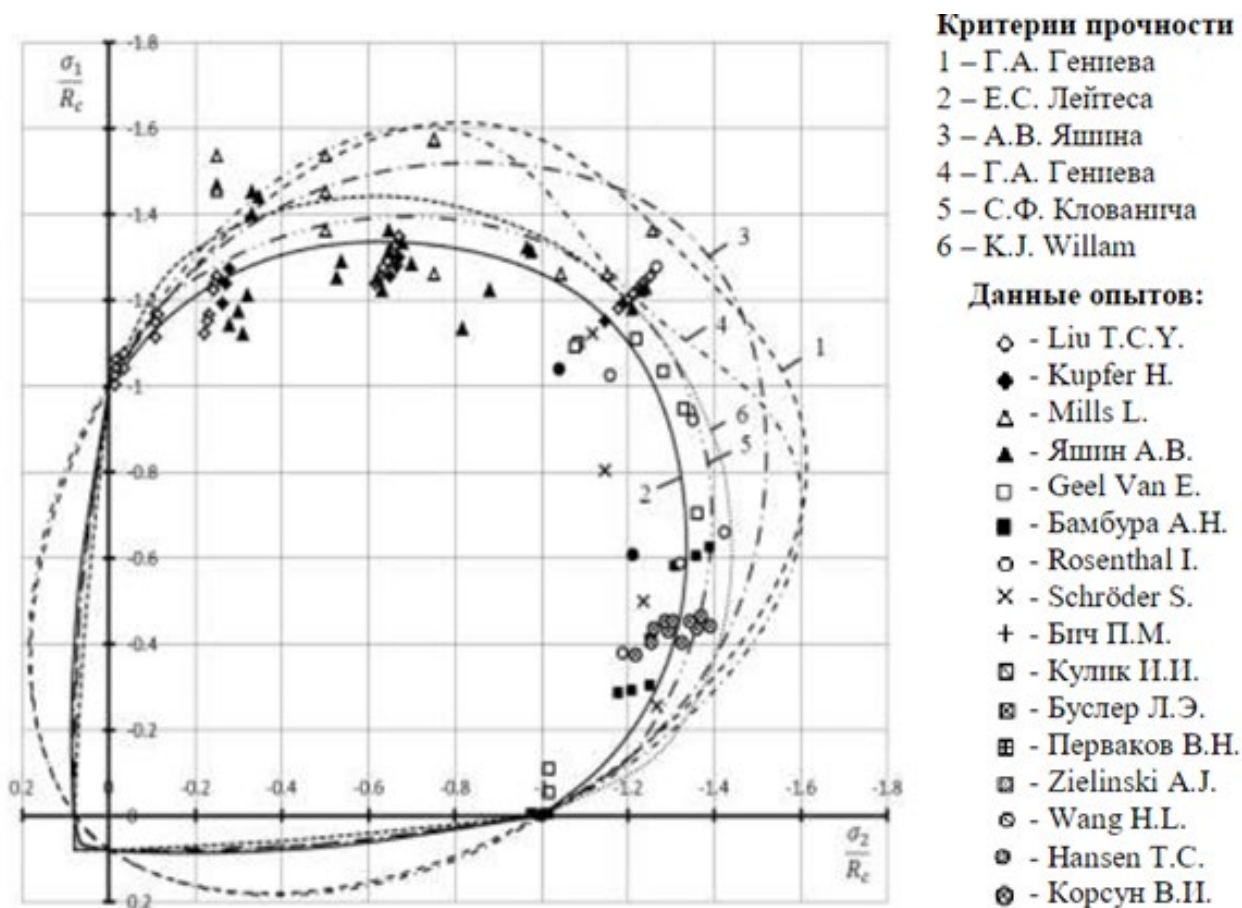


Рис. 1.4. Сопоставление проекций (замкнутые кривые) поверхностей прочности при двухосном НДС с экспериментальными данными (точки на графике) [14]

Проведенный анализ [14] (рис. 1.4), в том числе и экспериментальный, корректности применения различных теорий прочности показал, что многие из них хорошо применимы только для определенных типов конструкций и их напряженно-деформированных состояний. Например, модифицированная теория прочности бетона Друкера-Прагера [66] плохо описывает бетон в изгибаемых конструкциях при наличии как растягивающих, так и сжимающих напряжений, что связано с тем, что первоначально теория разрабатывалась для описания поведения преимущественно скальных грунтов, а уже в последствии была доработана применительно к бетону. Наиболее известная, среди отечественных исследователей, теория пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева [6] нередко дает большую погрешность при математическом описании поведения преимущественно сжатых железобетонных конструкций с завышением несущей способности относительно опытных значений, однако,

хорошо себя показывает применительно к описанию поведения изгибаемых конструкций под нагрузкой.

В некоторых из моделей (к примеру, в модели Виллама-Варнке [85]) отсутствует возможность учета пластических деформаций, то есть они являются моделями теории упругости с возможностью учета эффектов повреждаемости бетона и развития трещинообразования.

Сложность физически нелинейного анализа бетона, с точки зрения учета его поведения как анизотропного материала, привела к необходимости при численных расчетах иметь возможность изменения поверхностей прочности с целью учета возможного раскрытия трещин в растянутых зонах и перераспределения напряжений в сжатых и растянутых зонах между соседними участками бетона (конечными элементами) при сохранении стабильности, сходимости и точности итерационного решения. В связи с этим, существующие для бетона известные теории прочности преобразовались в теории пластического течения, в которых граничная поверхность прочности трансформируется (сужается или увеличивается в объеме и по форме) в различных направлениях с применением так называемых законов пластического течения, обеспечивая тем самым лучшее описание поведения бетона в стадиях, близких к разрушению и в стадиях трещинообразования.

На рис. 1.5. представлен пример изменения (пример пластического течения или механизма эволюции) шатра сжатия для поверхности прочности (нагружения), представленной на рис. 1.3, а на рис. 1.6 представлен пример девиаторного разупрочнения (эволюции) бетона при использовании неассоциированного закона пластического течения [4].

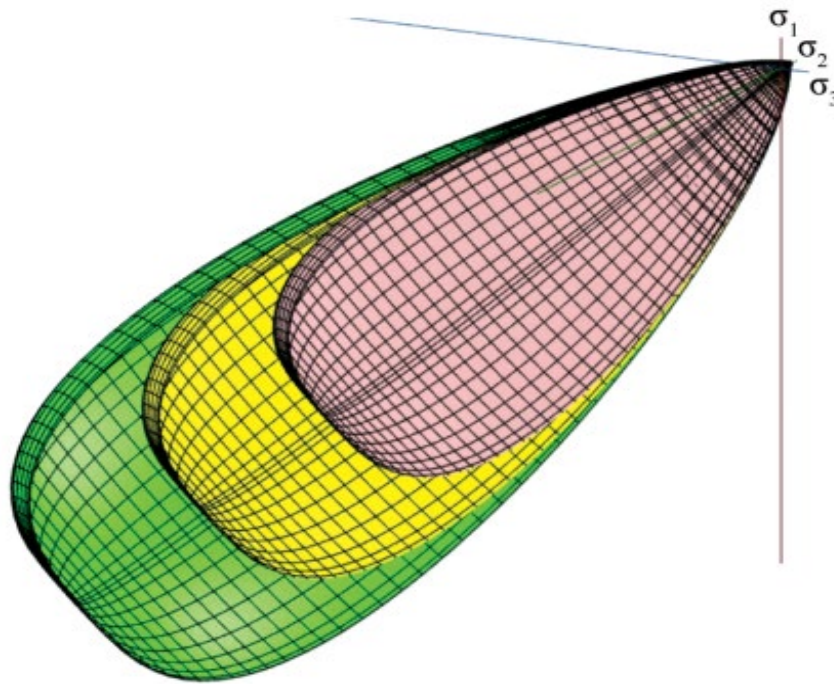


Рис. 1.5. Механизм эволюции (изменение формы и объема) шатра сжатия предельной поверхности при нагружении бетона [4]

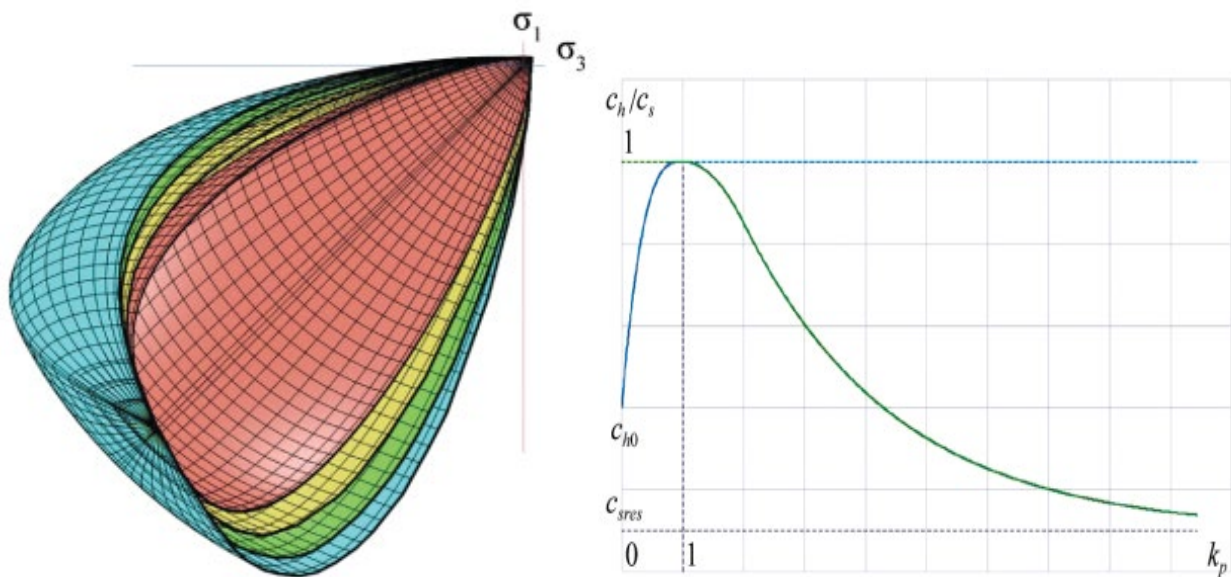


Рис. 1.6. Механизм девиаторной эволюции (уменьшения объема) предельной поверхности при нагружении бетона и пример описания на плоскости закона его «разупрочнения» в зависимости от коэффициента накопления деформаций (k_p) [4]

Для возможности учета образования и определения величины раскрытия трещин, а также для учета перераспределения растягивающих напряжений в зонах с трещинами и зонах между трещинами, применяется так называемая теория повреждаемости бетона, основывающаяся на энергетическом подходе.

В данном подходе учет остаточных напряжений (за счет зацепления по «берегам») в зоне образования трещины производится путем введения условного параметра внутренней энергии, необходимой для образования свободных поверхностей трещины (где напряжения зацепления становятся равными нулю). Данный процесс описан на рис. 1.7. Из него хорошо видно, что энергия G_f представляет собой площадь, ограниченную заданной экспоненциальной кривой, строящейся от вершины диаграммы растяжимости бетона.

Вычисление напряжений в зоне трещины при этом производится путем использования коэффициента повреждаемости ω , принимающего значения от нуля (неповрежденный бетон) до единицы (полностью поврежденный бетон со свободным раскрытием трещины при отсутствии эффекта зацепления).

Развитие теории повреждаемости бетона применительно к методу конечных элементов и теориям пластичности бетона отражено в работах преимущественно зарубежных ученых, среди которых стоит упомянуть: Lubliner J [75], Bazant Z.P. [62], Etse G. [67], Grassl P. [69].

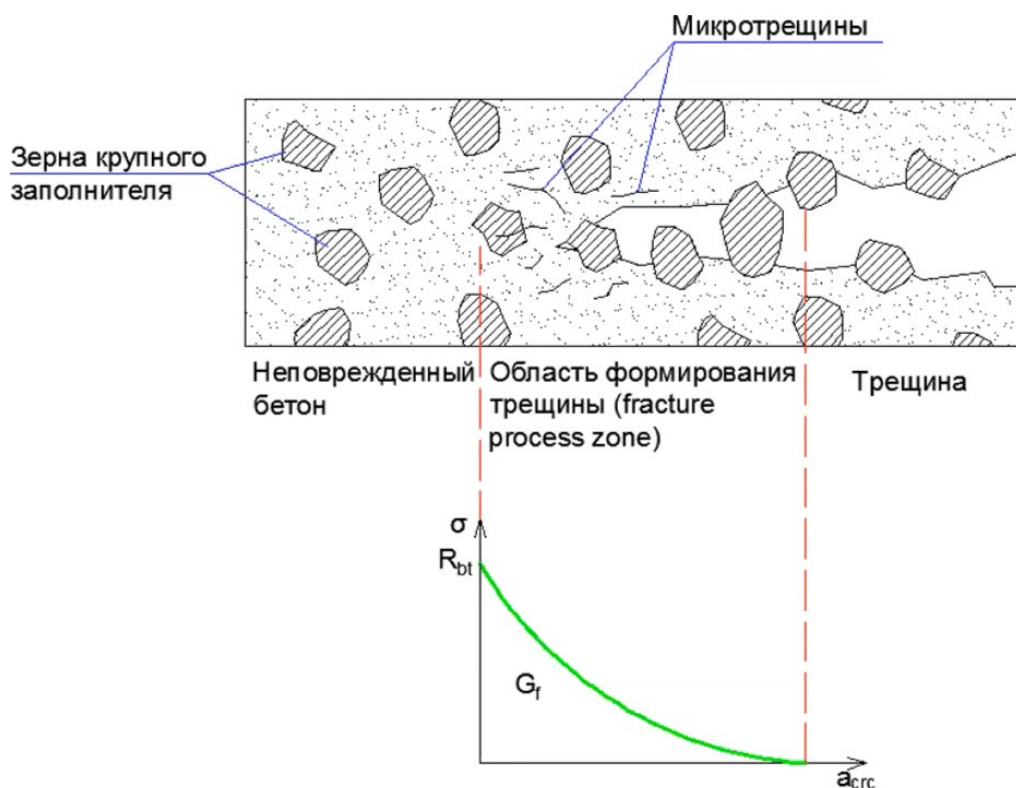


Рис. 1.7. Представление распределения внутренней энергии G_f элементарной площадки в зоне трещины для учета остаточных напряжений

Реализация возможности учета направления развития трещин может выполняться 3 основными методами. Данные методы подразделяются по принятым системам развития трещин в конечно-элементной модели: ортотропное (образование трещин по трём ортогональным направлениям), анизотропное (образование трещин по многочисленным площадкам) и изотропное (образование трещин без привязки к направлению).

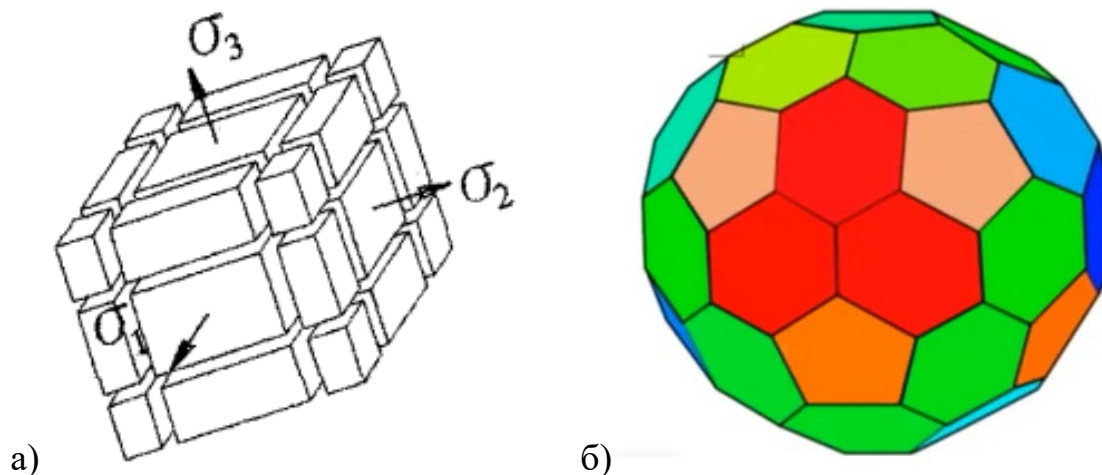


Рис. 1.8. Ортотропная по 3-м (а) и анизотропная по 42-м (б) площадкам система развития трещин в конечных элементах

Наиболее сложным подходом является реализация анизотропной системы развития трещин, однако, в большинстве моделей реализована изотропная система образования трещин, которая проще в математическом описании, но требует дополнительного контроля со стороны пользователя.

Значительным преимуществом использования теории повреждаемости является возможность учета истории нагружения конструкций, а также возможность анализа конструкций, находящихся под воздействием динамических, в том числе и знакопеременных нагрузок. В этом случае для возможности учета раскрытия и закрытия трещин используются разные коэффициенты повреждаемости для зоны сжатия (d_c) и растяжения бетона (d_t).

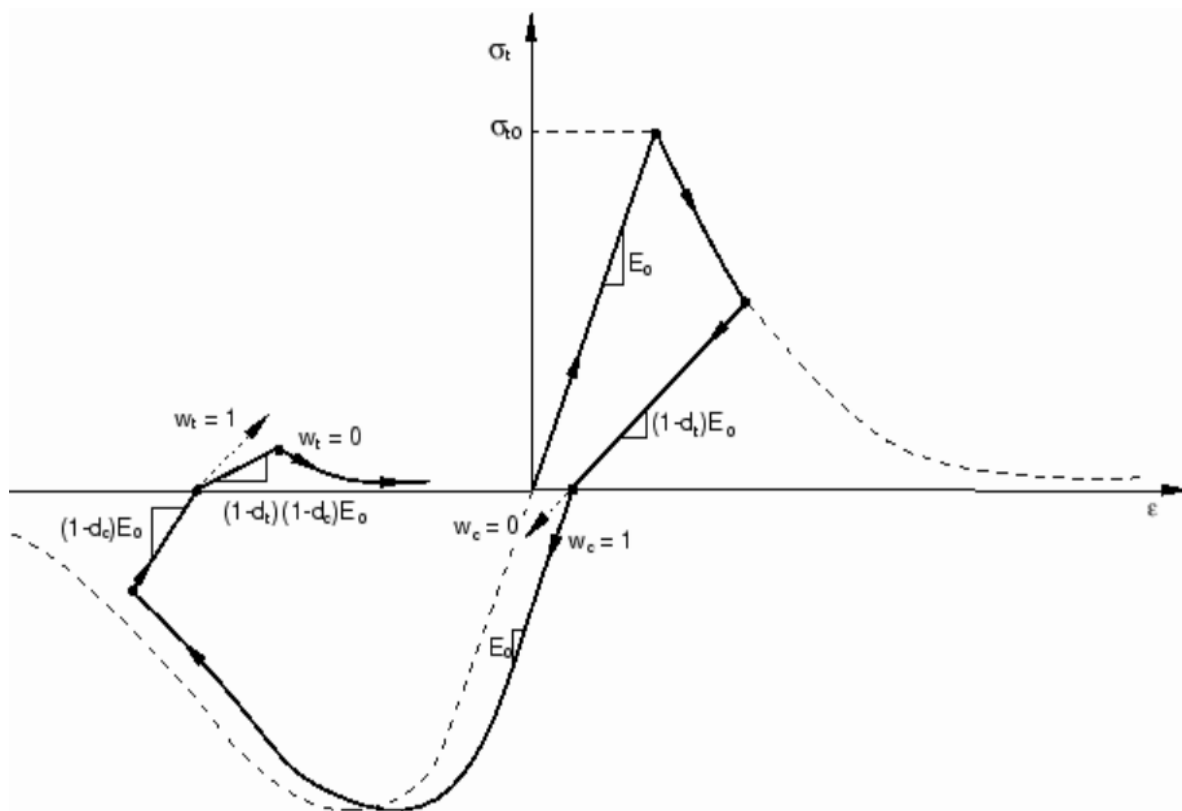


Рис. 1.9. Процесс знакопеременного нагружения в модели повреждаемости («CDP») (масштаб напряжений и деформаций растяжения увеличены относительно масштаба напряжений и деформаций сжатия)

Модель с различными функциями описания повреждаемости бетона для зоны сжатия и зоны растяжимости хорошо проиллюстрирована на рис. 1.9. Как видно из представленного графика при первоначальном растягивающем воздействии и образовании трещины в бетоне происходит смена знака нагружения, после чего нагружение по ветви сжатия происходит с начальным модулем деформации, не зависящим от коэффициента повреждаемости бетона при растяжении. Однако, после развития значительных пластических деформаций при сжатии, происходит дальнейшая смена знака нагружения и переход на ветвь растяжения происходит уже с учетом снижения модуля деформации для бетона, умноженного на суммарный коэффициент повреждаемости при растяжении d_t и сжатии d_c .

Рассмотрим более подробно некоторые наиболее известные модели бетона, реализованные в наиболее популярных комплексах твердотельного моделирования и конечно-элементного анализа.

а) Модель прочности бетона К.Ж.Уиллам - Е.Р.Уарнке (модель «solid65»)

Данная модель является одной из первых, реализованных в программных комплексах твердотельного конечно-элементного анализа. Она представлена в старых версиях программного комплекса «ANSYS Mechanical». На текущий момент развитие данной модели разработчиками прекращено ввиду появления и развития более совершенных современных моделей.

Модель К.Ж.Уиллам - Е.Р.Уарнке реализовывает соответствующую теорию прочности, описанную в работе [85]. Предельная поверхность прочности бетона для данной модели приведена на рис. 1.10.

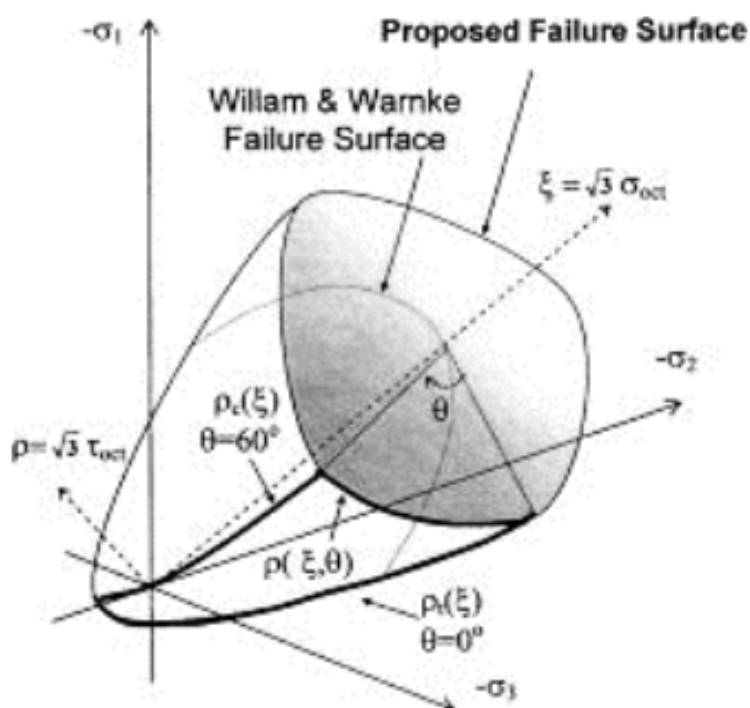


Рис. 1.10. Предельная поверхность прочности для бетона Уиллам – Уарнке [85]

К основным преимуществам данной модели можно отнести:

- возможность учета развития и раскрытия трещин в конечных элементах по ортотропной системе;
- описание предельной поверхности производится с использованием относительно простых параметров бетона: значений прочности при одноосном и двухосном сжатии, а также прочности на растяжение, которые достаточно точно могут быть получены опытным путем;
- относительная простота определения входных параметров, большинство из которых принимаются из анализа диаграмм деформирования бетона при одноосном сжатии и растяжении.

Главным недостатком модели является невозможность учета пластических деформаций и соответствующих, связанных с ними, эффектов дилатации и контракции. Таким образом, модель реализует только хрупкое разрушение бетона после достижения любой точки на предельной поверхности с возможностью реализации образования и анализа развития трещин в растянутых зонах конструкции.

б) Модель повреждаемости бетона (Concretedamagedplasticity, CDP)

Данная модель получила широкое распространение и реализована во многих комплексах твердотельного моделирования и конечно-элементного анализа, к которым можно отнести: «AbaqusFEA», «MidasFEANX», «OOFEM».

Модель основывается на теории упруго-пластичности Друкера-Прагера[66], модифицированной для бетона, учитывающей влияние на прочность в том числе и сдвиговых деформаций.

Предельная поверхность для бетона, описываемая функцией (1.1), представлена на рис. 1.11. Данная поверхность может хорошо модифицироваться и усложняться при выполнении внутренних математических преобразований.

Функция, описывающая предельную поверхность прочности бетона в данной модели, выражается путем использования первого инварианта шарового тензора напряжений (I_1) и второго инварианта девиатора напряжений (J_2):

$$f(\sigma, \tau) = F(\sigma) - \tau ; \quad (1.1)$$

$$F(\sigma) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} , \quad (1.2)$$

где:

τ – предел текучести при чистом сдвиге,

α – коэффициент влияния среднего давления на предел текучести.

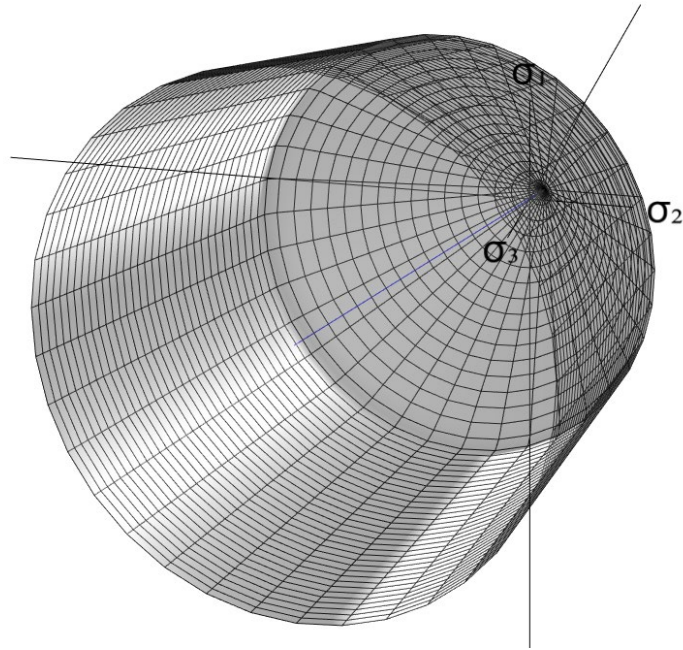


Рис. 1.11. Предельная модифицированная поверхность для бетона Друкера-Прагера

В данной модели могут применяться линейный или экспоненциальный законы разупрочнения. Экспоненциальный закон разупрочнения совместно с локальной моделью повреждаемости бетона применительно к теории упруго-пластичности Друкера-Прагера как раз и получил название модели CDP («*Concretedamagedplasticity*»).

В данном случае остаточные напряжения в поврежденном конечном элементе вычисляются по следующей формуле с учетом различных коэффициентов повреждаемости для зоны сжатия (d_c, ω_c) и для зоны растяжения (d_t, ω_p) бетона:

$$\sigma = (\sigma_p(1 - \omega_p) + \sigma_c)(1 - \omega_c), \quad (1.3)$$

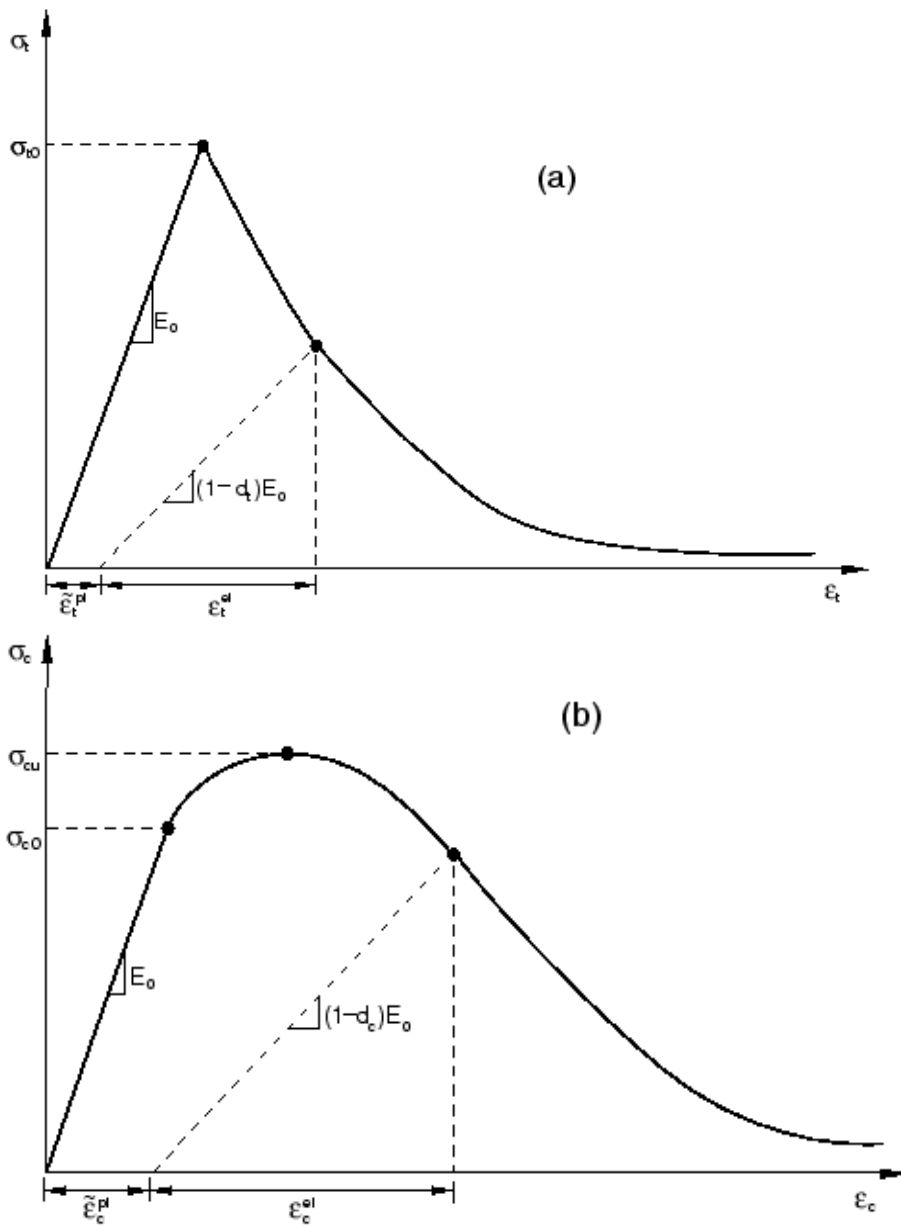


Рис. 1.12. Модель повреждения бетона (CDP) для зон растяжения(а) и сжатия(б)

Для перехода к ширине раскрытия трещины в описываемом локальном подходе (в одном конкретном конечном элементе) используется теория полосы трещин («*Crack-band theory*»), предложенная Bazant Z.P. [61]:

$$1 - \omega_p = e^{-\left(\frac{a_{crc} \cdot R_{bt}}{G_f}\right)} = e^{-\left(\frac{\varepsilon_f \cdot l_{char} \cdot R_{bt}}{G_f}\right)} \quad (1.4)$$

где:

- ε_f – разница между полными деформациями и остаточными (рис. 1.12,а);
- G_f – энергия, затрачиваемая для образования свободных трещин (рис. 1.13);
- l_{char} – средний размер КЭ, перпендикулярный трещине (рис. 1.14).

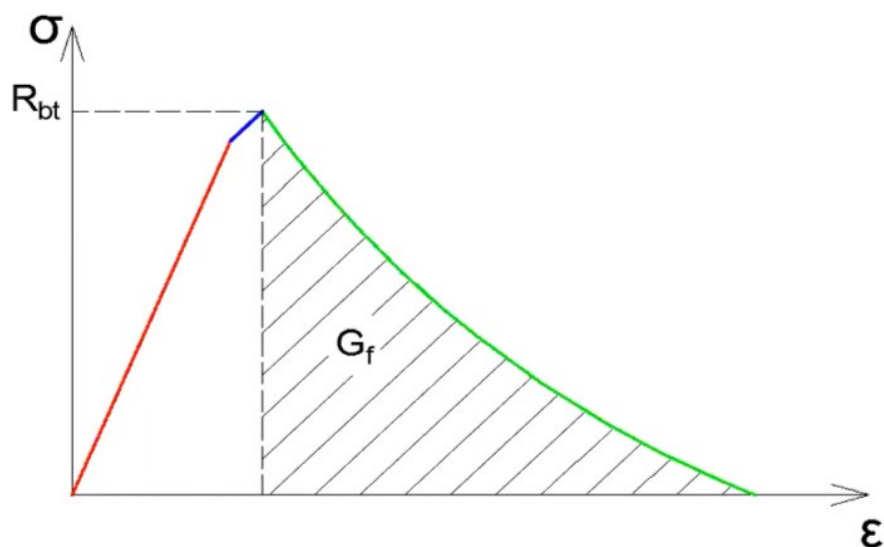


Рис. 1.13. Геометрическое описание внутренней энергии G_f на элементарной площадке (полосе) после образования трещины на графике растяжимости бетона

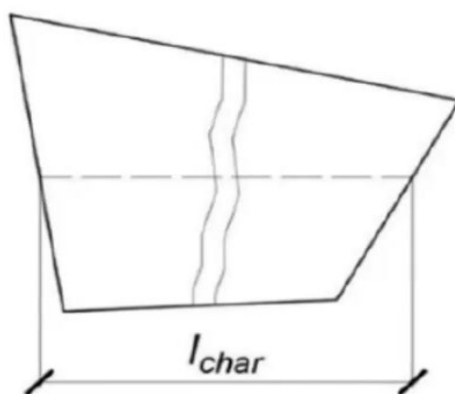


Рис. 1.14. Схема для определения параметра l_{char} в конечном-элементе

Применительно к данной модели, в отличие от ортотропной системы трещин в модели Виллама-Варнке, реализуется изотропная система образования трещин в объемных конечных элементах с их локализацией (рис. 1.14).

Как уже было сказано в первом разделе данной работы, модель бетона Друкера-Прагера может некорректно описывать поведение изгибаемых конструкций при одновременном наличии зон и сжатия и растяжения, так как первоначально в основе своей модель разрабатывалась для исследования сложного напряженно-деформированного состояния прочных грунтов, плохо описываемых теорией упруго-пластичности Кулона-Мора. В последующем модель была модифицирована (см. рис. 1.11) и названа теорией пластичности и прочности Друкера-Прагера для бетона («Drucker-Pragerforconcrete»).

Данная модель относительно проста в описании и требует задания таких механических характеристик, как: предела прочности на одноосное сжатие, предела прочности на одноосное растяжение, предела прочности при двухосном сжатии, а также параметра дилатации бетона (более подробное описание физического смысла данного процесса будет показано далее). Остальные параметры модели могут быть получены на основании всем известных одноосных диаграмм деформирования бетона или на основании верификации модели с имеющимися опытными данными.

Стоит отметить, что данная модель в последнее время, ввиду своего широкого распространения, также нашла свое применение при физически нелинейном анализе стержневых и пластинчатых конечных элементов, что достаточно полно описано в работе [56]. Эта модель в настоящее время реализована и в последних версиях отечественных программных комплексов, таких как «ЛИРА» и «SCAD++».

в) Модель бетона Šervenka

Модель Šervenka[64], реализованная в комплексе твердотельного моделирования и конечно-элементного анализа «АТЕНА», является одной из наиболее известных моделей и носит свое название в честь главного разработчика модели бетона и программного продукта.

В данной модели реализована теория пластичности бетона Ментери-Виллама(*Menetrey-Willam*[76]), которая в свою очередь разработана в развитие описанной выше теории прочности бетона Виллама-Варнке. На рис. 1.15 приведена предельная поверхность прочности (пластичности) Ментери-Виллама для бетона в осях главных напряжений. С математической точки зрения рассматриваемая модель бетона представляет собой критерий прочности для бетона при многоосном напряженно-деформированном состоянии, являющегося функцией от первого инварианта шарового тензора напряжений и второго и третьего инварианта девиатора напряжений.

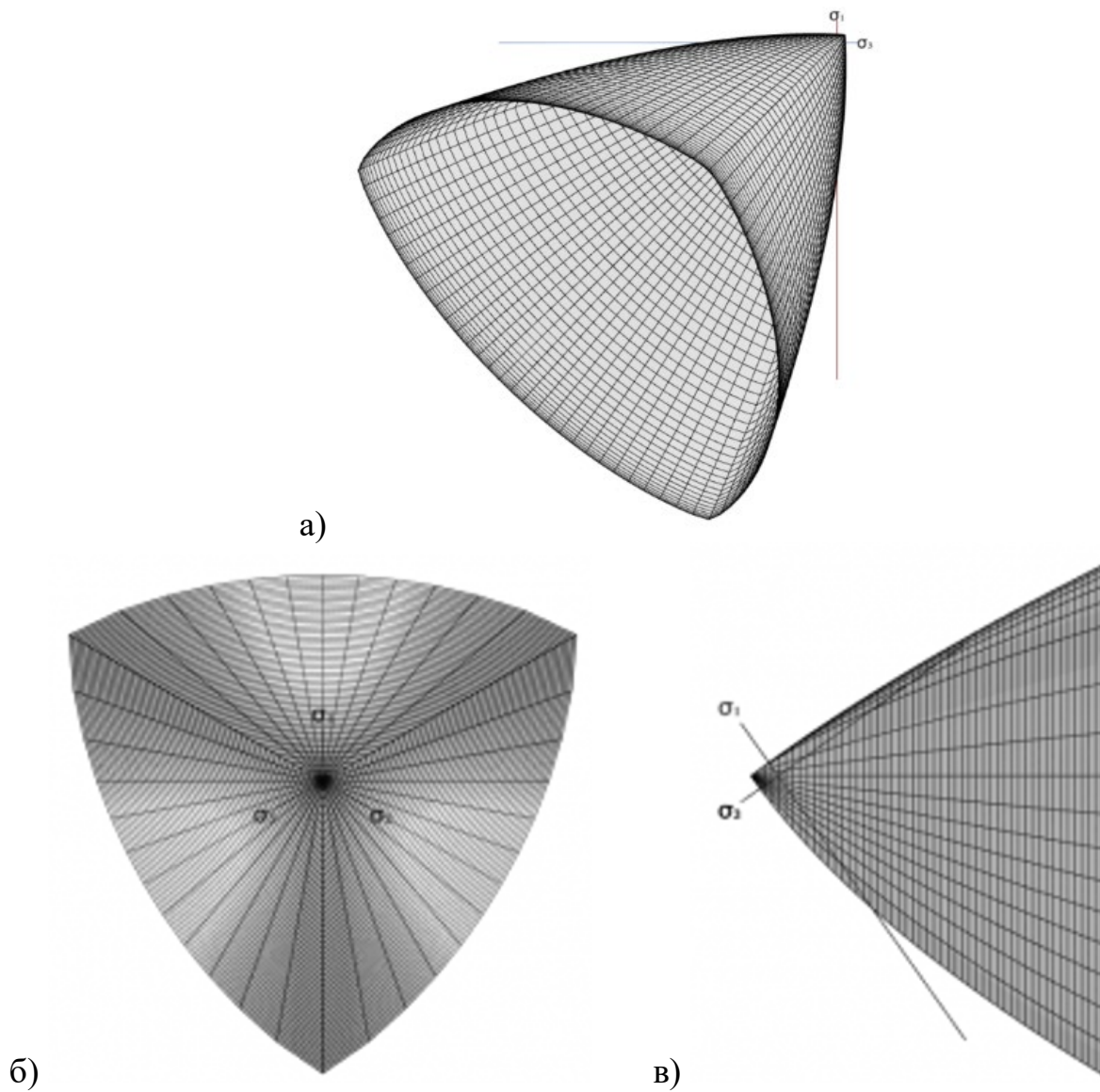


Рис. 1.15. Предельная поверхность прочности бетона Ментери-Виллама [76]
 (а – общий вид поверхности, б – вид на девиаторную плоскость,
 в - вид на меридианную плоскость)

Предельная поверхность Ментери-Виллама определяется следующей достаточно сложной многопараметрической функцией [76]:

$$F(\xi, \rho, \theta) = \frac{c_1}{c_2} (\sqrt{2}\xi + r(\theta) \cdot \rho) + \rho^2 - \frac{1}{c_3}, \quad (1.5)$$

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 \quad (1.6)$$

$$\rho = \sqrt{2J_2} \quad (1.7)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{\sqrt{J_2^3}} \right) \quad (1.8)$$

В уравнении предельной поверхности (1.5) коэффициенты c_1, c_2, c_3 вычисляются через пределы прочности на растяжение, одноосное и двухосное сжатие, а параметр r является функцией от этих коэффициентов и угла θ , определяемого по выражению (1.8). Критерий прочности был получен на основе множества экспериментальных исследований бетонных образцов и достаточно точно описывает поведение бетона при различных напряженно-деформированных состояниях.

В модели реализовано разрушение по экспоненциальному закону. Система развития трещин принята по ортотропной модели.

Здесь также используются подходы механики разрушения, но, в отличие от предыдущей модели, используется дополнительная предельная поверхность для определения деформаций повреждения [84]. Процесс эволюции предельной поверхности Ментери-Виллама в осях главных напряжений с использованием отдельной поверхности для деформаций повреждений представлен на рис. 1.16.

Большим преимуществом данной модели является относительная простота в её калибровке и валидации.

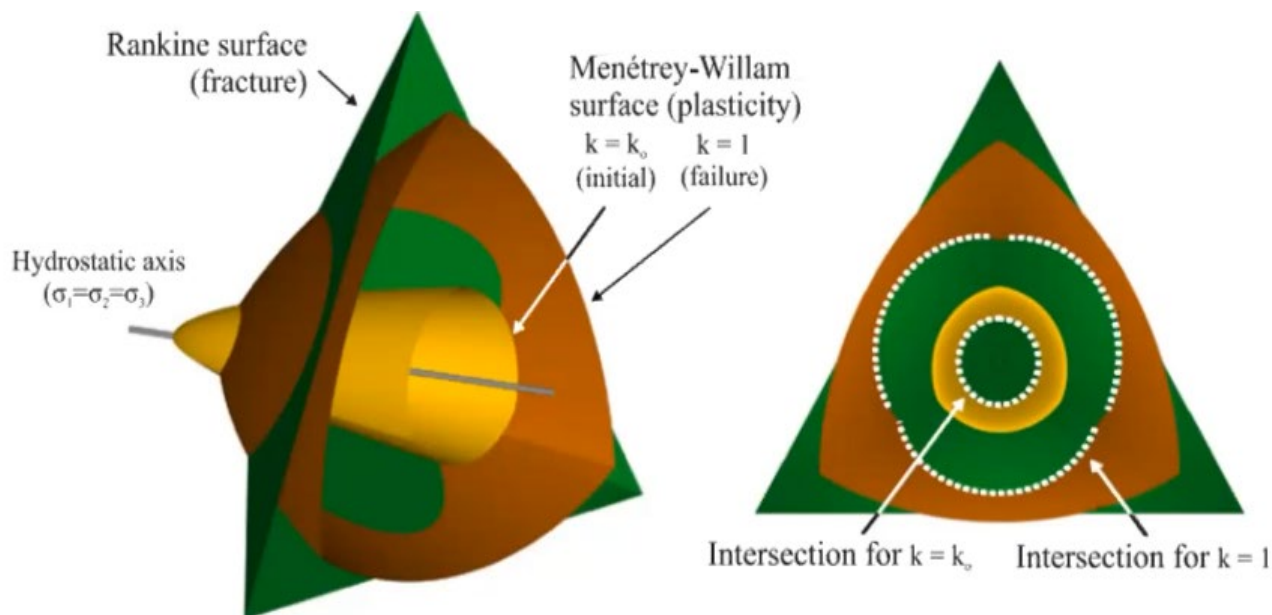


Рис. 1.16. Реализация наложения поверхности повреждения на поверхность прочности Ментери-Виллама и её эволюция

г) Микропоскостная нелокальная модель бетона с повреждениями

Микропоскостная нелокальная модель бетона с повреждениями [62] («*Microplanemodelforconcrete*») реализована на текущий момент из известных комплексов твердотельного моделирования только в «ANSYS».

Данная модель в своей основе также использует теорию пластичности Друкера-Прагера с шатровой поверхностью в зоне трехосного сжатия. Основным отличием от предыдущей модели является использование нелокального подхода к повреждаемости бетона и использование для моделирования трещин анизотропной системы их развития в конечных элементах по 42-м разнонаправленным площадкам.

Микропоскостная модель повреждаемости позволяет выполнить полную калибровку модели бетона под имеющиеся опытные данные испытаний путем корректировки с использованием внутренних параметров модели. На рис. 1.17 представлены возможные виды трансформаций диаграммы деформирования сжатого бетона (экспоненциального закона разупрочнения) в зависимости от принятых значений параметров в модели.

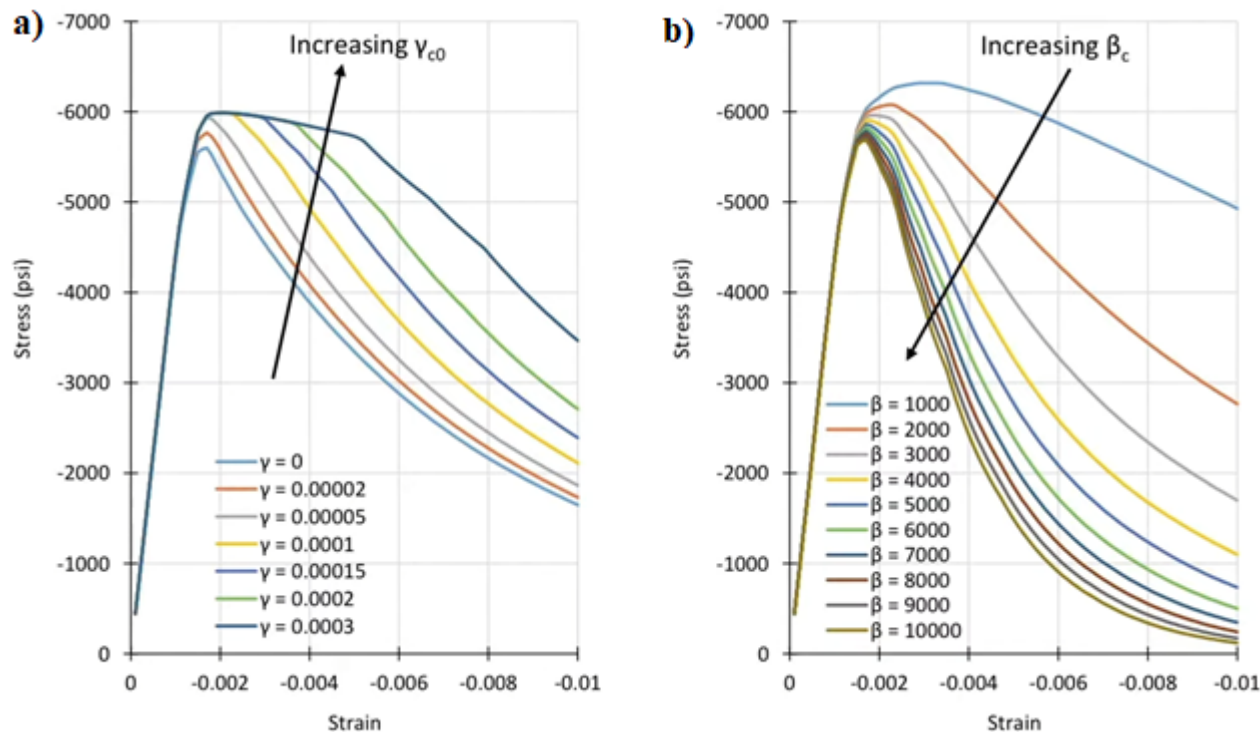


Рис. 1.17. Влияние параметров модели на изменение вида диаграмм деформирования (а – влияние параметра γ_{c0} на величину площадки макро-трещинообразования, б– влияние параметра β_c на скорость падения остаточных напряжений при разрушении сжатого бетона)

Нелокальная модель бетона с повреждениями, используемая в данном случае, представляет собой осреднение результатов в области нескольких конечных элементов, попадающих в заданный через параметры модели радиус. Чем ближе конечный элемент располагается к центру заданной окружности, тем большее влияние он оказывает на величину коэффициента повреждаемости в модели.

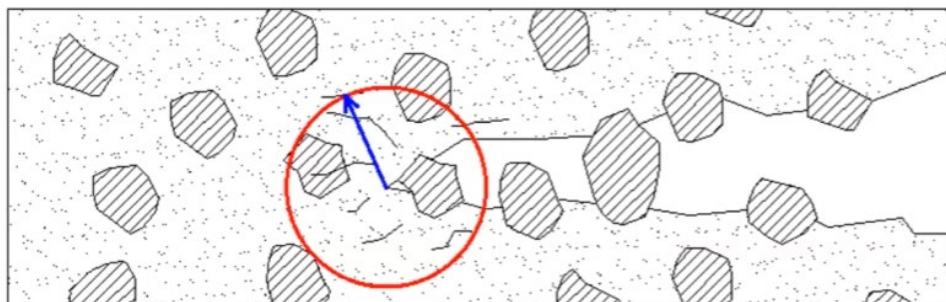


Рис. 1.18. Геометрическое представление нелокальной модели повреждения бетона

В этой модели, в отличие от других моделей с использованием локального подхода, вычисление остаточных напряжений и, как следствие, коэффициента повреждаемости ω выполняется через усредненные (нелокальные) деформации $\bar{\varepsilon}_f$ по зависимости:

$$\frac{\sigma}{R_{bt}} = 1 - \omega = e^{-\left(\frac{\bar{\varepsilon}_f}{\varepsilon_{f0}}\right)} \quad (1.9)$$

Реализация данного подхода к описанию повреждаемости бетона в численных моделях производится с применением конечных элементов с дополнительными степенями свободы.

К основным преимуществам модели стоит отнести лучшую устойчивость решения и лучшую сходимость получаемых результатов с результатами экспериментов при достаточной точной настройке и калибровке модели. Данная модель также является наиболее устойчивой к размерности конечно-элементной сетки, что позволяет сократить трудоемкость вычислений, что хорошо представлено на графиках на рис. 1.19 для балки, подверженной кручению при наличии магистральной трещины пространственного расположения.

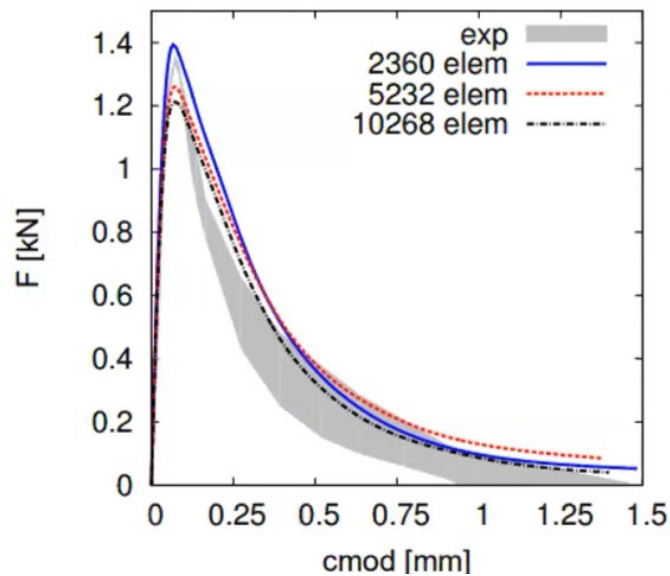


Рис. 1.19. Зависимость ширины раскрытия косой трещины от усилия кручения в балке для разных размерностей конечно-элементной сетки и по опытным данным

Значительным недостатком модели, сдерживающим её широкое распространение, является серьезная сложность её применения, возникающая при калибровке модели математическими параметрами, не имеющими прямого физического смысла, а также необходимость выполнения валидации с результатами испытаний опытных бетонных образцов при сложных напряженно-деформированных состояниях.

Как видно из проведенного анализа известных моделей, к существенным плюсам применения теорий пластического течения стоит отнести возможность численного анализа бетонных и железобетонных конструкций любого типа и формы, находящихся в любых напряженно-деформированных состояниях с заранее заданной точностью решения.

К основным сложностям и проблемам применения данного подхода стоит отнести:

- значительные временные и вычислительные затраты для получения результатов физически нелинейных расчетов твердотельных моделей;
- некоторые отклонения результатов при неравномерных и сложных напряженно-деформированных состояниях (чаще всего в сторону завышения прочности), связанных с верификациями моделей прочности только для относительно «простых» состояний, получаемых опытным путем;

- возникающие сложности сходимости и ухудшение точности математического решения в определенных зонах сингулярностей на поверхности текучести;

- в некоторых случаях условность использования параметров математических моделей материалов, получение которых опытным путем на данный момент не представляется возможным;

- зависимость результатов некоторых реализованных моделей от размерности конечно-элементной сетки;

- возможность использования только тех моделей бетона, которые реализованы в доступных пользователю вычислительных комплексах конечно-элементного анализа.

Таким образом, основной **целью** авторов данной монографии является теоретическое описание и практическое применение к реальным конструкциям теории пластического течения совместно с моделями повреждаемости бетона, являющихся, как видно из проведенного анализа выше, наиболее перспективными способами исследования реального поведения железобетонных конструкций любого типа и их твердотельных моделей под нагрузкой, с использованием современных вычислительных средств и программных комплексов конечно-элементного анализа.

Таким образом применение твердотельного моделирования и последующего расчета таких моделей позволяет выходить за рамки области применимости действующих нормативных документов, методы расчета которых разрабатывались преимущественно для стержневых моделей, что является очень **актуальным** при проектировании уникальных и особо сложных объектов в реальной практике.

2. Теоретические основы численного моделирования железобетона с учетом нелинейной работы бетона и арматуры

Как известно, железобетон является композиционным материалом, состоящим из матрицы (бетона) и арматуры. При этом бетон при его работе под нагрузкой является сложным, с точки зрения описания его механических свойств, упруго-пластическим материалом. Пластический характер деформирования бетона начинается уже при начальных уровнях его нагружения. Истинная диаграмма деформирования сжатого и растянутого бетона под нагрузкой является криволинейной.

Стальная арматура (из мягких сталей) в свою очередь является упругим материалом до уровня нагружения, соответствующего пределу текучести стали. При дальнейшем нагружении стальная арматура проявляет только пластические свойства. Большинство мягких сталей также имеют участок упрочнения после прохождения площадки текучести при достаточно больших уровнях деформаций. Исключение здесь составляют армирующие полимерные материалы (стеклопластик, углепластик и др.), работа под нагрузкой которых при растяжении соответствует полностью упругому закону деформирования, а прочность при сжатии по сравнению со стальной арматурой, в связи с особенностями композитной структуры, достаточно мала.

Дополнительные сложности вызывает, допускаемое действующими нормативными документами, наличие трещин в растянутой зоне бетона, которые в свою очередь вызывают значительную анизотропию свойств бетона, что необходимо учитывать в численных исследованиях.

Особенностью программного комплекса «ANSYS» является возможность учета не только нелинейного деформирования бетона и арматуры при одноосном напряженно-деформированном состоянии (при сжатии или растяжении по определенным и заранее известным направлениям), но и учет развития анизотропии свойств бетона при его сложных напряженно-деформированных состояниях (при двухосных и трехосных НДС), что позволяет производить численные исследования объемных твердотельных моделей конструкций с достаточной степенью точности.

2.1. Определение физико-механических параметров

для моделирования бетона в объемной постановке задачи

Для моделирования бетона в твердотельном виде в программном комплексе «ANSYS» в среде «Workbench» применяются два типа конечных элементов: элементы типа «solid65» и конечные элементы типа «solid185/186». Стоит отметить, что применение устаревших КЭ «solid 65» в среде «Workbench» с использованием встроенного функционала и интерфейса программы невозможно и требует знание основ внутреннего языка программирования ANSYS-APDL. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать моделирование твердотельных моделей бетона с использованием конечных элементов типа «solid 185/186», имеющих дополнительные точки (узлы) на середине каждого ребра конечного элемента.

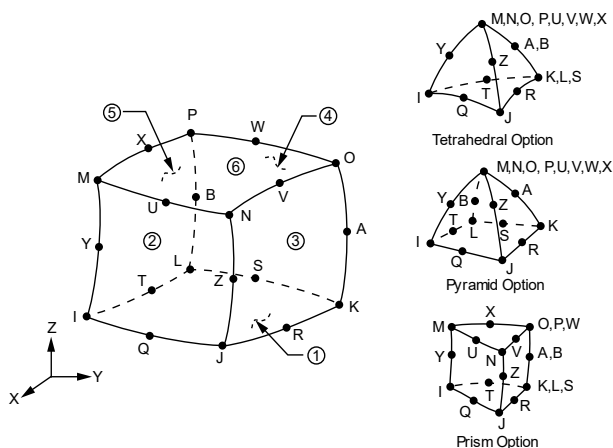
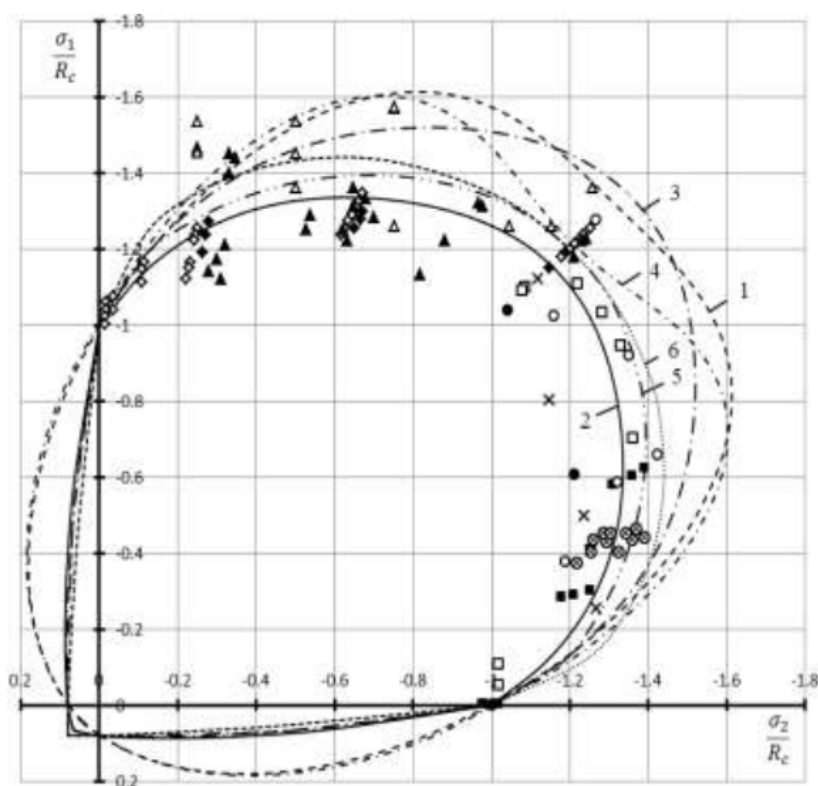


Рис. 2.1. 20-ти узловой конечный элемент типа solid186

Наиболее подходящими для описания многоосного напряженно-деформированного состояния бетона в «ANSYS Workbench» являются две теории прочности и пластичности: теория Друкера-Прагера (*Drucker-Prager*) и теория Менери-Виллама (*Menetrey-Willam* [77]). В отечественной практике наибольшую известность в свою очередь получила теория пластичности бетона Г.А. Гениева [4], однако в «ANSYS Workbench» она не представлена.

Анализ [56], в том числе и экспериментальный, корректности применения теории прочности бетона Друкера-Прагера и теории пластичности бетона Г.А. Гениева для всех типов конструкций показал, что первая плохо описывает бетон в изгибаемых конструкциях, что связано с тем, что первоначально теория разрабатывалась для описания поведения преимущественно скальных грунтов,

а вторая нередко дает большую погрешность для описания поведения преимущественно сжатых железобетонных конструкций с завышением несущей способности относительно экспериментальной, что хорошо видно на сопоставлении на рис. 2.2.



Критерии прочности авторов:

- 1 – Г.А. Геншева
- 2 – Е.С. Лейтеса
- 3 – А.В. Яшина
- 4 – Г.А. Геншева – Н.М. Аликовой
- 5 – С.Ф. Клованича
- 6 – К.Ж. Willam – Е.Р. Warnke

Данные опытов:

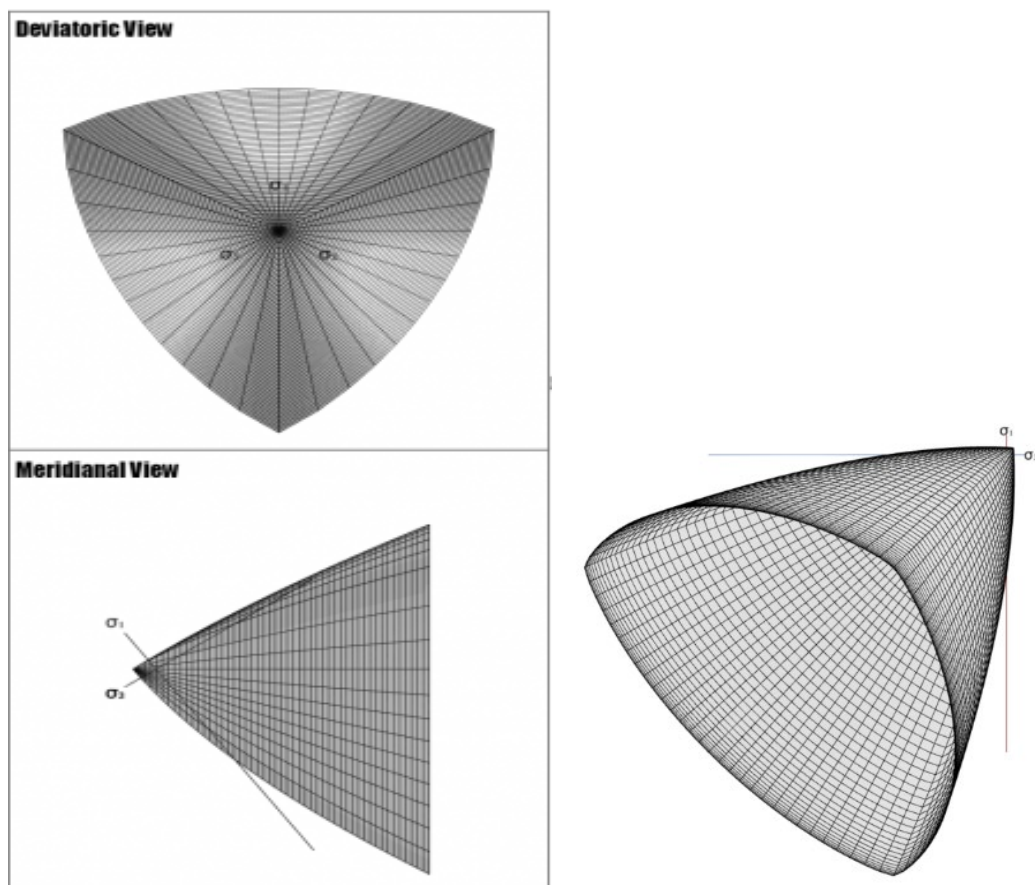
- - Liu T.C.Y.
- ◆ - Kupfer H.
- △ - Mills L.
- ▲ - Яшин А.В.
- - Geel Van E.
- - Бамбура А.Н.
- - Rosenthal I.
- × - Schröder S.
- + - Бигч П.М.
- ▣ - Кулик И.И.
- ▤ - Буслер Л.Э.
- ▥ - Перваков В.Н.
- ▧ - Zielinski A.J.
- ⊙ - Wang H.L.
- ⊗ - Hansen T.C.
- ⊕ - Корсун В.И.

Рис. 2.2. Сопоставление проекций поверхностей прочности при плоском НДС с экспериментальными данными различных авторов

Теория прочности и пластичности бетона Ментери-Виллама (*Menetrey-Willam*), которая в свою очередь разработана в развитие теории прочности бетона Виллама-Варнке (*Willam-Warnke* [85]), по результатам множества выполненных экспериментальных исследований [77] хорошо описывает поведение натуральных образцов бетона в различных, в том числе и многоосных, напряженно-деформированных состояниях. Стоит отметить, что данная поверхность текучести близко соответствует поверхности текучести бетона Клованича-Безушко [13].

На рис. 2.3 приведена поверхность текучести (прочности) Ментери-Виллама для бетона в осях главных напряжений. С математической точки зрения рассматриваемая модель бетона представляет собой критерий прочности для бетона при многоосном напряженно-деформированном состоянии,

являющегося функцией от первого инварианта шарового тензора напряжений и второго и третьего инварианта девиатора напряжений. Критерий прочности был получен на основе множества экспериментальных исследований бетонных образцов при многоосном напряженно-деформированном состоянии.



$$f_{MW} = \frac{c_2}{c_3} [\sqrt{2} \xi + r \rho] + \rho^2 - \frac{1}{c_3}$$

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 \quad \rho = \sqrt{2J_2} \quad \cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{\sqrt{J_2^3}}$$

Рис. 2.3. Поверхность текучести Менетри-Виллама (*Menetrey-Willam*[76]) для бетона в осях главных напряжений и её математическая форма описания ниже

Наибольшая сложность с моделированием бетона возникает при учете трещин в растянутой зоне. При этом моделирование трещин в явном виде путем их ручного задания в модели, как советуют авторы методического пособия [18], трудоемко, связано с большими погрешностями вычислений и нецелесообразно. Поэтому для моделирования трещин в растянутой зоне используется модель разупрочнения (деградации) бетона HSD6 (*Hardening-Softening and Dilatation*).

Модель HSD6 (*Hardening-Softening and Dilatation*) позволяет: во-первых, учесть перераспределение напряжений в растянутой зоне между условными локальными участками «с трещинами» и «без трещин» за счет резкого снижения напряжений при росте деформаций в локальных зонах их образования, а во-вторых, учесть ниспадающую ветвь бетона в сжатой зоне по экспоненциальному или линейному закону, что достаточно точно описывает экспериментальные данные по испытаниям образцов бетона с контролем скорости наращивания деформаций (рис. 2.4). В графическом представлении модель HSD6 уменьшает объем, ограничиваемый поверхностью текучести при достижении любой точки на первоначальной поверхности прочности, представленной на рис. 2.3.

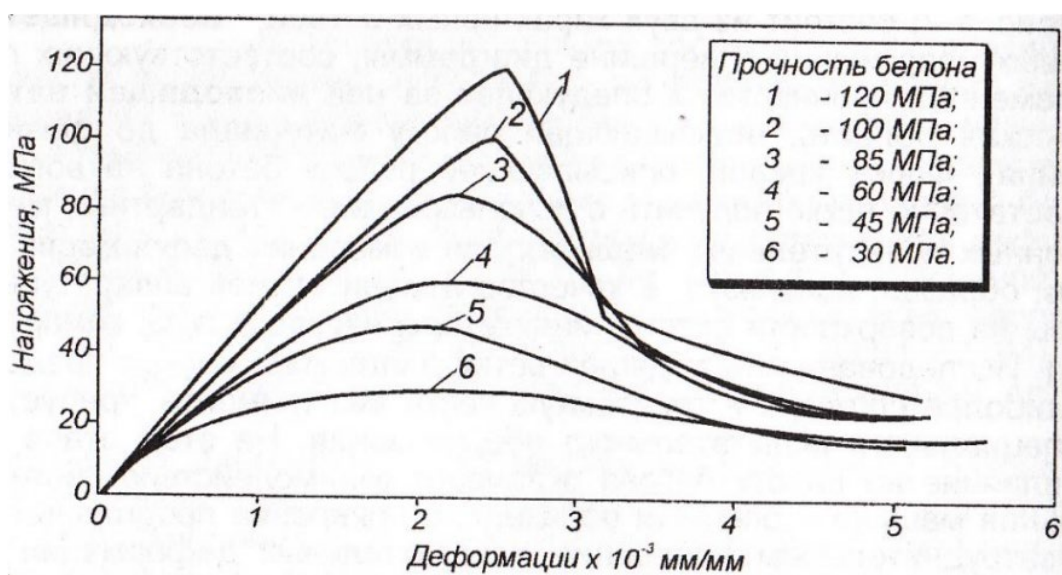


Рис. 2.4. Характерный вид экспериментальных диаграмм бетона, полученных с контролем скорости наращивания деформаций

Графическое и математическое описание модели HSD6 представлено упрощено для случая одноосного напряженно-деформированного состояния на рис. 2.5 для случаев сжатия и растяжения бетона.

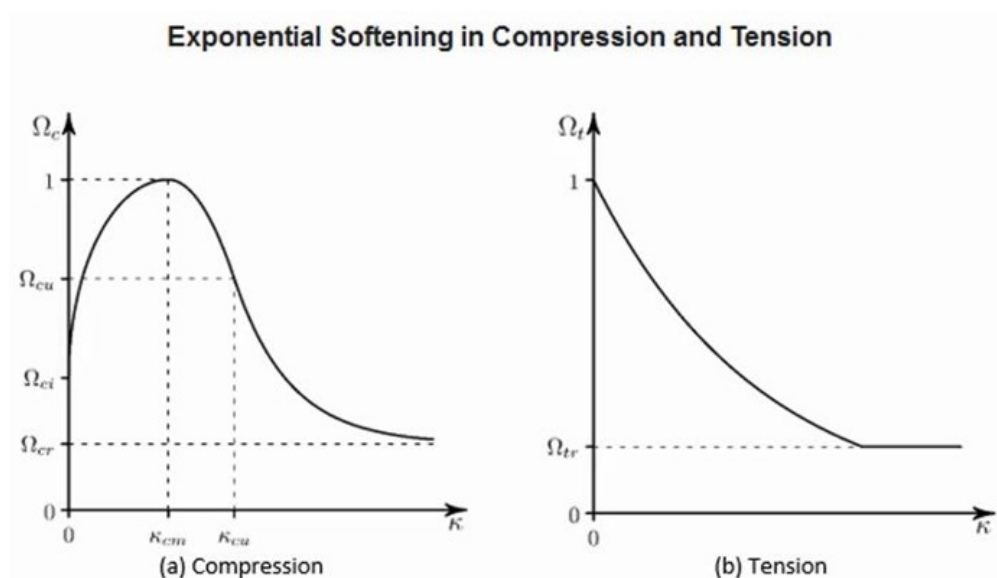


Рис. 2.5. Экспоненциальная модель разупрочнения бетона «Hardening-Softening and Dilatation (HSD6)» («слева» – для зоны сжатия, «справа» – для зоны растяжения)

$$\Omega_c = 1 - (1 - \Omega_{cu}) \left(\frac{\kappa - \kappa_{cm}}{\kappa_{cu} - \kappa_{cm}} \right)^2 \quad (2.1)$$

$$\Omega_c = \Omega_{cr} + (\Omega_{cu} - \Omega_{cr}) \exp \left(2 \frac{\Omega_{cu} - 1}{\kappa_{cu} - \kappa_{cm}} \cdot \frac{\kappa - \kappa_{cu}}{\Omega_{cu} - \Omega_{cr}} \right) \quad (2.2)$$

Таким образом, для описания модели бетона по теории прочности-пластичности Ментери-Виллама в общем случае используются следующие 6 основных параметров:

Таблица № 2.1

№	Наименование параметра	Пояснение к параметру	Ед. изм.
1	2	3	4
1	Прочность бетона при одноосном сжатии (<i>Uniaxial Compressive Strength</i>)	Значение призменной прочности бетона на сжатие (R_b, R_{bn})	МПа
2	Прочность бетона при одноосном растяжении (<i>Uniaxial Tensile Strength</i>)	Значение прочности бетона на растяжение ($R_{bt}, R_{bt,n}$)	МПа
3	Прочность бетона при двухосном сжатии (<i>Biaxial Compressive Strength</i>)	По экспериментальным данным. При отсутствии данных значение стоит принять равным $(1,15 \div 1,2)R_b$	МПа

1	2	3	4
4	Условный модуль упругости бетона (<i>Young`sModulus</i>)	Модуль упругости бетона $E_{0,усл}$, соответствующий условно-упругому участку. Вычисляется как секущий модуль деформации при уровне напряжений, соответствующих поз. № 3 табл. 1.2 ниже.	МПа
5	Коэффициент поперечной деформации (<i>Poisson`sRatio</i>)	Начальное значение коэффициента Пуассона для бетона – $\mu = 0,2$	-
6	Угол дилатации бетона при сдвиге (<i>DilatancyAngle</i>)	Характеризует развитие макротрещин при расширении бетона в стадиях, близких к разрушению. Определяется экспериментально. При отсутствии опытных данных принимается значение от $\arctan\left(\frac{R_{bt}}{\sqrt{2}R_b}\right)$ до 35 град. (рекомендуемое стандартное значение в запас прочности – по нижней границе).	град.

Параметр дилатации бетона физически описывает процесс увеличения коэффициента поперечных деформаций (коэффициента Пуассона) бетона в стадиях нагружения, при которых образец близок к своему разрушению. Данный эффект, зафиксированный с контролем поперечных и продольных деформаций при нагружении опытных образцов, хорошо показан на рис. 1.6.

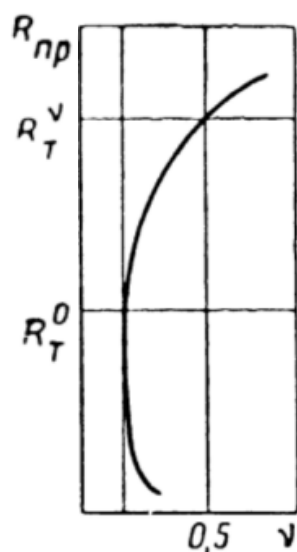


Рис. 2.6. Кривая изменения коэффициента поперечной деформации при испытании на сжатие (при напряжениях R_b превышает значение 0,5)

Для задания экспоненциального закона разупрочнения бетона HSD6 применительно к теории прочности Ментери-Виллама используются следующие 7 основных параметров:

Таблица № 2.2

№	Наименование параметра	Пояснение к параметру	Ед. изм.
1	2	3	3
1	Пластические относительные деформации бетона, соответствующие вершине диаграммы (<i>Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength</i>)	Определяются по формуле (см. рис. 1.3): $k_{cm} = \varepsilon_{b0} - \Omega_{ci} \frac{R_b}{E_{0,усл}}$	мм/м м
2	Предельные пластические относительные деформации, соответствующие началу участка разупрочнения бетона (<i>Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening</i>)	Определяются по формуле (см. рис. 1.3): $k_{cu} = \varepsilon_{b2} - \Omega_{ci} \frac{R_b}{E_{0,усл}}$	мм/м м
3	Относительные сжимающие напряжения в бетоне в конце упругого участка диаграммы (<i>Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening</i>)	Значение рекомендуется принять равным (см. рис. 1.3): $\Omega_{ci} = (0,2 \div 0,3) \frac{R_b}{R_b}$	МПа / МПа
4	Относительные сжимающие напряжения в бетоне, соответствующие предельным относительным деформациям, соответствующие началу участка разупрочнения бетона (<i>Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening</i>)	Значение рекомендуется принять равным (см. рис. 1.3): $\Omega_{cu} = 0,85 \frac{R_b}{R_b}$	МПа / МПа
5	Остаточные относительные сжимающие напряжения в бетоне в стадии полного разрушения (<i>Residual Compressive Relative Stress</i>)	Значение рекомендуется принять равным (см. рис. 1.3): $\Omega_{cr} = (0,2 \div 0,3) \frac{R_b}{R_b}$	МПа / МПа
6	Внутренняя энергия деформирования единичной площадки при растяжении (<i>Mode I Area Specific Fracture Energy</i>)	Соответствует площади фигуры, ограничиваемой диаграммой деформирования бетона при растяжении и осью абсцисс.	Н/м
1	2	3	4

7	Остаточные относительные растягивающие напряжения в бетоне, соответствующие трещинообразованию (<i>Residual Tensile Relative Stress</i>)	Значение рекомендуется принять равным(см. рис. 1.3): $\Omega_{tr} = (0,01 \div 0,1) \frac{R_{bt}}{R_{bt}}$	МПа / МПа
---	---	---	-----------------

В качестве недостающих параметров для полного описания физически нелинейной работы бетона в ПК «ANSYSWorkbench» выступают значения относительных деформаций бетона при сжатии и растяжении, соответствующие параметрическим точкам диаграммы деформирования бетона при одноосном сжатии и растяжении, а именно: ε_{b0} , ε_{b2} , ε_{bt0} , ε_{bt2} .

Данные значения относительных деформаций, а также условный модуль упругости бетона рекомендуется принимать на основании криволинейной диаграммы деформирования, представленной в прил. Г СП 63.13330.2018 [12], с параметрическими точками, полученными Н.И. Карпенко [9] (см. рис. 1.7).

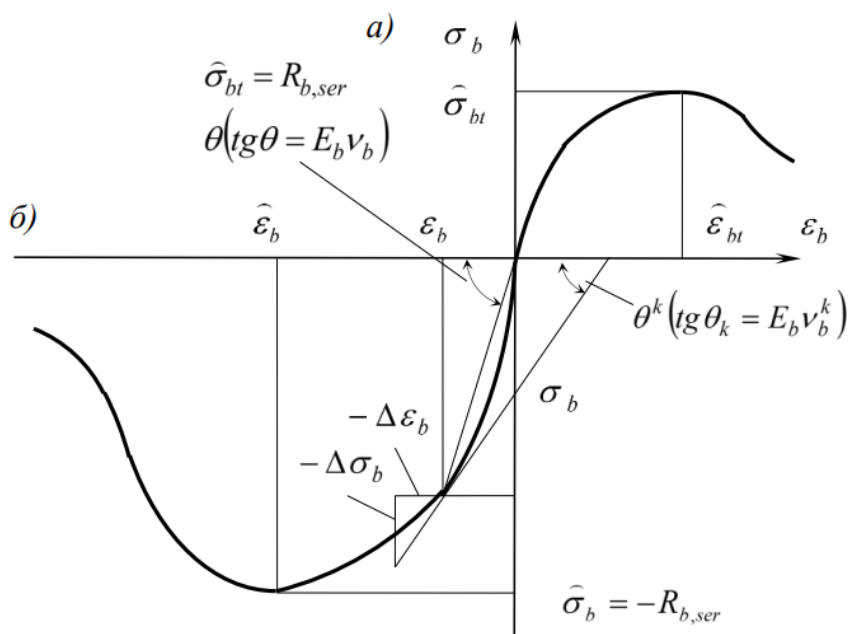


Рис. 2.7. Криволинейная диаграмма деформирования бетона при одноосном НДС с параметрическими точками, полученными Н.И. Карпенко [9]

Для упрощения в некоторых случаях значения относительных деформаций в параметрических точках диаграммы деформирования бетона могут приниматься на основании п. 6.1.14, 6.1.20, 6.1.22 СП 63.13330.2018[54]вне зависимости от класса бетона равными: $\varepsilon_{b0} = 0,002$, $\varepsilon_{b2} = 0,0035$, $\varepsilon_{bt0} = 0,0001$, $\varepsilon_{bt2} = 0,00015$. При расчете конструкций на длительное

действие нагрузок следует принимать значения относительных деформаций, указанных в табл. 6.10 СП 63.13330.2018[54].

Таким образом, для полного описания модели бетона в ПК «ANSYSWorkbench» для расчета твердотельных моделей при любом напряженно-деформированном состоянии в общем случае используется 13 основных параметров: 6 из них описывают непосредственно теорию прочности и пластичности бетона, 7 – описывают модель разупрочнения (деградации) бетона для учета его анизотропных свойств при образовании трещин в растянутой зоне конструкции.

2.2. Определение физико-механических параметров для моделирования арматуры

Для моделирования арматуры в программном комплексе «ANSYSWorkbench» наиболее оптимальным и наименее затратным, с точки зрения трудоемкости вычислений, вариантом является использование специальных армирующих конечных элементов типа «reinf264/265». Их главная особенность заключается в том, что они могут располагаться произвольно в объеме элементов «solid186», моделирующих бетонную матрицу, не привязываясь непосредственно к узлам конечно-элементной сетки, что значительно упрощает геометрические построения и контроль за конечно-элементной сеткой. Связность армирующих и объемных конечных элементов при этом производится путем специфического математического описания функций формы конечных элементов.

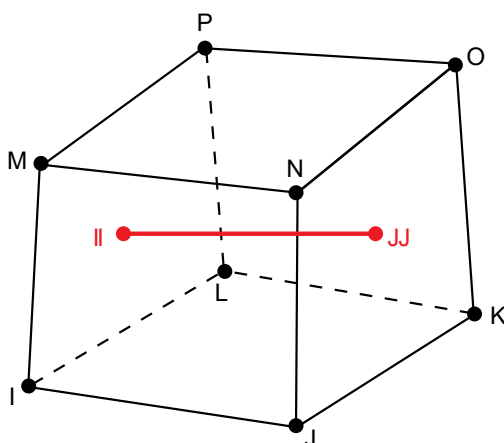


Рис. 2.8. Дискретные армирующие конечные элементы типа «reinf264»

внутри объемного КЭ (выделены красным)

Стоит отметить, что внедрение дискретных линейных армирующих элементов типа «reinf264» с версии «ANSYSWorkbench» 2021 г. производится с помощью параметра в боковом древовидном меню в разделе *Geometry*, изменяющей тип линейного элемента, моделирующего арматуру, с балочного (*beam*) на армирующий (*reinforcement*). При использовании предыдущих версий программного комплекса внедрение армирующих элементов типа «reinf264» производится только с использованием встроенной команды на языке APDL.

В общем случае для моделирования стальной арматуры применяются две основные модели: билинейная модель упрочнения стали (*BilinearHardening*) и мультилинейная модель упрочнения стали (*MultilinearHardening*), каждая из которых подразделяется в свою очередь еще на 2 основных типа: изотропное упрочнение (*IsotropicHardening*) и кинематическое упрочнение (*KinematicHardening*).

Билинейная модель упрочнения стали (*BilinearHardening*) учитывает два участка диаграммы деформирования: упругий участок и участок упрочнения. Мультилинейная модель упрочнения стали (*MultilinearHardening*) может учитывать 3 и более разнонаклонных к осям участка диаграммы деформирования и применяется преимущественно для моделирования высокопрочной арматуры без явной физической площадки текучести.

Отличие кинематического упрочнения стали (*KinematicHardening*) от изотропного упрочнения (*IsotropicHardening*) связано, в первую очередь, с учетом в первом типе упрочнения эффекта Баушингера в случае наличия динамических воздействий. Таким образом, при статических и динамических нагружениях, не приводящих к изменению знака напряжений в стальной арматуре, применяется изотропное упрочнение (*IsotropicHardening*), а при наличии динамических нагружений, приводящих к изменению знака напряжений в стальной арматуре, следует применять кинематическое упрочнение (*KinematicHardening*).

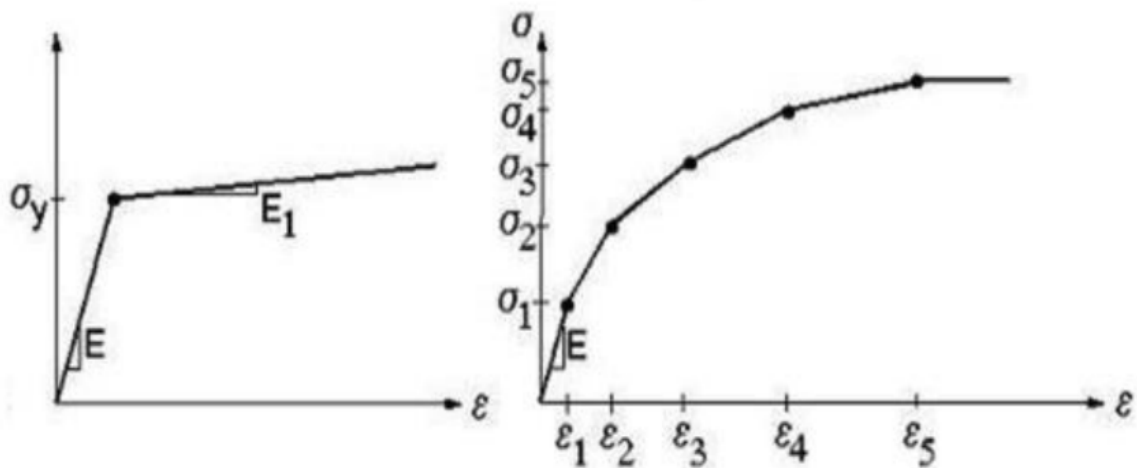


Рис. 2.9. Двухлинейная (слева) и мультилинейная (справа) диаграмма деформирования

Для задания наиболее оптимальной с нашей точки зрения (в случае стальной арматуры с физической площадкой текучести) модели материала (*BilinearIsotropicHardening*) используются следующие 4 основных параметра:

Таблица № 2.3

№	Наименование параметра	Пояснение к параметру	Ед. изм.
1	Модуль упругости стали (<i>Young`sModulus</i>)	$E = (1,95 \div 2,06) \cdot 10^5$	МПа
2	Коэффициент поперечной деформации (<i>Poisson`sRatio</i>)	Значение коэффициента Пуассона для стали – $\mu = 0,3$	-
3	Напряжения в арматуре, соответствующие площадке текучести (<i>YieldStrength</i>)	Значение расчетного сопротивления арматуры $R_s (R_{sn})$	МПа
4	Касательный модуль деформации на участке упрочнения стали (<i>TangentModulus</i>)	Определяется по формуле: $E_{tan} = \frac{(\sigma_{вр} - R_s)}{\varepsilon_{s2} - R_s/E}$	МПа

Таким образом, для полного описания модели арматуры в ПК «ANSYSWorkbench» для расчета твердотельных моделей достаточно использования 4 основных параметров.

3. Верификация нелинейной модели бетона

В практических и исследовательских численных расчетах твердотельных моделей железобетонных конструкций для каждого конкретного вида бетона рекомендуется выполнить верификацию принятой модели на стандартных образцах с целью проверки предпосылок и расчетных параметров модели.

В практических (инженерных) расчетах параметры бетона рекомендуется принимать на основании нормативного документа [54] по принятому классу по прочности B в соответствии с рассматриваемой группой предельных состояний.

В исследовательских численных расчетах чаще всего пользуются средними значениями прочности бетона на сжатие и растяжение. Переход от принятого класса бетона по прочности и наоборот производят по известным соотношениям:

Средняя кубиковая (марочная) прочность бетона на сжатие, соответствующая конкретному классу (B), при стандартной доверительной вероятности 0.95 соответствует значению:

$$\bar{R} = \frac{10 \cdot B}{0,778}, (3.1)$$

Теоретическая призмная прочность бетона на сжатие, соответствующая средней кубиковой прочности определяется по формуле:

$$\bar{R}_b = (0,77 - 0,00125\bar{R})\bar{R}; (3.2)$$

Теоретическая прочность бетона на растяжение, соответствующая средней кубиковой прочности бетона:

$$\bar{R}_{bt} = \frac{5\bar{R}}{45 + \bar{R}}; (3.3)$$

Теоретический начальный модуль упругости бетона, соответствующий средней кубиковой прочности бетона:

$$\bar{E}_b = \frac{55000\bar{R}}{27 + \bar{R}}; (3.3)$$

Остальные деформационные характеристики для бетона рекомендуется принимать в соответствии с приложением Г [54].

3.1. Верификация модели бетона на стандартных образцах

Для первоначальной верификации модели бетона, используемой для численного исследования железобетонных конструкций рекомендуется произвести два верификационных расчета для каждого принятого вида бетона:

- верификационный расчет кубиковой прочности бетона;
- верификационный расчет призмной прочности бетона.

Для данных верификационных расчетов используется стандартный образец бетонного куба размерами 150x150x150 мм и стандартный образец призмы размерами 150x150x600(h)мм, применяемые при оценках прочности бетона согласно действующим нормативным документам.

Суть верификационного расчета заключается в том, чтобы моделировать лабораторное испытание стандартного образца в условиях нагружения прессом, что обеспечивается заданием в виде нагрузочного эффекта перемещения нагрузочной плиты прессы. При этом по результатам верификационного расчета контролируется максимальная опорная реакция, получаемая на плиту прессы при испытании образца, которая должна соответствовать прочности бетона в принятой модели.

Общий вид конечно-элементной модели стандартного кубического образца бетона приведен на рис. 3.1, призматического образца бетона - на рис. 3.2.

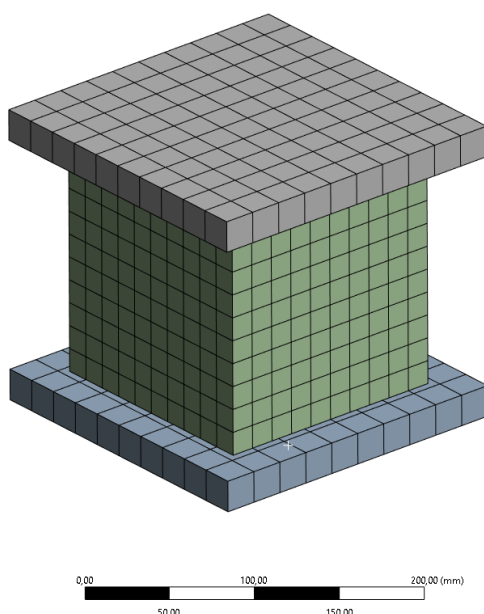


Рис. 3.1. Твердотельная конечно-элементная модель стандартного бетонного кубического образца 150x150x150 мм

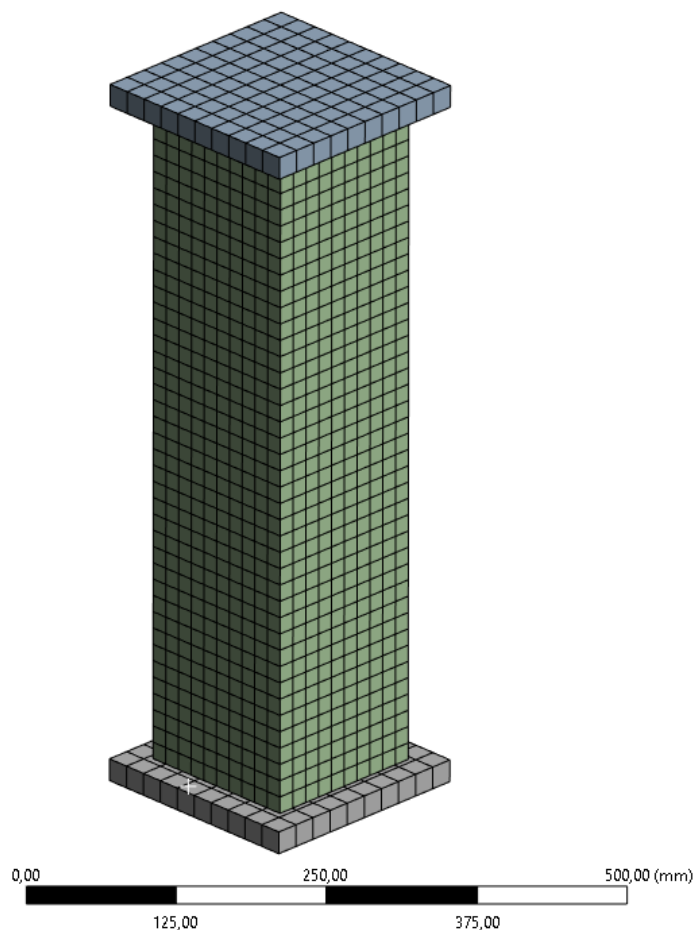


Рис. 3.2. Твердотельная конечно-элементная модель стандартного призматического бетонного образца 150x150x600(h) мм

Размер ребер конечных элементов принят равным 15 мм, тип сетки конечных элементов – гексаэдральный.

Для выполнения верификационных расчетов стандартных кубического и призматического образца бетона были заданы дополнительные нелинейные контакты трения «бетон-сталь» на контактах верхняя и нижняя грань образцов с плитами пресса со значением коэффициента трения, равного 0,4.

Нагрузочный эффект задавался путем вертикального перемещения верхней плиты пресса. Нижняя грань нижней плиты фиксируется от вертикальных и возможных горизонтальных смещений.

В таблице 2.1 представлены вычисленные в соответствии с разделом 1 параметры модели бетона для выполнения верификационного расчета на стандартных образцах.

Таблица 3.1. Характеристики бетона стандартных образцов по модели Ментери-Виллама и по экспоненциальному закону разупрочнения HSD6

№ п/п	Наименование параметра модели бетона	Значение параметра	Ед. изм.
1	Предельная призмная прочность бетона - R_b	29	МПа
2	Предельная прочность бетона на растяжение - R_{bt}	2,19	МПа
3	Предельная прочность бетона при двухосном сжатии- $1,2R_b$	34,8	МПа
4	Модуль упругости бетона	34946	МПа
5	Начальный коэффициент поперечных деформаций	0,2	-
6	Угол дилатации бетона	14	град.
7	Пластические относительные деформации бетона в вершине диаграммы " $\sigma - \varepsilon$ "	0,001834	мм/мм
8	Пластические относительные деформации бетона в начале экспоненциального участка диаграммы " $\sigma - \varepsilon$ "	0,003254	мм/мм
9	Относительные сжимающие напряжения в бетоне в момент образования пластических деформаций	0,2	МПа/МПа
10	Относительные сжимающие напряжения в бетоне в начале экспоненциального участка диаграммы " $\sigma - \varepsilon$ "	0,85	МПа/МПа
11	Остаточные относительные сжимающие напряжения в бетоне в стадии разрушения	0,2	МПа/МПа
12	Энергия разрушения, отнесенной к единичной площадке, при трещинообразовании	253	Н/м
13	Остаточные относительные растягивающие напряжения в бетоне в стадии трещинообразования	0,01	МПа/МПа

Результаты верификационного расчета стандартных образцов

На рис. 3.3 – рис. 3.4 представлены общие деформированные схемы образцов с вертикальными перемещениями в момент перед разрушением. Как видно из рис. 3.3 наблюдается известная форма деформирования в виде «бочки» в процессе нагружения кубического образца, связанная с трением между плитой пресса и верхней и нижней гранью бетона.

На рис. 3.5 – рис. 3.6 представлено распределение полных (совокупность упругих и пластических) относительных деформаций бетона в момент разрушения образцов. Значения предельных полных деформаций бетона по результатам расчетов достаточно близки к предельному значению 0,0035, приведенному в [54].

На рис. 3.7 – рис. 3.8 представлено распределение главных сжимающих напряжений в бетоне в момент разрушения образцов.

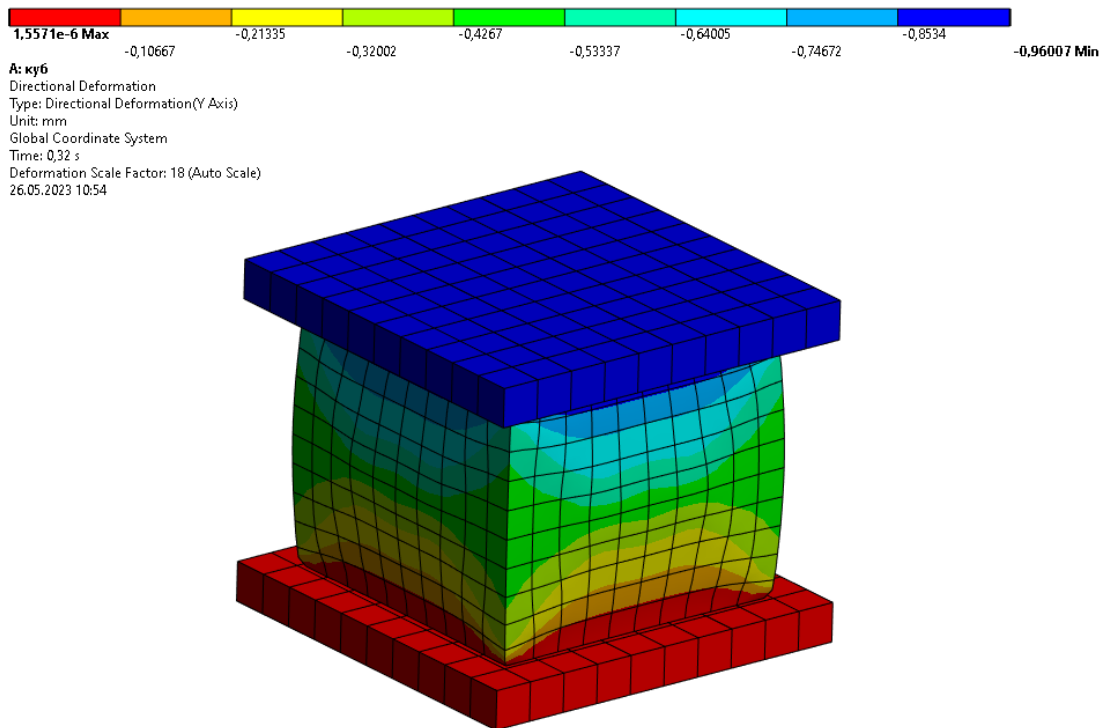


Рис. 3.3. Деформированная схема кубического образца (масштаб 1:20) и вертикальные перемещения в момент разрушения, мм

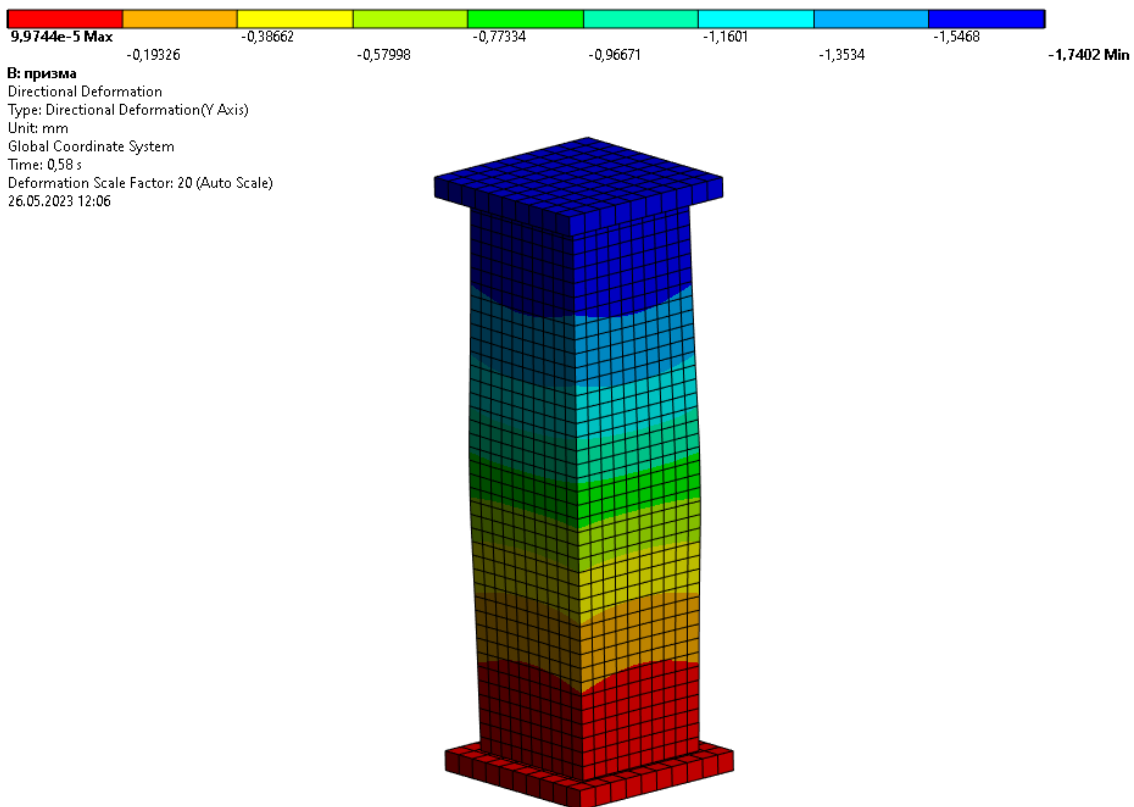


Рис. 3.4. Деформированная схема призматического образца (масштаб 1:20) и вертикальные перемещения в момент разрушения, мм

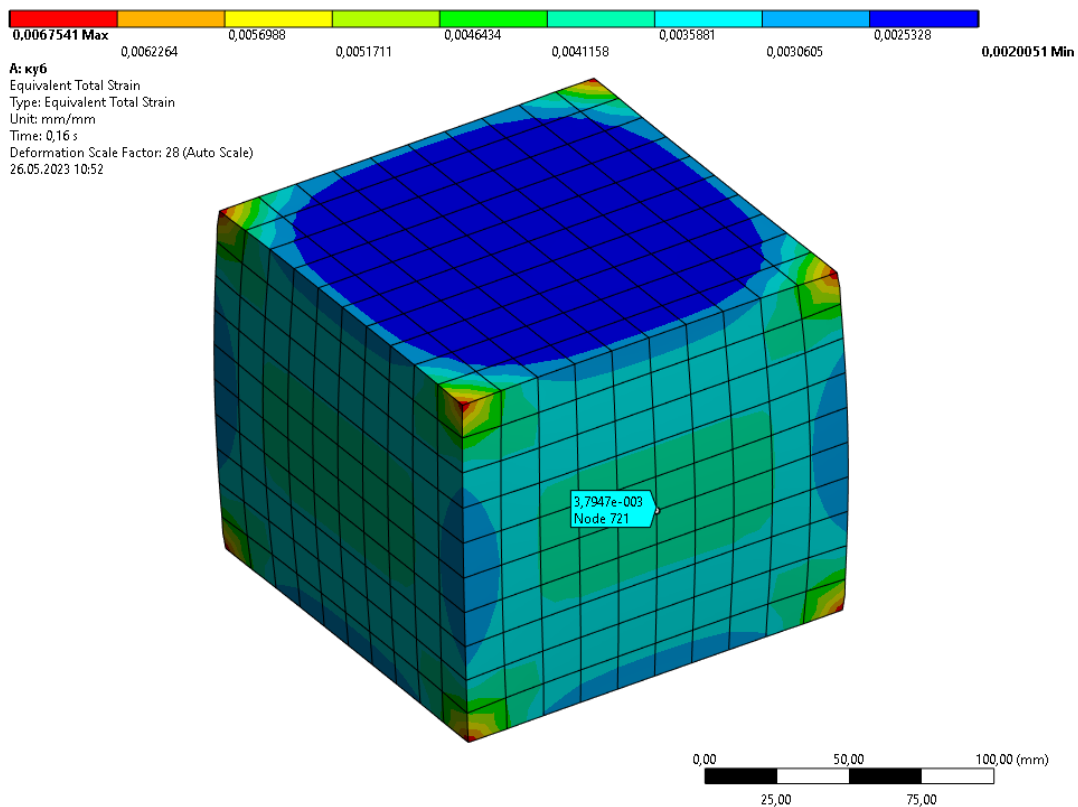


Рис. 3.5. Полные относительные деформации бетона в стадии разрушения кубического образца ($\epsilon_{b_{max}} = 0,00379$), мм/мм

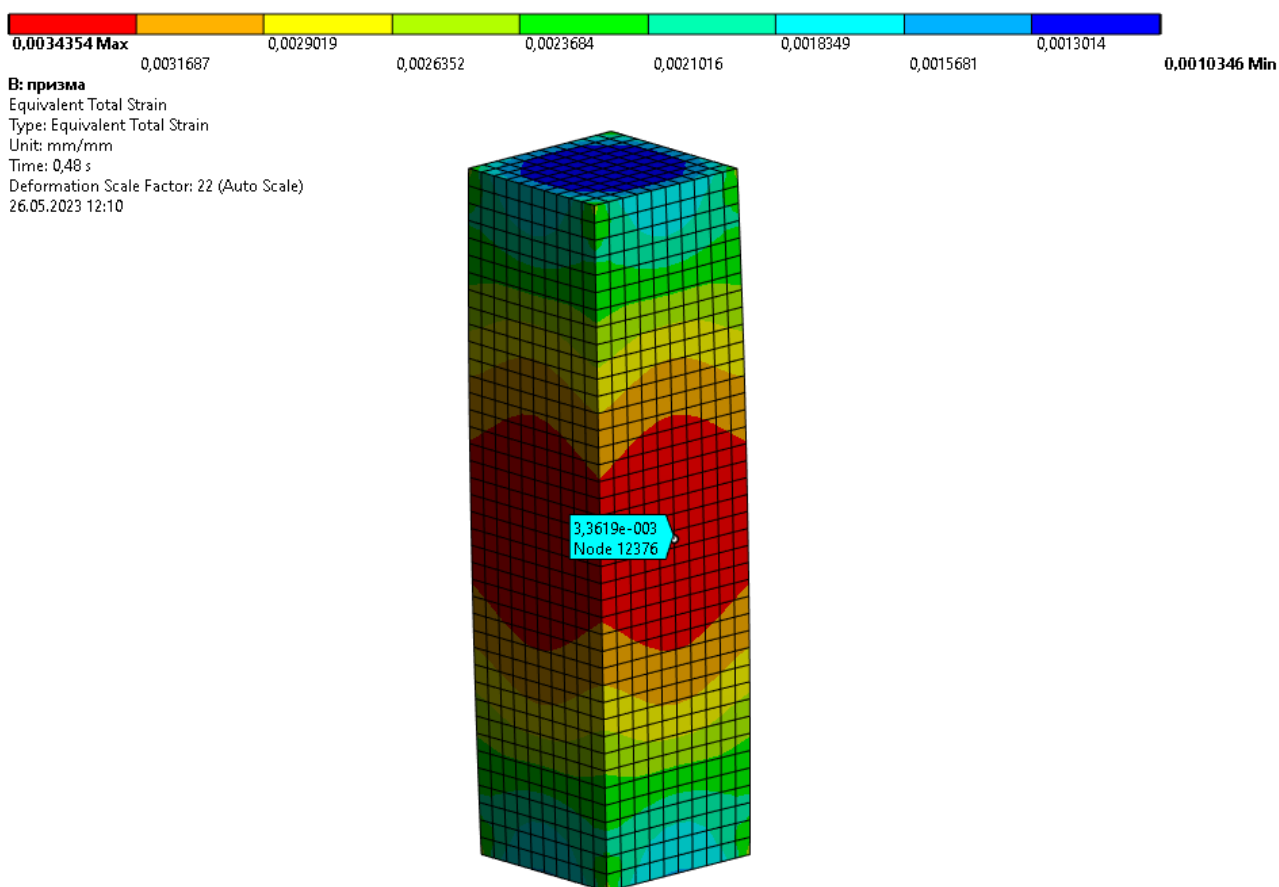


Рис. 3.6. Полные относительные деформации бетона в стадии разрушения призматического образца ($\epsilon_{b_{max}} = 0,00336$), мм/мм

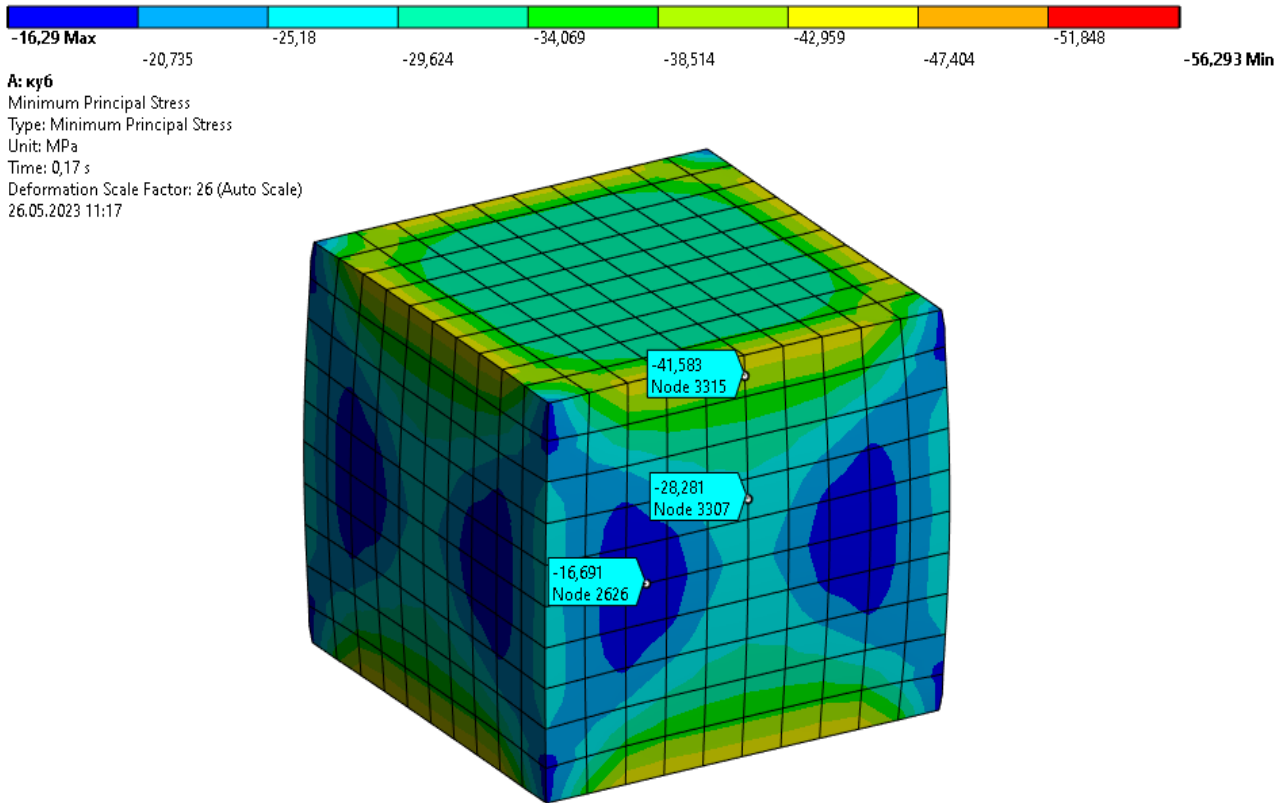


Рис. 3.7. Главные сжимающие напряжения в кубическом образце в стадии разрушения, МПа

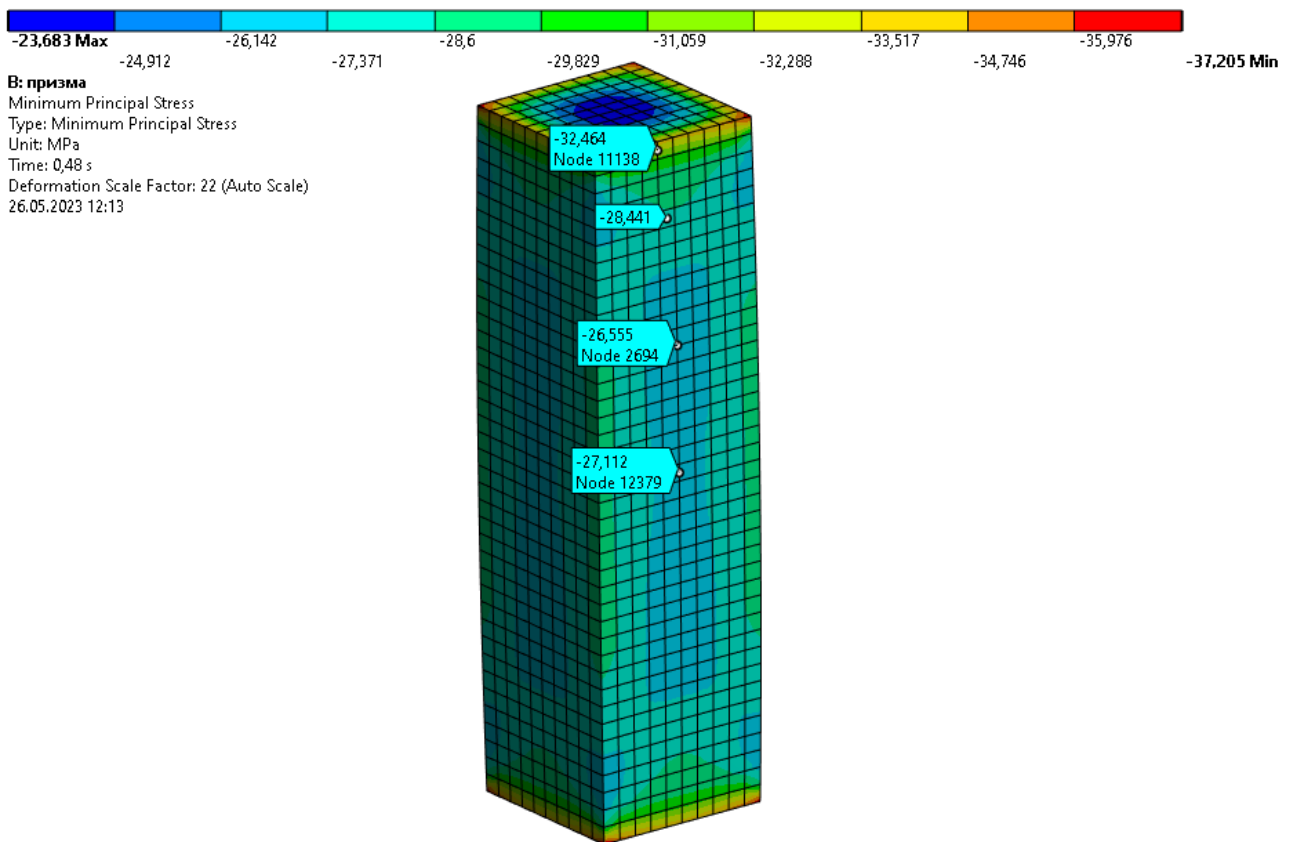


Рис. 3.8. Главные сжимающие напряжения в призматическом образце в стадии разрушения, МПа

Как видно из рис. 3.7 наблюдается известный эффект «клина», проявляющегося вследствие дополнительного обжатия кубического образца за счет трения «бетон-сталь» на границе «плита пресса- верхняя/нижняя грань образца».

Максимальные и минимальные значения на шкале результатов на рис. 3.7-3.8 соответствуют многоосному напряженно-деформированному состоянию КЭ в зоне дополнительного обжатия, поэтому выведены дополнительные значения факторов для зоны, наиболее соответствующей одноосному сжатию, на которые необходимо ориентироваться при верификации модели.

На рис. 3.9 – рис. 3.10 представлены полученные по результатам расчетов графики «нагрузка-перемещение» для каждого бетонного образца. В общем виде графики соответствуют диаграмме деформирования бетона при одноосном напряженно-деформированном состоянии.

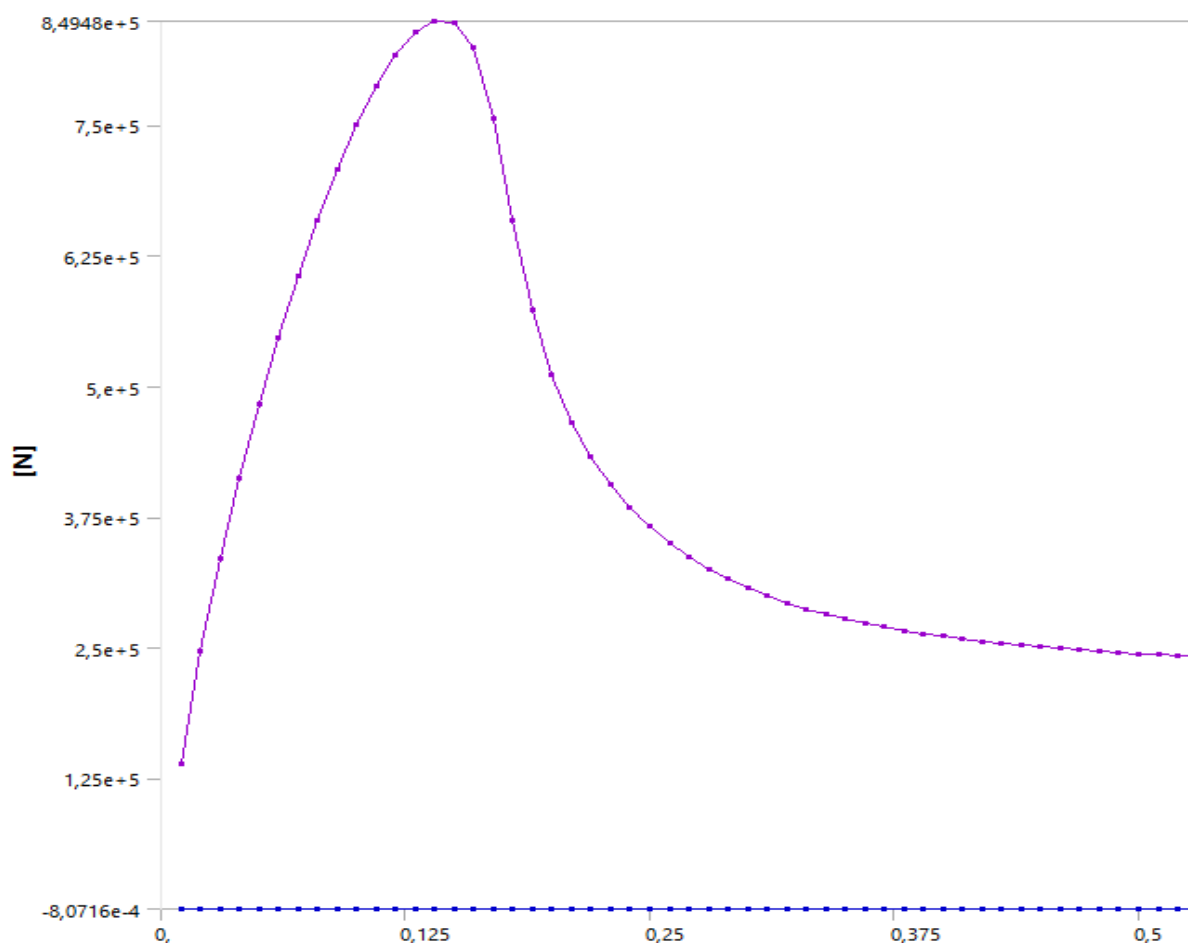


Рис. 3.9.График «нагрузка-относительное перемещение» для кубического бетонного образца

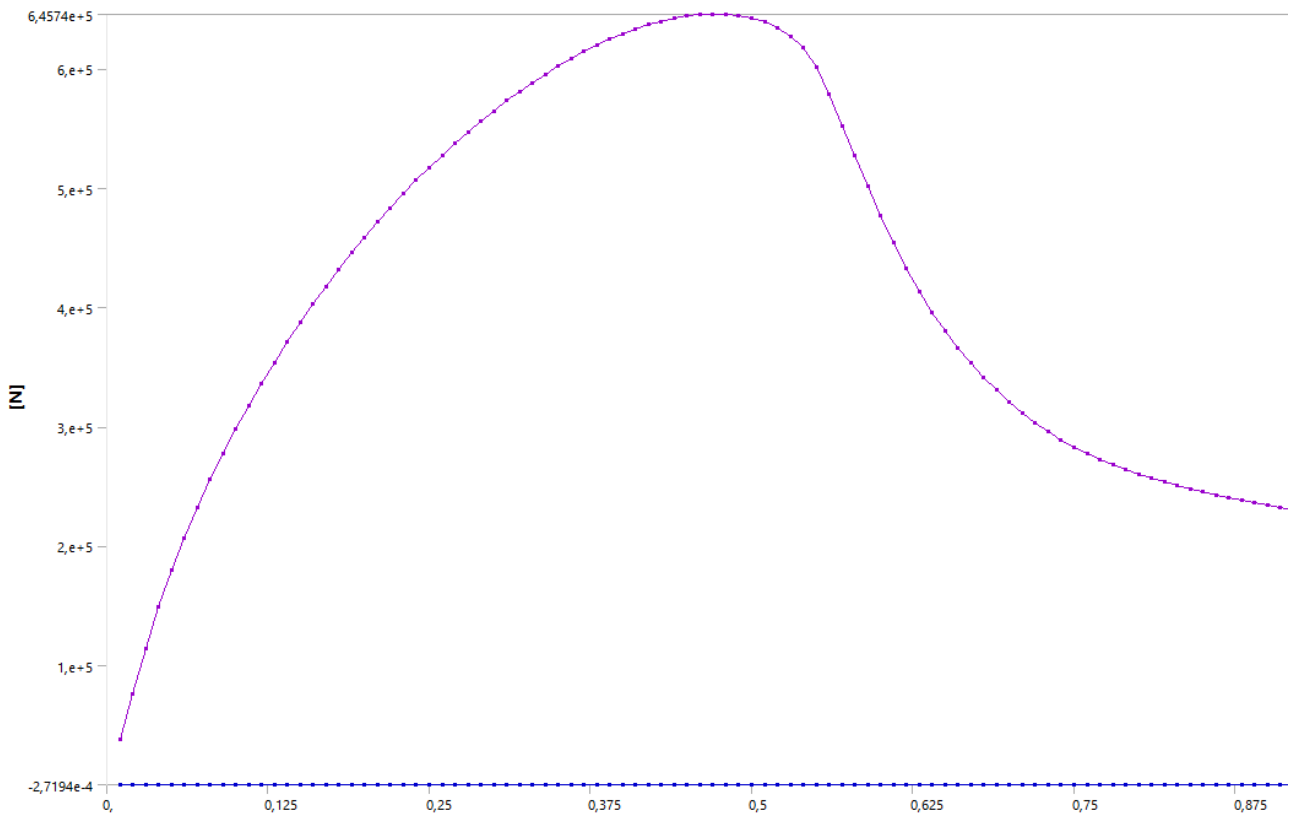


Рис. 3.10.График «нагрузка-относительное перемещение»
для призматического бетонного образца

Максимальная опорная реакция для кубического образца соответствует значению 849,48 кН (см. рис. 3.9).

Значение полученной по результатам расчета кубиковой прочности бетона на основании максимальной опорной реакции на плите пресса составляет:

$$\bar{R} = \frac{849,48 \cdot 10^3}{150 \cdot 150} = 37,75 \text{ МПа};$$

Значение теоретической кубической прочности бетона составляет:

$$\overline{R}_{\text{теор}} = \frac{29}{0,7653} = 37,89 \text{ МПа};$$

Погрешность между полученной в модели кубиковой прочностью и теоретической прочностью бетона составляет:

$$\Delta_{\text{cube}} = \frac{37,89 - 37,75}{37,89} * 100\% = 0,37 \text{ \%}.$$

Погрешность определения значения кубиковой прочности бетона в модели не превышает принятую погрешность сходимости по силовым реакциям.

Максимальная опорная реакция для призматического образца соответствует значению 645,74 кН (см. рис. 2.9).

Значение полученной по результатам расчета призмной прочности бетона на основании максимальной опорной реакции на плите прессы составляет:

$$\bar{R}_b = \frac{645,74 \cdot 10^3}{150 \cdot 150} = 28,7 \text{ МПа};$$

Погрешность между полученной в модели призмной прочностью и принятой в параметрах модели прочностью бетона составляет:

$$\Delta_{prism} = \frac{29,0 - 28,7}{29,0} * 100\% = 1,03 \text{ \%}.$$

Погрешность определения значения призмной прочности бетона в модели не превышает принятую погрешность сходимости по силовым реакциям.

Небольшое расхождение результатов с теоретическими связано с накоплением погрешности аппроксимирующих функций для конечных элементов при данном размере конечного элемента [9] (дальнейшее уменьшение размера конечного элемента противоречит сути бетона как материала с учетом размера заполнителя).

Таким образом, по результатам двух верификационных расчетов кубической и призматической прочности бетона можно сделать вывод, что используемая в дальнейшем численном моделировании теория прочности и пластичности бетона Мендери-Виллама с экспоненциальным законом разупрочнения (HSD6) достаточно точно описывает поведение бетона в сравнении с натурными испытаниями по раздавливанию стандартных образцов кубов и призм.

Результаты верификации модели также показали, что используемая модель прочности бетона достаточно точно соответствует положениям нормативного документа СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» [54].

3.2. Верификация модели бетона при сложном напряженно-деформированном состоянии с учетом наличия арматуры

Сцелью верификации принятой модели бетона при сложном напряженно-деформированном состоянии с учетом, в том числе, имеющейся арматуры воспроизведем эксперимент по испытанию плоских образцов, подверженных действию местной сжимающей нагрузки с косвенной арматурой и без нее [19-22, 78, 79].

Геометрические параметры условно плоских бетонных образцов, механические свойства бетона и косвенной арматуры, а также условия нагружения приняты в соответствии с экспериментом, описанным в диссертации [19].

Всего в рамках численного верификационного анализа рассмотрено 4 образца (см. рис. 3.11), отличающихся между собой высотой образцов, шириной опирания и наличием косвенного армирования:

- *образец № 1*: высота $H = 400$ мм, ширина грузовой площадки и опорной площадки $L_{loc} = 60$ мм, косвенное армирование - отсутствует;

- *образец № 2*: высота $H = 400$ мм, ширина грузовой и опорной площадки $L_{loc} = 60$ мм, косвенное армирование – стержни диаметром 8 мм кл. А400 с шагом 80 мм по высоте образца;

- *образец № 3*: высота $H = 600$ мм, ширина грузовой площадки $L_{loc} = 60$ мм, ширина опорной площадки больше ширины образца, косвенное армирование – отсутствует;

- *образец № 4*: высота $H = 600$ мм, ширина грузовой площадки $L_{loc} = 60$ мм, ширина опорной площадки больше ширины образца, косвенное армирование – стержни диаметром 8 мм кл. А400 с шагом 80 мм по высоте образца.

Остальные параметры численно исследованных образцов (толщина и ширина образцов, призмная прочность бетона на сжатие, прочность бетона на растяжение, начальный модуль упругости бетона) одинаковы, получены на основании проведенных лабораторных испытаний и представлены ниже:

- толщина образцов – $B = 50$ мм;
- ширина образцов – $L = 300$ мм;
- средняя призмная прочность бетона на сжатие $R_b = 38,8$ МПа;
- средняя прочность бетона на растяжение $R_{bt} = 2,85$ МПа;

- начальный модуль упругости бетона $E_{b0} = 37\,000\text{ МПа}$.

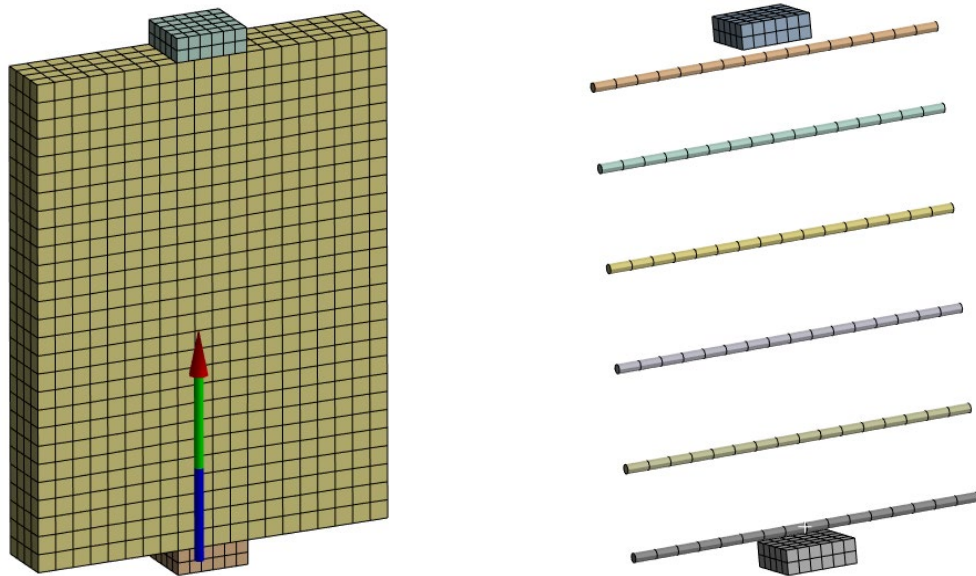


Рис. 3.11. Конечно-элементная модель плоского образца № 2

Density	2,3e-06 kg/mm ³
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	35460 MPa
Poisson's Ratio	0,20000
Bulk Modulus	19700 MPa
Shear Modulus	14775 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1,4e-05 1/°C
▼ Menetrey-Willam	
▼ Menetrey-Willam Base	
Uniaxial Compressive Strength	38,880 MPa
Uniaxial Tensile Strength	2,8500 MPa
Biaxial Compressive Strength	58,320 MPa
Dilatancy Angle	35,000 degree
▼ Softening	
Active Table	Exponential
Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength	0,0018810
Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,0030210
Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening	0,20000
Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,85000
Residual Compressive Relative Stress	0,20000
Mode 1 Area Specific Fracture Energy	0,43000 N/mm
Residual Tensile Relative Stress	0,00100000

Рис. 3.12. Заданные параметры для модели бетона в ПК «ANSYS Mechanical»

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Mod...	
8	Young's Modulus	2E+05	MPa
9	Poisson's Ratio	0,3	
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
12	Bilinear Isotropic Hardening		
13	Active Table	Plastic	
14	Yield Strength	390	MPa
15	Tangent Modulus	1450	MPa
16	Strain-Life Parameters		
24	S-N Curve	Tabular	
28	Tensile Yield Strength	390	MPa
29	Compressive Yield Strength	390	MPa
30	Tensile Ultimate Strength	590	MPa
31	Compressive Ultimate Strength	590	MPa

Рис. 3.13. Заданные параметры для модели арматурной стали кл. А400
в ПК «ANSYS Mechanical»

Основные параметры модели бетона и арматуры, заданные в программном комплексе «ANSYS» для всех исследуемых образцов, приведены на рис. 3.12 и рис. 3.13 соответственно.

Остальной процесс моделирования и задания параметров для нелинейного расчета аналогичен разделам 3-7 ниже, в связи с чем в верификационном расчете опускается.

На рис. 3.14. представлена сходимость решения при нелинейном решении задачи для образца № 1.

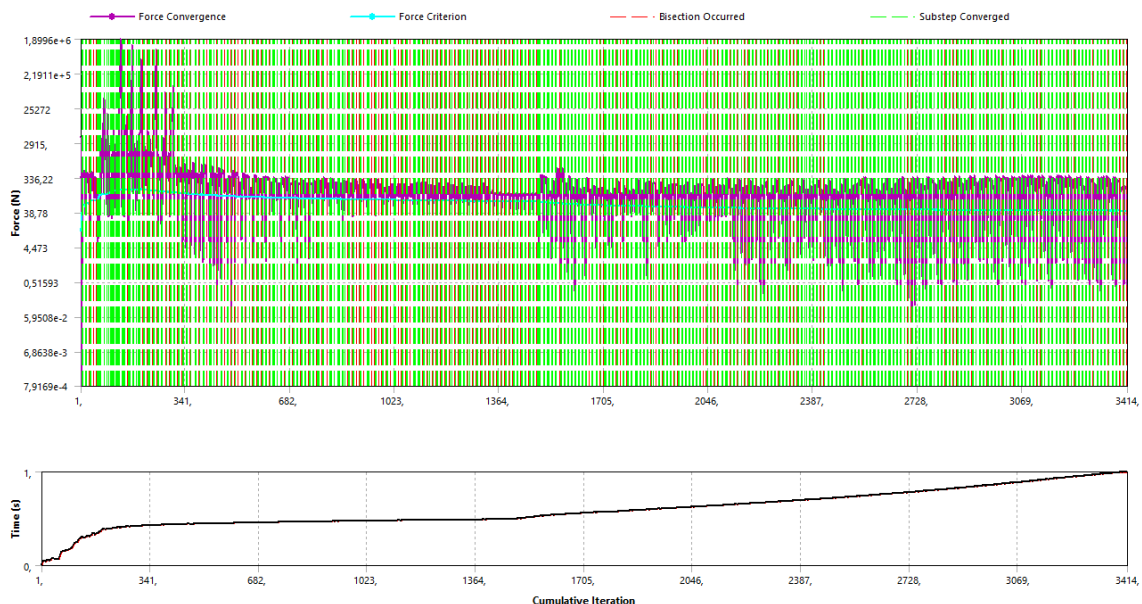


Рис. 3.14. Графическое отображение процесса сходимости итерационного решения нелинейной задачи по силовым реакциям для образца № 1

На рис. 3.15 представлены графики зависимости отпорной реакции образцов относительно перемещения верхней грузовой пластины.

Нагрузка, Н

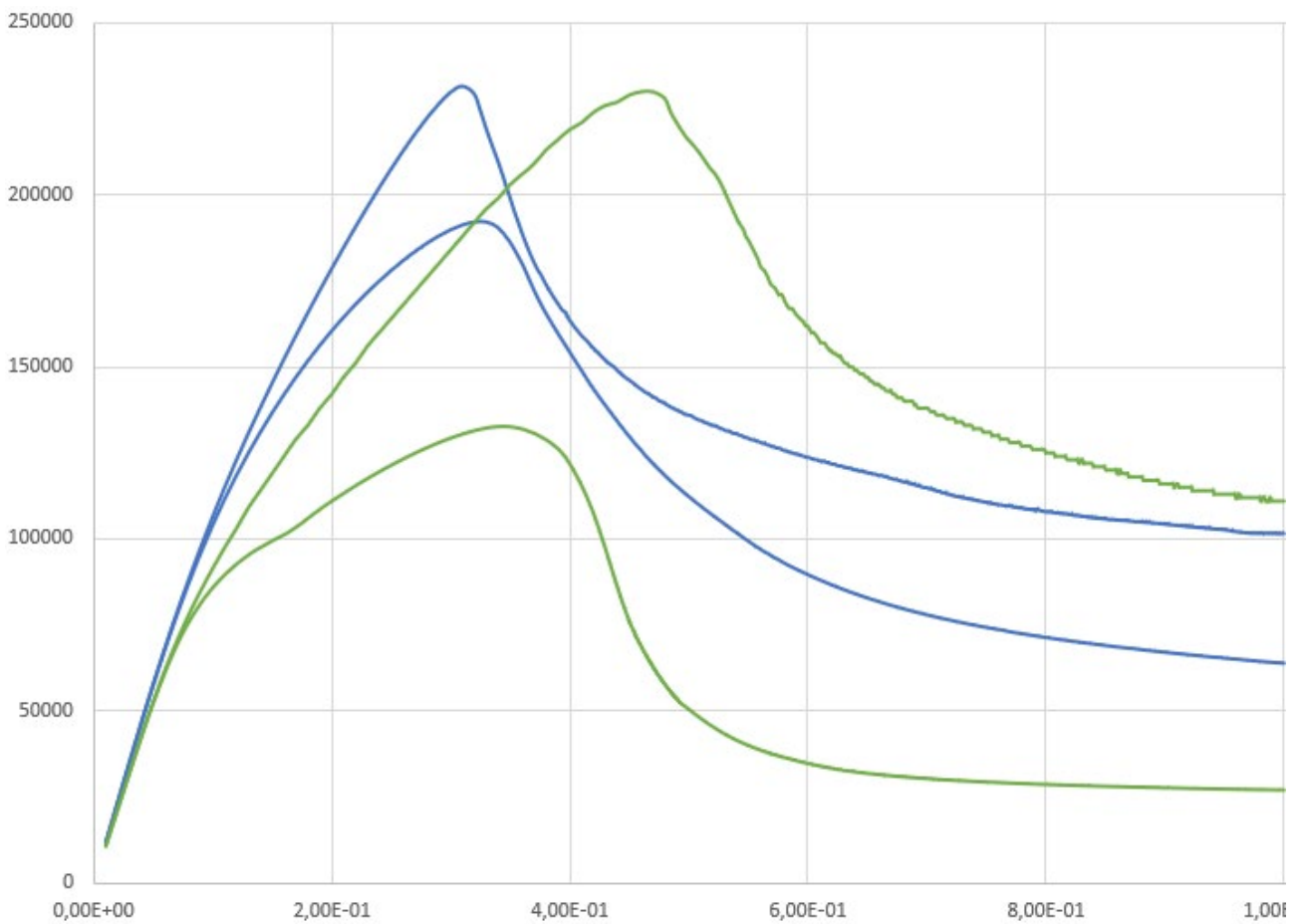
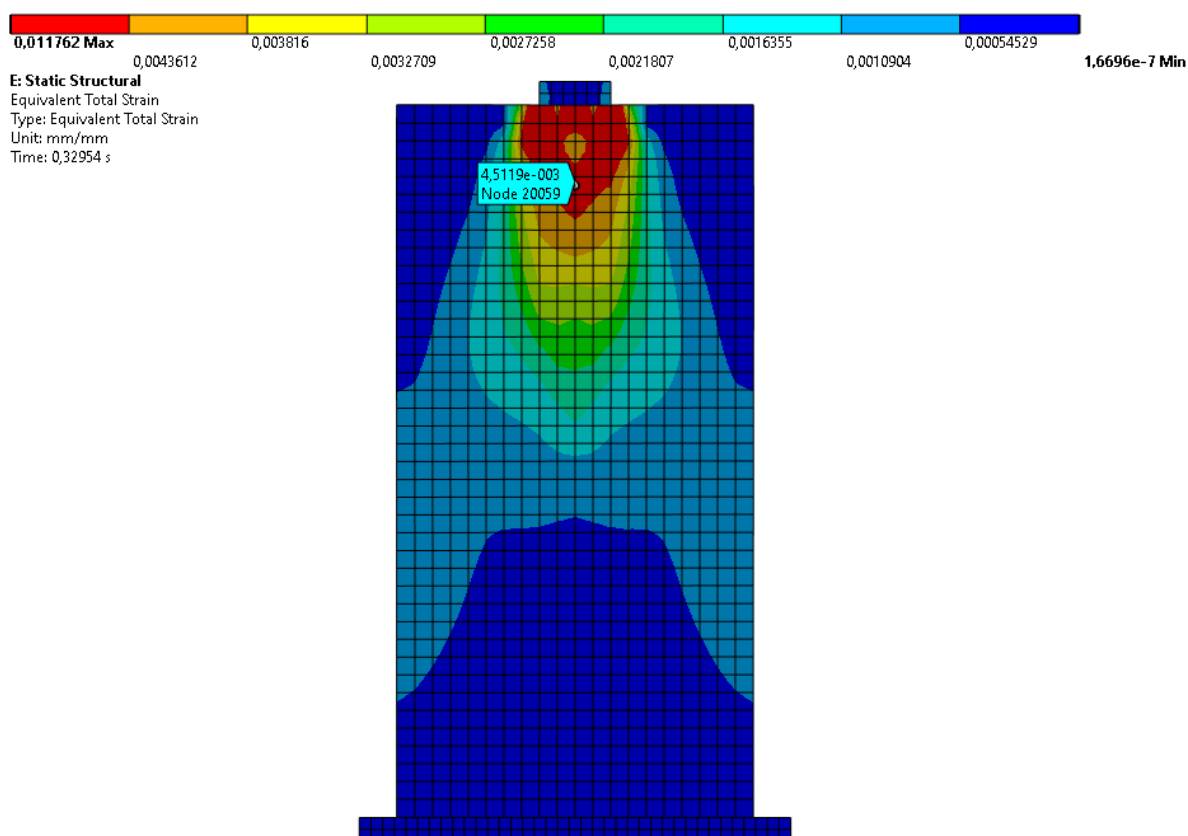


Рис. 3.15.Графики «нагрузка- перемещениегрузовой пластины» для образцов (зеленые кривые – образец № 1 (ниже) и № 2 (выше), синие кривые – образец № 3 (ниже) и № 4 (выше))

На рис. 3.16 представлено распределение полных эквивалентных деформаций в бетоне в момент достижения несущей способности образцов № 1 и № 3.

На рис. 3.17 представлено распределение напряжений в косвенной арматуре при разрушении образцов № 2 и № 4. Разрушение образцов происходит только по достижению напряжениями в косвенной арматуре предела текучести стали.



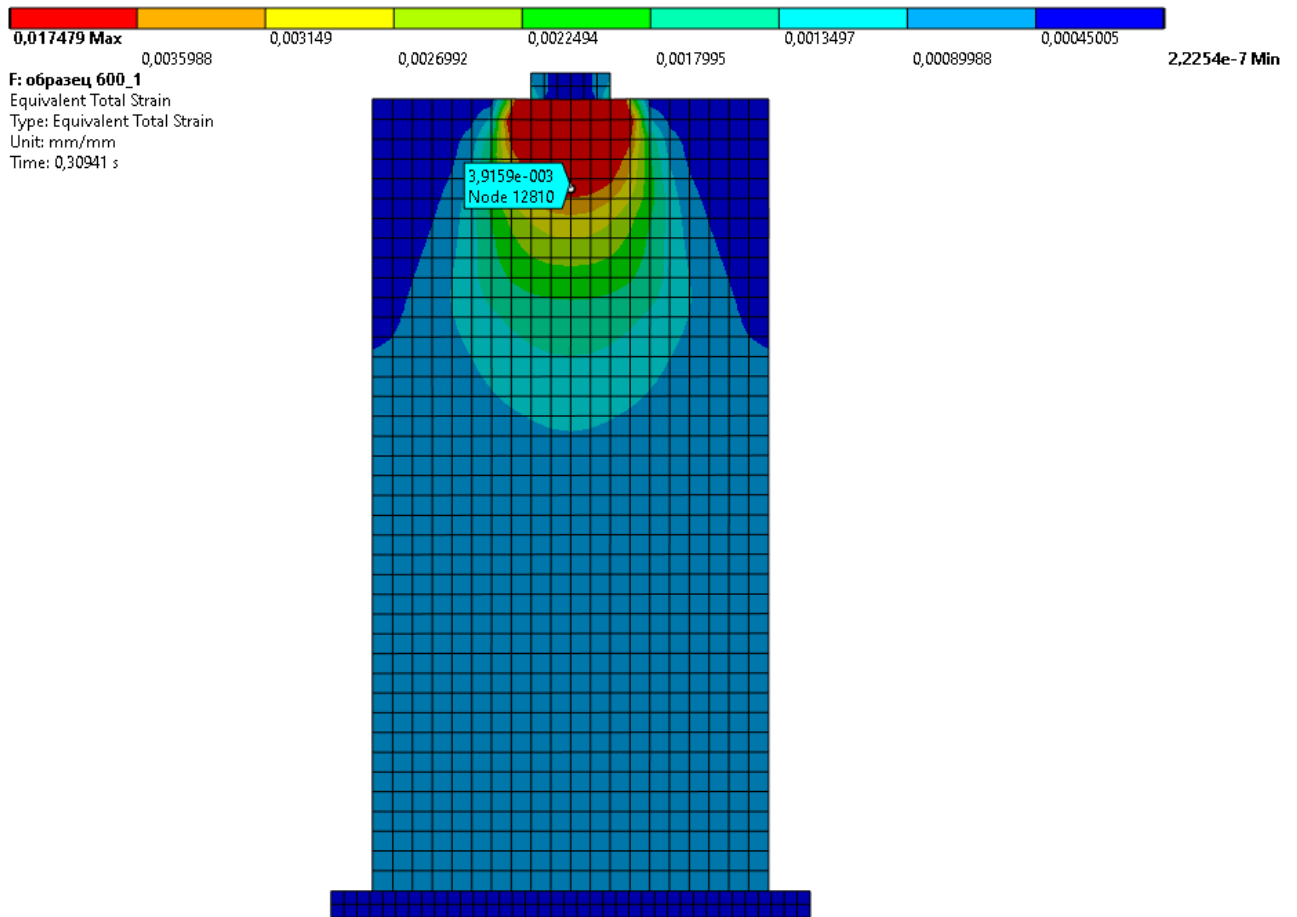
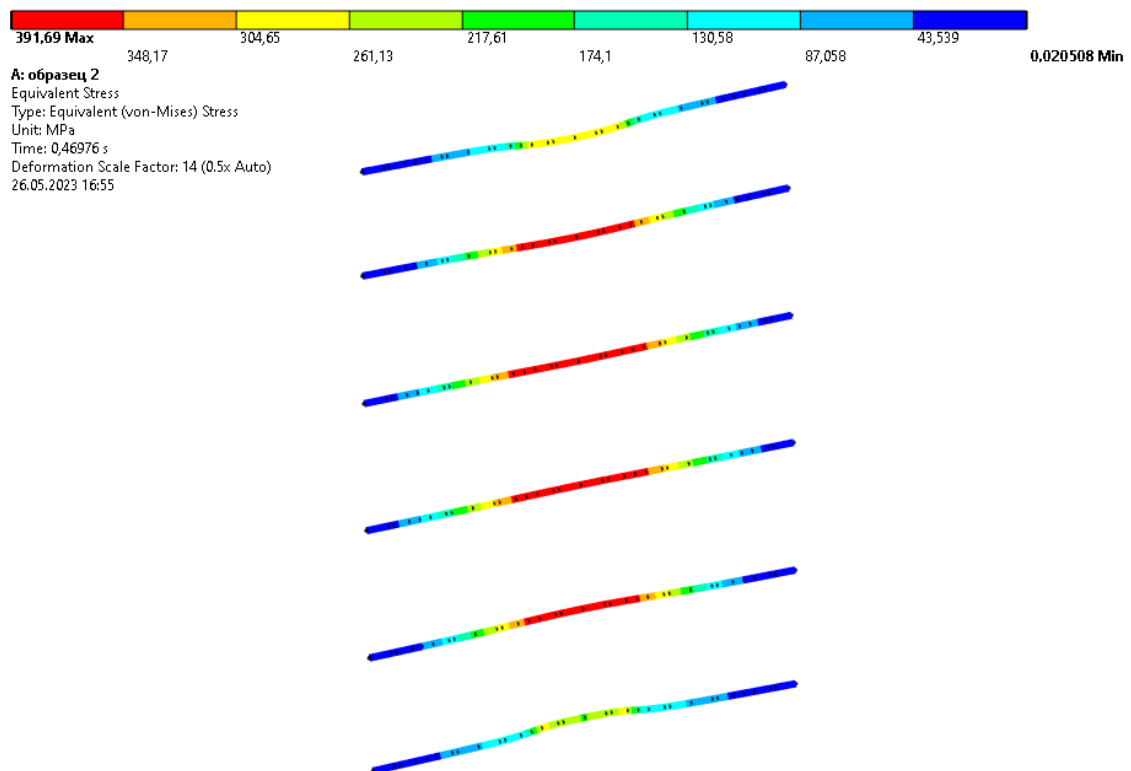


Рис. 2.16. Распределение полных относительных деформаций в бетоне для образца № 1 (сверху) и образца № 3 (снизу) в момент достижения F_{ult}



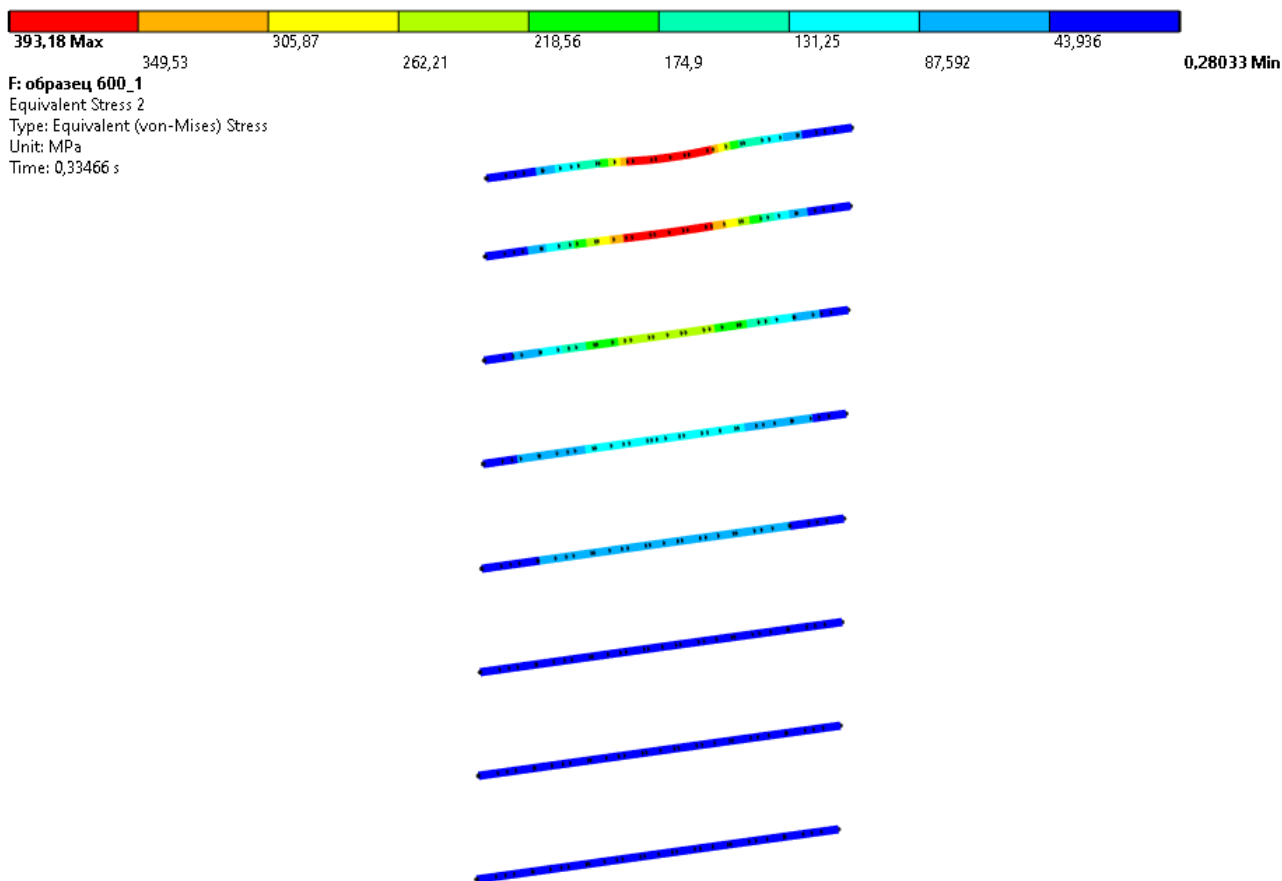
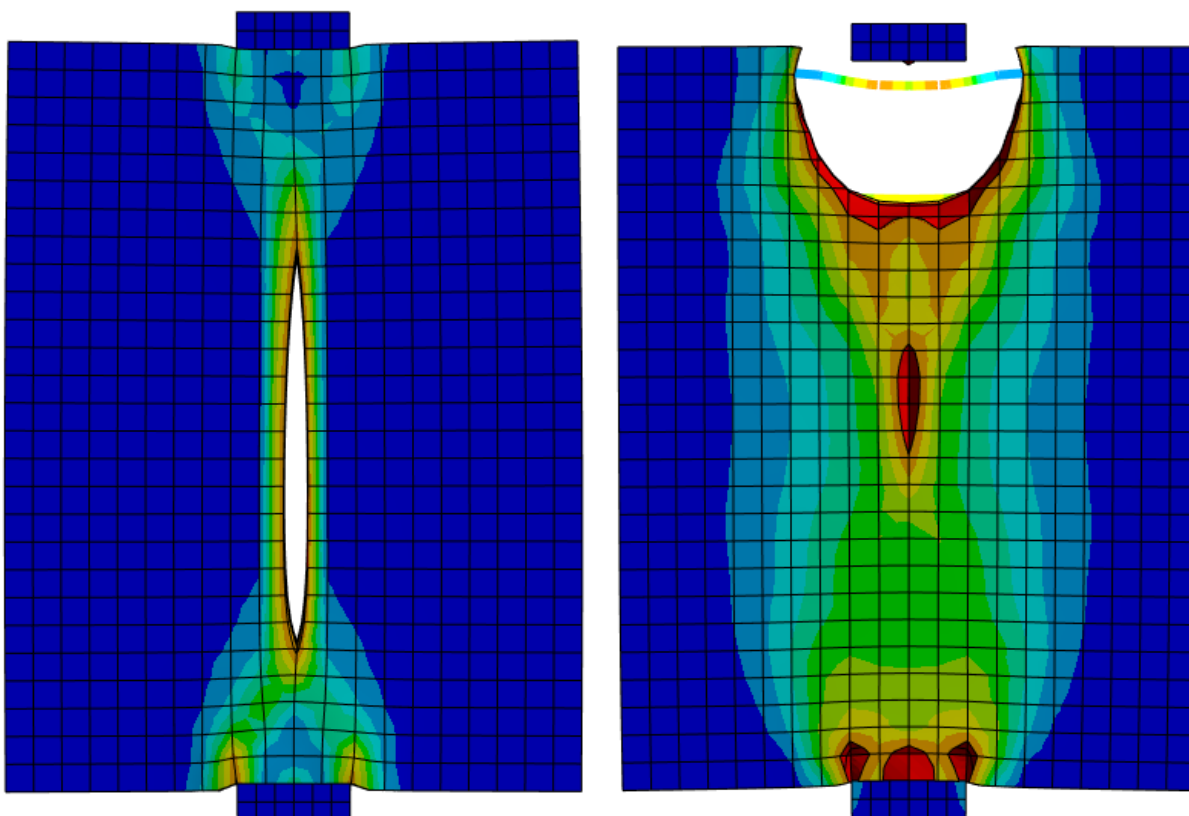


Рис. 2.17. Распределение напряжений в косвенной арматуре для образца № 2 (сверху) и образца № 4 (снизу) – достигнута площадка текучести



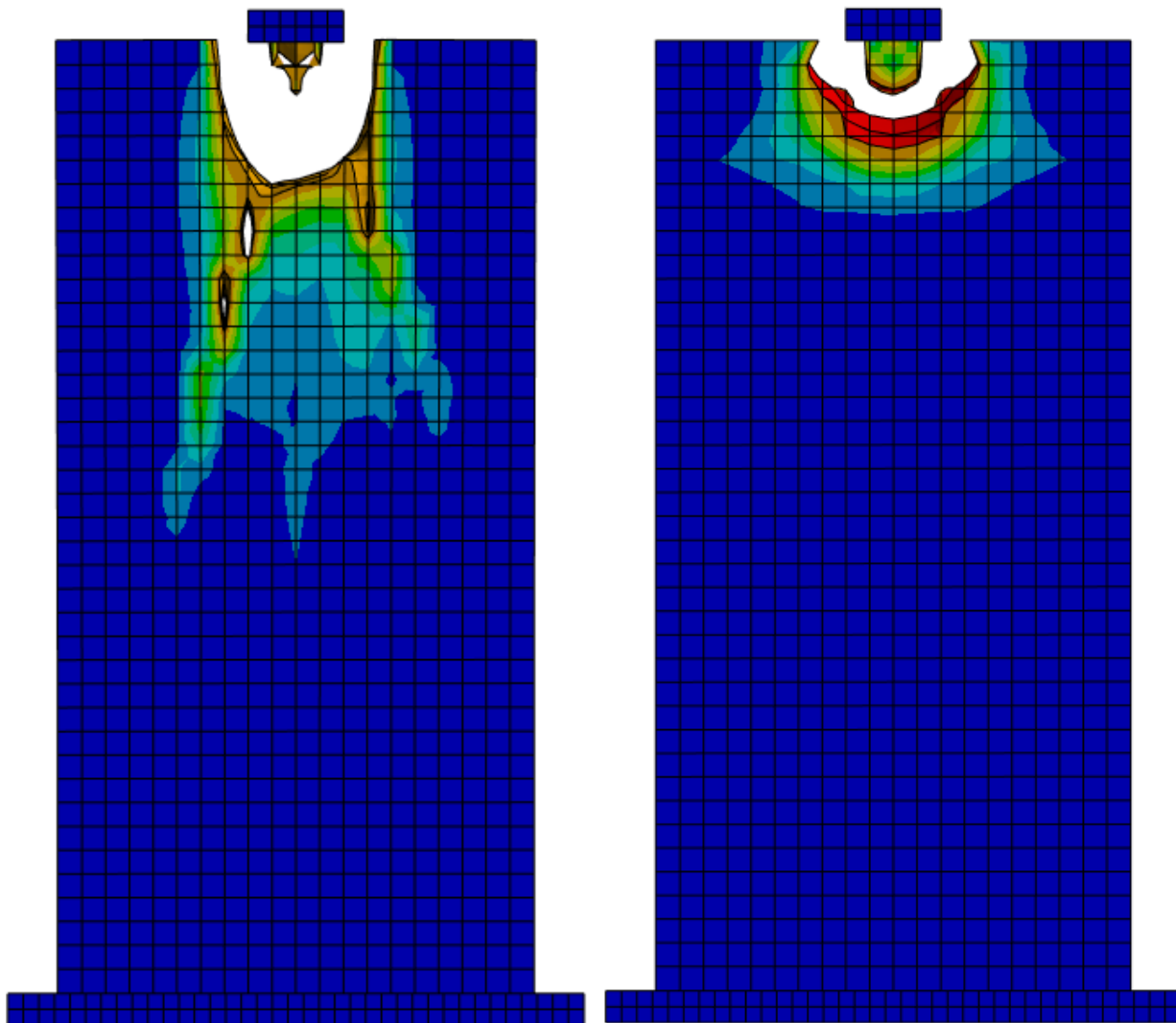


Рис. 2.18. Деформированные схемы с характером разрушения образцов № 1-4
 Как видно из представленных по результатам численных верификационных расчетов схем разрушения на рис. 3.18, характер разрушения образцов № 1 (сверху слева) и № 3 (снизу слева) качественно различается между собой и хорошо соответствует экспериментально полученным схемам разрушения в исследовании[19].

Для образца № 1 реализуется механизм разрушения в виде раскалывания в средней части по ширине образца. Для аналогичного образца № 2, но при наличии косвенной арматуры, реализуется механизм разрушения бетона от местных запредельных сжимающих напряжений в зоне «клина» непосредственно под грузовой площадкой при достижении в арматуре предела текучести стали. При этом наличие косвенной арматуры в данном случае дает прирост несущей способности порядка 70 % (см. рис. 3.15).

Для образца № 3 реализуется классический механизм разрушения от раздробления бетона под грузовой площадкой (разрушение от местного сжатия)

с последующим разделением образца по вертикали образуемыми магистральными трещинами. Характер разрушения образца № 4 аналогичен характеру разрушения образца № 2. Приrost несущей способности образца № 4 в сравнении с образцом № 3 составил 20 %.

Несущая способность образца № 2 и образца № 4 одинакова. Таким образом, для этих образцов (при наличии косвенной арматуры) реализуется механизм разрушения от расклинивания бетона при местном сжатии (см. рис. 3.16-3.18).

Погрешность в вычислении предельной нагрузки, воспринимаемой образцами в сравнении с экспериментальными значениями предельной несущей способности[19], составила (для образца № 1):

$$\Delta_1 = (133 - 132,7)/133 \cdot 100\% = 0,23 \%$$

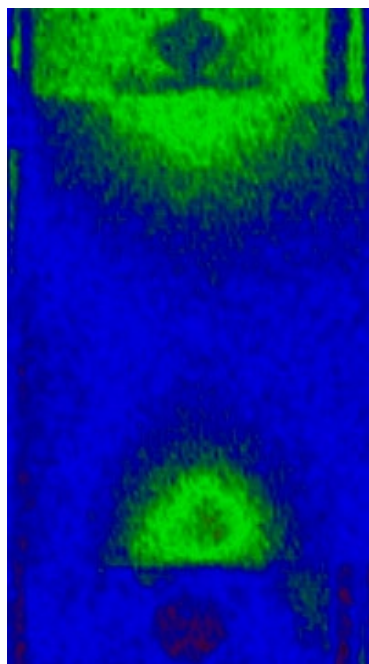


Рис. 3.19. Термограммы плоских элементов с соотношением размеров $H/L = 1,33$

Способ определения зон концентрации напряжений[19-22, 78, 79]позволилэкспериментально выявить точное очертание уплотненных объемов под опорным и грузовым пластинами (рис.3.19).Какпоказывает анализ термограмм бетонных и железобетонных плоских элементов, при нулевом пролете среза (при местном сжатии) под грузовыми пластинами уже при первых циклах нагружения вначале образуются наиболее напряженные уплотненные объемы.

Действительно на основе анализа этой термограммы можно констатировать, что под опорным и грузовым пластинами формируются уплотненные объемы бетона виде клина, контуры и размеры которых в начальной стадии нагружения четко проявились на термограмме зеленым цветом, т.е.впервые воочию удалось увидеть клини сфотографировать под площадками загрузки уже на начальной стадии загрузки. В результате

впервые экспериментально удалось доказать гипотезу клина, которую многочисленные исследователи принимают за основу при разработке различных моделей раскалывания и местного сжатия. Анализ этих термограмм показывает, что под грузовыми пластинами возникают области с высокой температурой, так как уровень напряжений внутри этих областей намного выше, чем уровень напряжений в остальных точках элемента. Очевидно такое резкое отличие, практически на порядок, связано не только с высоким уровнем напряжений сжатия σ_{1c}^{max} вдоль оси полосы, а также возникновением сжимающих напряжений σ_{2c}^{max} в ортогональном направлении из-за эффекта обоймы под опорным и грузовым пластинами, возникающего из-за трения.

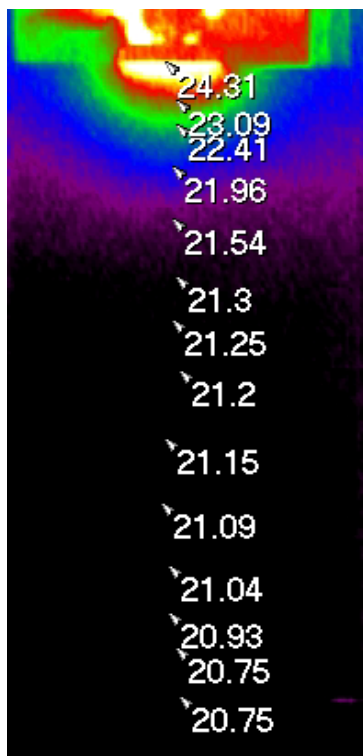


Рис. 3.20 Термограммы плоских элементов с соотношением размеров $H/L = 3.67$

Очевидно также из термограмм рис. 3.20 и 3.21, что в результате перемещения этих уплотненных объемов в вертикальном направлении происходит заклинивание окружающего бетона и клин уплотнения создает примерно равномерное давление вокруг себя в пределах $0 - 180^\circ$, а это вызывает распор и создает раскалывающие напряжения, что и является причиной возникновения усталостных трещин раскалывания и в конечном счете и усталостного разрушения. В элементах с размерами $H/L \leq 1,5$, в вертикальном направлении напряженные состояния, создаваемые верхним и нижним клином накладываются друг на друга и в результате в определенном объеме между ними возникает полоса сжимающих напряжений.

Видимо в этом случае уровень напряжений σ_2^{max} незначителен: принимая во внимание форму уплотненных объемов под опорным и грузовым пластинами можно сказать, что это растягивающие напряжения, так как распорные сжимающие усилия по боковым поверхностям уплотненных объемов вызывают распор вдоль линии, проходящей через их центры тяжести, т.е. что между этими уплотненными объемами возникает полоса с напряженным состоянием

«растяжение-сжатие». Это хорошо согласуется с полученными результатами расчета (см. рис. 3.16-3.18)

Испытания бетонных и железобетонных пластин при местном сжатии, позволяют установить следующую картину образования и развития трещин и характер разрушения [19].

Даже при нагрузках выше предела выносливости бетонные элементы вплоть до усталостного разрушения работают без видимых трещин. Только



Рис. 3.20 -Характер образования и развития трещины раскалывания и разрушения бетонного элемента при $\delta = l_{sup}/H = 0,2$ и $H/L = 1,33$

незадолго до усталостного разрушения при тщательном исследовании бетонных образцов через микроскоп можно обнаружить волосяные трещины отрыва в средней зоне вдоль оси элемента с длиной в несколько миллиметров и раскрытием не более 0,01мм. Максимальная длина таких макротрещин, которые удалось обнаружить незадолго до усталостного разрушения с помощью микроскопа, не

более 10 -12 мм. Очевидно, когда макротрещина достигает определенного критического размера начинается динамическое развитие трещины. В дальнейшем трещина развивается неустойчиво за

счет накопленной энергии деформации тела с большой скоростью и поэтому развитие сопровождается выделением шума. Дальнейшее поведение усталостной трещины отрыва и бетонного элемента зависит от ширины грузовых пластин. При относительной длине грузовых пластин $\delta = l_{sup}/H = 0,2$ в бетонных элементах с соотношением размеров $H/L = 1,33$ после начала динамического развития трещина отрыва мгновенно проскакивает до вершин уплотненных объемов (клина) под грузовыми пластинами и выходит к одной из кромок пластин вдоль грани клина (рис.3.20), т.е. происходит мгновенное разрушение, которое совпадает с началом динамического развития трещины

отрыва в средней зоне. При этом поверхность клина, т.е. поверхность сдвига, неровная. Внутри и вне клина бетон не разрушен. Угол внутреннего сдвига бетона в бетонных элементах с соотношением размеров $H/L = 1,33$ при относительной длине грузовых пластин $\delta = l_{sup}/H = 0,20$, т.е. угол наклона граней клина уплотнения, составляет $\varphi = 64^\circ$.

В высоких бетонных элементах развитие усталостных трещин является плавным, а усталостное разрушение более пластичным. В зависимости от уровня нагрузки либо уже при первом нагружении



Рис. 3.21 -Характер образования и развития усталостной трещины (а), (б) и усталостного разрушения (в) бетонного элемента с размерами $H/L = 3,67$

либо в процессе циклического нагружения происходит образование макротрещин отрыва вдольвертикальной оси элемента (рисунок3.21а), которые можно обнаружить невооруженным глазом. При высоких уровнях нагрузки образование этих трещин начинается уже при первом нагружении, вблизи грузовойпластины на расстоянии от неё примерно равной ее ширине и получает развитие на длину примерно равной ширине бетонного элемента L . При увеличении уровня нагрузки при первом нагружении и в дальнейшем с увеличением количества циклов нагруженияпроисходит развитие этих трещин

по высоте элемента и соединение отдельных макротрещин между собой. Увеличение трещины отрыва происходит вплоть до усталостного разрушения и суммарная её длина перед разрушением достигает $(1,4-1,5)L$ (рисунок 3.21б). Одновременно с развитием трещин отрыва по длине в процессе циклического нагружения происходит также и их раскрытие. Наибольшее раскрытие наблюдается на начальном участке макротрещины с длиной примерно L . С приближением усталостного разрушения у кромки грузовой пластины образуются также сдвиговые трещины под углом к пластине. Очевидно возникают поверхности скольжения, идущие от краев площадки смятия (грузовой пластины). Усталостное разрушение высоких бетонных элементов при местном сжатии заканчивается сдвигом уплотненного объема бетона под грузовой пластиной вдоль его границ. При этом, в отличие от элементов с размерами $H/L = 1,33$, уплотненный объем рассыпается после того как трещина раскалывания полностью разделяет бетонный элемент пополам в момент окончательного усталостного разрушения (рисунок 3.21в). Очевидно, что внутри уплотненного объема возникают очень большие напряжения, а вокруг него развивается зона пластичности и происходит внутризерновой сдвиг бетона. Угол внутреннего сдвига бетона в высоких элементах, т.е. угол наклона граней клина уплотнения, составляет $\varphi = 63^\circ$. Эти экспериментальные данные подтверждают корректность полученных результатов расчета, представленных на рис. 3.18

Таким образом, по результатам верификационного расчета бетонных образцов, находящихся в сложном напряженно-деформированном состоянии, в том числе при наличии косвенного армирования, используемая модель бетона в ПК «ANSYS» достаточно точно описывает поведение бетона в сравнении с экспериментальными данными [19-22, 78, 79], как качественно – по виду и характеру разрушения образцов, так и количественно – по величине предельной несущей способности образцов.

4. Моделирование и расчет несущей способности железобетонной балки при разрушении по нормальному сечению

В данном примере целью численного исследования является определение несущей способности железобетонной балки при ее разрушении по нормальному сечению.

Геометрические параметры железобетонной балки, механические свойства бетона и арматуры, а также условия нагружения приняты на основании экспериментально исследованного образца балки марки Бк-12ст[1, 45, 46, 82](см. рис. 4.1, табл. 4.1). Экспериментальные исследования проводились на лабораторной базе кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» КазГАСУ.

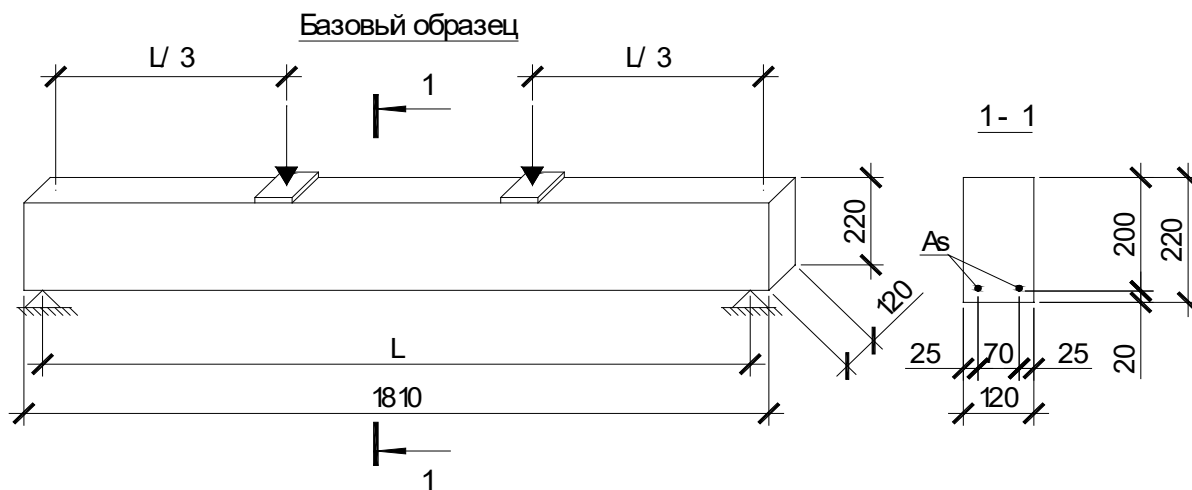


Рис.4.1 Параметры исследуемой балки Бк-12ст и схема её нагружения

Таблица.4.1 Характеристики и предельный момент для опытного образца Бк-12ст

№ серии	Маркировка балок	Класс бетона	Армирование	Расчетная площадь сечения A_s , мм ²	<u>Мехр, кН·м</u>	Среднее значение <u>Мехр, кН·м</u>
	Бк-12ст		2 Ø12 A500	226	20,333/20,333	20,333
1	Бк-8ст	В30	2 Ø8 A500	101	11,172/11,563	11,368
	Бк-6ст		2 Ø6 A500	57	8,211/8,1	8,156

Зависимость между действующим во время испытания изгибающим моментом и фактически измеренным прогибом приведена на рис.4.2 ниже.

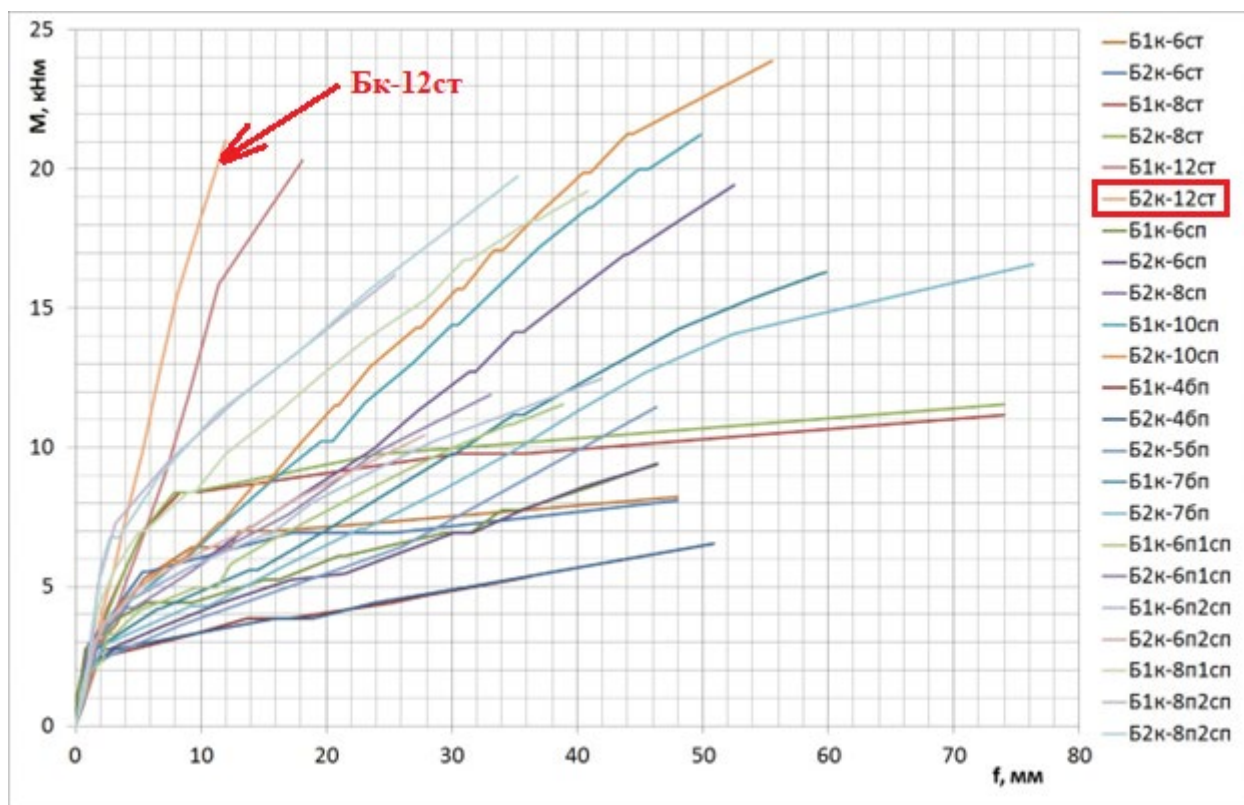


Рис.4.2 Зависимость «момент-прогиб» для образца Бк-12ст (красным)

4.1. Алгоритм моделирования и расчета

Ниже приведен основной алгоритм моделирования и расчета железобетонной балки в ПК «ANSYSWorkbench 2022R2» для определения несущей способности её нормального сечения в зоне чистого изгиба численным методом.

Целью также ставится сравнение полученной в программном комплексе разрушающей нагрузки на образец с результатами эксперимента, а также сравнение общего характера деформирования и трещинообразования натурного образца и смоделированной математической модели.

Процесс моделирования геометрии в приведенном примере условно не показан, так как геометрия расчетной области может создаваться различными способами: импортом твердотельной модели из САД и BIM-систем, а также путем непосредственного создания геометрии в «ANSYSWorkbench» с

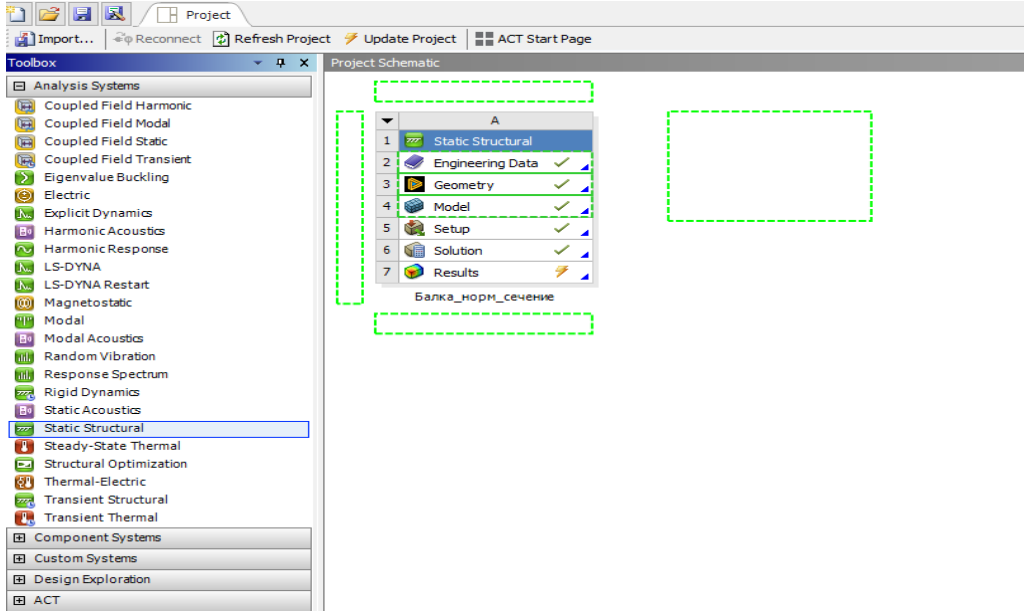
использованием на выбор двух встроенных инструментов: «*SpaceClaim*» (современный инструмент для создания геометрии) или «*DesignModeler*» (устаревший инструмент для создания геометрии).

В целом, задание параметров геометрии должно полностью совпадать с параметрами натурального образца балки. Для удобства задания граничных условий, а именно - для моделирования шарнирного опирания балки на опорные катки, размер двух опорных пластин в модели уменьшается в два раза таким образом, чтобы внутренние торцы пластин располагались в месте расположения опорных катков натурального образца по длине балки. Это делается с целью допустить в программном комплексе при нагружении балки её свободный поворот вокруг внутренних верхних ребер опорных пластин, что соответствует условиям эксперимента.

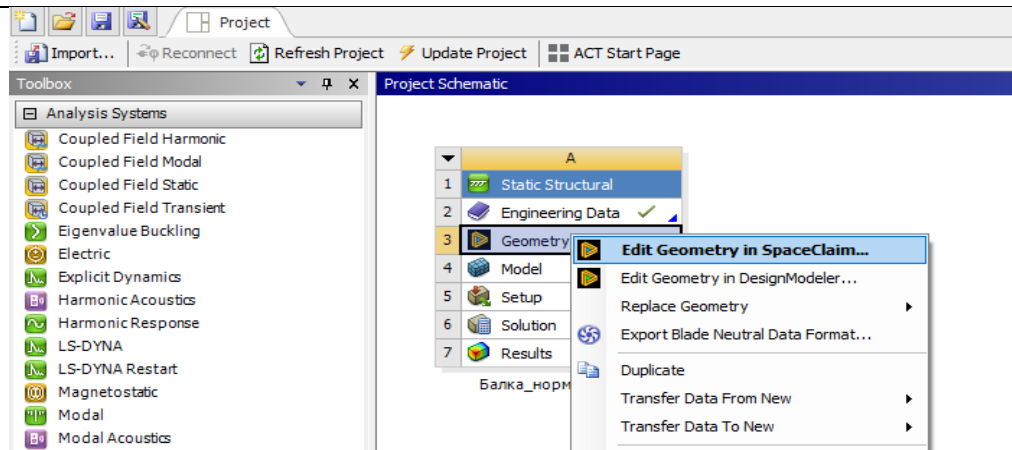
Также обязательными условиями для задания геометрии в ПК «*ANSYSWorkbench*» является наличие разделительных граней между соприкасающимися твердотельными элементами (разными «солидами»), имеющими разный материал (например, между стальными грузовыми пластинами и бетоном), а также моделирование арматуры линейными «балочными» элементами с назначенным круглым сечением, которое соответствует принятому диаметру арматуры натуральных образцов.

Особенностью данного примера также является то, что разрушение балки, которое начинается с достижения арматурой предела текучести, приводит к раздроблению бетона в сжатой зоне нормального сечения не мгновенно, то есть реализуется первый случай разрушения балки - по растянутой арматуре. В данном примере, для анализа напряженно-деформированного состояния в закритической области работы балки под нагрузкой после достижения арматурой предела текучести, нагружение в ПК «*ANSYSWorkbench*» производится заданным вертикальным смещением грузовых пластин (моделируется перемещение нагрузочного штока испытательной машины).

Описание действия	Алгоритм выполнения команд в интерфейсе ПК « <i>ANSYSWorkbench</i> »
1	2

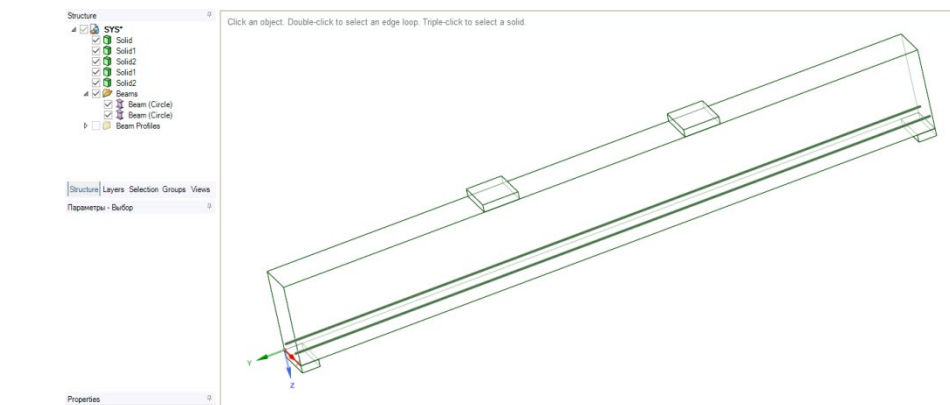
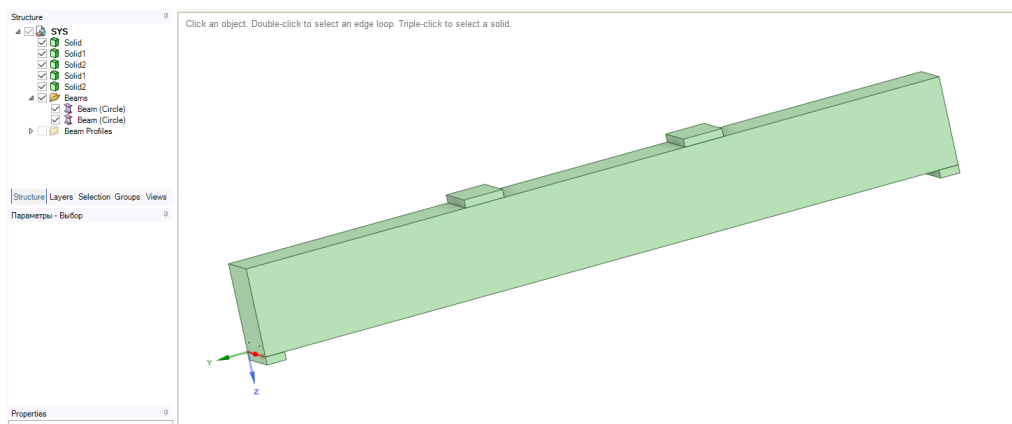
<p>1. Создание расчетного файла и расчетного случая</p>	<p>При открытии программы «Workbench»слева в древовидном меню «Toolbox» в разделе «Analysis Systems»находим расчетный случай, соответствующий статической постановке задачи механики твердого тела - «StaticStructural».</p>
	<p>Двойнымщелчкомпо значку «StaticStructural» переносим расчетный случай (задачу) в правую основную область, отвечающую за связь между разными задачами в рамках единого файла - «ProjectSchematic».</p> <p>При необходимости изменяем наименование расчетной задачи с использованием правой кнопки мыши и выбором в контекстном меню кнопки «Rename».</p> 

<p>2. Создание геометрии расчетной модели</p>	<p>При нажатии правой кнопкой мыши по значку «3.Geometry» в основном окне Workbench(в ранее созданной расчетной задаче) в контекстном меню выбираем один из двух встроенных инструментов для создания геометрии модели: «SpaceClaim» или «DesignModeler». Рекомендуется использование более современного инструмента «SpaceClaim».</p> <p>Примечание: Создание геометрии производится различными способами, как встроенными инструментами Workbench, так и путем импорта файлов различных общепризнанных форматов для передачи и переноса геометрии(.ifc и т.п.). В данном пособии алгоритм задания геометрии расчетной схемы ввиду различных способов ее создания, не рассматривается.</p>
---	--



Если геометрия создана верно, то напротив кнопки «3.Geometry» в окне задачи справа появляется ✓.

После создания геометрии в окне «*SpaceClaim*»:



Здесь стоит отметить, что для арматуры в виде балочных элементов обязательно задается сечение с указанием радиуса или диаметра арматуры (задается параметр *BeamProfiles* в древовидном меню слева).

3. Добавление физически нелинейных моделей материалов бетона и арматуры

При нажатии двойным щелчком мыши по значку «2. *EngineeringData*» в основном окне Workbench(в ранее созданной расчетной задаче)попадаем в библиотеку используемых в данной задаче материалов.

The screenshot shows the 'Engineering Data Sources' window in ANSYS Workbench. On the left is a 'Toolbox' with a tree view of material models. The main area is titled 'Outline of Schematic B2: Engineering Data' and contains a table of materials. The 'Structural Steel' material is selected, and its properties are displayed in a table below.

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7850	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C ⁻¹
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
Young's Modulus	2E+11	Pa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
Strain-Life Parameters		
S-N Curve	Tabular	
Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa
Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa
Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa
Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Слева в древовидном меню «*Toolbox*» располагаются все доступные к применению математические модели описания для активного материала. В верхней центральной части расположен список используемых в данной задаче материалов. В нижней центральной части расположены физико-механические параметры для описания выбранного активного материала.

Заходим в полную библиотеку доступных материалов – «*EngineeringDataSources*». В верхнем центральном открывшемся меню находим и выбираем нажатием клавиши библиотеку «*GeneralNon-linearMaterials*». В меню ниже напротив материалов «*ConcreteNL*»и «*StructuralSteelNL*»в столбце «Add» нажимаем . После добавления данных выбранных материалов в расчетную задачу рядом с появляется значок .

Закрываем полную библиотеку материалов повторным нажатием по радио-кнопке «EngineeringDataSources».

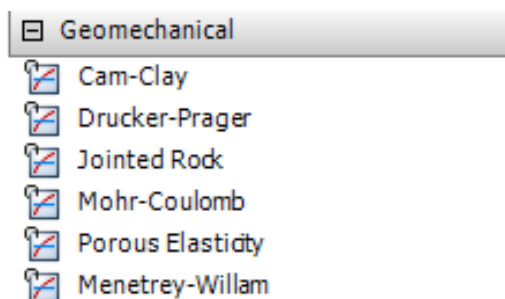
Engineering Data Sources				
	A	B	C	D
1	Data Source		Location	Description
3	ANSYS GRANTA Materials Data for Simulation (Sample)	<input type="checkbox"/>		Sampling of ANSYS Granta material datasheets. Visit ANSYS GRANTA Materials Data for Simulation to learn about the full product with broader coverage of material data (e.g. linear, non-linear, temperature dependant, fatigue etc.) which includes more than 700 material datasheets.
4	General Materials	<input type="checkbox"/>		General use material samples for use in various analyses.
5	Additive Manufacturing Materials	<input type="checkbox"/>		Additive manufacturing material samples for use in additive manufacturing analyses.
6	Geomechanical Materials	<input type="checkbox"/>		General use material samples for use with geomechanical models.
7	Composite Materials	<input type="checkbox"/>		Material samples specific for composite structures.
8	General Non-linear Materials	<input type="checkbox"/>		General use material samples for use in non-linear analyses.
9	Explicit Materials	<input type="checkbox"/>		Material samples for use in an explicit analysis.
10	Hyperelastic Materials	<input type="checkbox"/>		Material stress-strain data samples for curve fitting.

Outline of General Non-linear Materials					
	A	B	C	D	E
1	Contents of General Non-linear Materials		Add	Source	Description
2	<input type="checkbox"/> Material				
3	Aluminum Alloy NL	<input type="checkbox"/>		Ger	General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
4	Concrete NL	<input type="checkbox"/>		Ger	
5	Copper Alloy NL	<input type="checkbox"/>		Ger	
6	Gasket Linear Unloading	<input type="checkbox"/>		Ger	
7	Gasket Non Linear Unloading	<input type="checkbox"/>		Ger	
8	Magnesium Alloy NL	<input type="checkbox"/>		Ger	
9	Stainless Steel NL	<input type="checkbox"/>		Ger	
10	Structural Steel NL	<input type="checkbox"/>		Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
11	Titanium Alloy NL	<input type="checkbox"/>		Ger	

Outline of Schematic B2: Engineering Data					
	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	<input type="checkbox"/> Material				
3	Concrete NL	<input type="checkbox"/>		Ger	
4	Structural Steel	<input type="checkbox"/>		Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
5	Structural Steel NL	<input type="checkbox"/>		Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

4. Задание численного описания материала бетона

Из основного списка применяемых в задаче материалов выбираем щелчком мыши материал «ConcreteNL». Слева в древовидном меню «Toolbox» выбираем и раскрываем раздел «Geomechanical»:



Далее двойным щелчком мыши добавляем модель «Menetrey-Willam» к описанию модели бетона:

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	3E+10	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,18		
8	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength		Pa	
13	Uniaxial Tensile Strength		Pa	
14	Biaxial Compressive Strength		Pa	
15	Dilatancy Angle		radian	

При нажатии на строку №10 в нижнем центральном окне, отвечающему за задание параметров материала, слева в древовидном меню «Toolbox» двойным щелчком мыши выбираем модель разупрочнения «Softening».

Далее в строке № 17 «ActiveTable» меняем «Linear» на «Exponential».

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	3E+10	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,18		
8	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength		Pa	
13	Uniaxial Tensile Strength		Pa	
14	Biaxial Compressive Strength		Pa	
15	Dilatancy Angle		radian	
16	Softening			
17	Active Table	Exponential		
18	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength			
19	Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening			
20	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening			
21	Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening			
22	Residual Compressive Relative Stress			
23	Mode 1 Area Specific Fracture Energy		N m ⁻¹	
24	Residual Tensile Relative Stress			

Заполняем необходимые значения для математического описания модели бетона на основании п.2.1 раздела 1 данной монографии:

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2400	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	30490	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,2		
8	Bulk Modulus	1,6939E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2704E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength	27,83	MPa	
13	Uniaxial Tensile Strength	2,1	MPa	
14	Biaxial Compressive Strength	33,39	MPa	
15	Dilatancy Angle	14	degree	
16	Softening			
17	Active Table	Exponential		
18	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength	0,00183		
19	Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,00316		
20	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening	0,2		
21	Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,85		
22	Residual Compressive Relative Stress	0,2		
23	Mode 1 Area Specific Fracture Energy	270	N m ⁻¹	
24	Residual Tensile Relative Stress	0,01		

5. Задание численного описания материала арматуры

Из основного списка применяемых в задаче материалов выбираем щелчком мыши материал «*StructuralSteelNL*».

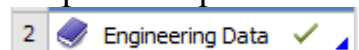
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...			
6	Young's Modulus	2E+11	Pa		
7	Poisson's Ratio	0,3			
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
10	Bilinear Isotropic Hardening				
11	Yield Strength	2,5E+08	Pa		
12	Tangent Modulus	1,49E+09	Pa		

В нижнем окне заполняем необходимые значения для математического описания модели арматурной стали на основании п.1.2 раздела 1 данного пособия:

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus and Poisso...			
6	Young's Modulus	2E+05	MPa		
7	Poisson's Ratio	0,3			
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
10	Bilinear Isotropic Hardening				
11	Yield Strength	500	MPa		
12	Tangent Modulus	700	MPa		

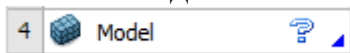
Сохраняем введенные данные в библиотеку материалов задачи нажатием в верхнем левой углу окна «Workbench». Закрываем окно библиотеки материалов нажатием крестика **A2:Engineering Data** , возвращаясь в основное меню «Workbench».

В основном меню при примененных параметрах материалов напротив строки №2 в меню к расчетной задаче ставится галочка



6. Задание материалов для созданной геометрии модели

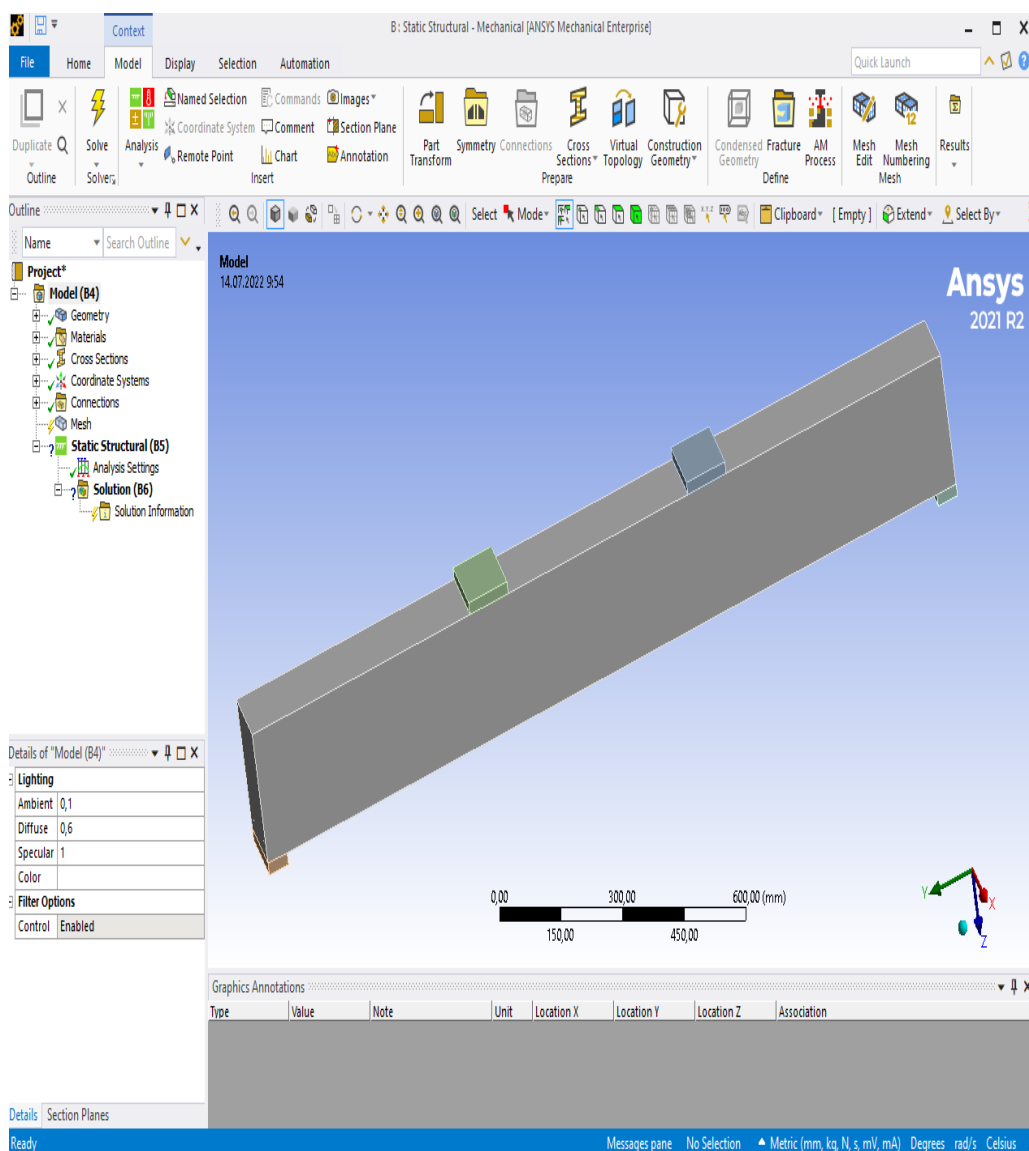
Выбираем двойным нажатием мыши в основном меню «Workbench» в окне расчетной задачи значок «Model»:




После некоторого времени, программа открывает дополнительное окно для дальнейшего моделирования текущей задачи–интерфейс для «Mechanical-APDL».

В древовидном меню слева («Outline») располагаются вкладки с основными параметрами модели, чуть ниже - поля для их подробного редактирования. В верхней части расположено ленточное меню с основными инструментами для работы с моделью.

В центральной части располагается сама расчетная модель с заранее заданной геометрией:



Слева в древовидном меню «*Outline*» раскрываем список во вкладке  *Geometry* .

Нажимая на каждый отдельный набор геометрии во вкладке «*Geometry*» справа в основном окне модели зеленым цветом выделяется выбранный набор геометрии.

Выбираем в списке «*Geometry*» основное тело балки. Снизу слева в поле для редактирования параметров «*Details of SYS/Solid*» находим вкладку «*Material*» и в строке напротив «*Assignment*» выбираем ранее заданный материал «*ConcreteNL*». Удостоверяемся, что напротив следующей строки «*Nonlinear Effects*» стоит значение «*Yes*».

Выбираем в списке «*Geometry*» солиды – грузовые и опорные пластины и задаем им через вкладку «*Material*» в строке напротив «*Assignment*» стандартный материал «*Structural Steel*».

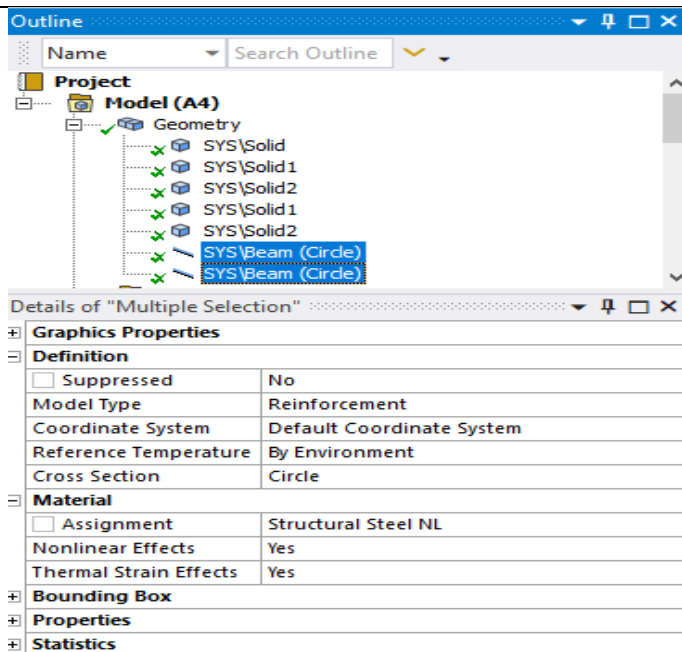
Выбираем в списке «*Geometry*» два балочных (линейных) элемента смоделированной ранее арматуры.

Снизу слева в поле для редактирования параметров «*Details of Multiple Selection*» находим вкладку «*Material*» и в строке напротив «*Assignment*» выбираем ранее заданный материал «*Structural SteelNL*». Удостоверяемся, что напротив следующей строки «*Nonlinear Effects*» стоит значение «*Yes*».

В поле для редактирования параметров «*Details of Multiple Selection*» находим вкладку «*Definition*» и в строке напротив «*Model Type*» заменяем стандартный тип элемента «*Beam*» на «*Reinforcement*».

Примечание:

При использовании версий ПК «*ANSYS Workbench*» до 2021 R1, параметр «*Reinforcement*» в «*Model Type*» отсутствует. Для смены типа конечных элементов с балочного на армирующий в этом случае требуется вставка команды на внутри программном языке APDL.



Слева в древовидном меню «*Outline*» в открытой вкладке «*CrossSection*» проверяем наличие заранее заданного сечения арматурных стержней:

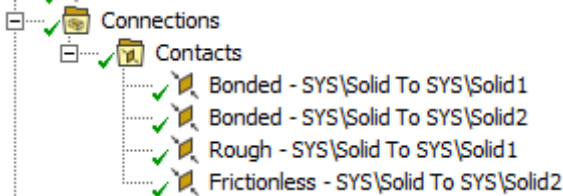

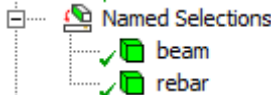

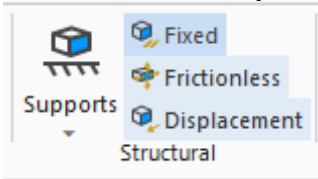


7. Задание контактов между грузовыми, опорными площадками и телом балки

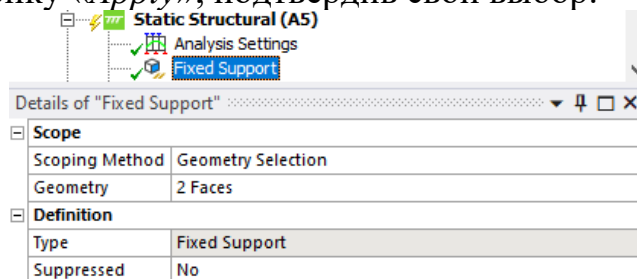
Слева в древовидном меню «*Outline*» в открытой вкладке «*Connections*»>«*Contacts*» выбираем контакт между верхней грузовой пластиной и верхней гранью балки (справа в основном виде с геометрией модели красным и синим цветом выделяются выбранные контактные поверхности). Для выбранного контакта в нижнем меню «*Detailsof «ContactRegion»*» во вкладке «*Definition*» в строке напротив «*Type*» проверяем выставленное значение «*Bonded*» (абсолютно жесткое сопряжение контактных поверхностей).

Далее в той же вкладке «*Contacts*» выбираем контакт между левой опорной пластиной и нижней гранью балки. В нижнем меню «*Detailsof «ContactRegion»*» во вкладке «*Definition*» в строке напротив «*Type*» меняем значение на «*Frictionless*» (контакт, допускающий как отрыв поверхностей друг от друга, так и проскальзывание поверхностей без трения – данный контакт моделирует шарнирно-подвижную опору балки при испытании).

В той же вкладке «*Contacts*» выбираем контакт между правой опорной пластиной и нижней гранью балки. В нижнем меню «*Detailsof «ContactRegion»*» во вкладке «*Definition*» в строке напротив «*Type*» меняем значение на «*Rough*» (контакт, допускающий отрыв поверхностей, но запрещающий их какое-либо проскальзывание - данный контакт моделирует шарнирно-неподвижную опору балки при испытании).


	
<p>8. Создание именованных наборов для бетона и арматуры балки</p>	<p>Для дальнейшего удобства анализа результатов расчета создадим две именованные выборки («<i>NamedSelections</i>») для бетона и армирования балки.</p> <p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» раскрываем список во вкладке  Geometry.</p> <p>В списке находим солид (тело) балки, нажимаем правой кнопкой мыши и в контекстном меню выбираем пункт «<i>CreateNamedSelection</i>», во всплывшем окне вводим наименование выборки (допустим «<i>beam</i>»).</p> <p>В том же списке с геометрией находим два линейных элемента, моделирующие арматуру балки (для выбора всех элементов используем зажатую кнопку Shift), нажимаем правой кнопкой мыши на любом из выбранных элементов и в контекстном меню выбираем пункт «<i>CreateNamedSelection</i>», во всплывшем окне вводим наименование выборки (допустим «<i>rebar</i>»).</p> <p>После создания именованных выборок в древовидном меню «<i>Outline</i>» появляется новая вкладка:</p> 
<p>9. Задание граничных условий</p>	<p>Так как фактические условия опирания балки, соответствующие эксперименту, в данной задаче моделируются свойствами контактных поверхностей, то для задания граничных условий достаточно жестко закрепить по всем направлениям нижние поверхности опорных стальных пластин.</p> <p>Для этого слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» нажимаем на заголовок вкладки  Static Structural (A5).</p> <p>При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «<i>Environment</i>».</p> <p>В данной вкладке для задания закреплений расчетной области выбираем в разделе «<i>Structural</i>» вид закрепления – «<i>Fixed</i>»:</p> 

Слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*StaticStructural*» появляется параметр «*FixedSupport*». При нажатии на него в нижнем меню «*Details of «FixedSupport»*» необходимо нажать на строчку «*Geometry*», после чего в основном меню с геометрией модели необходимо выбрать (через Ctrl) две нижние плоскости опорных стальных пластин, после чего в той же строчке «*Geometry*» в древовидном меню необходимо нажать на радио-кнопку «*Apply*», подтвердив свой выбор:



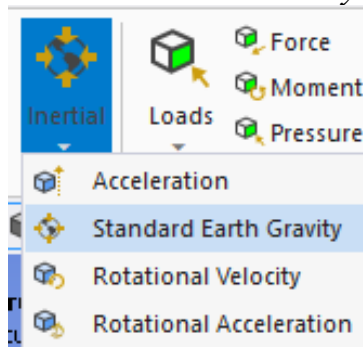
10. Задание условий нагружения конструкции

В качестве условия для нагружения конструкции используем заданное перемещение, приложенное к внутренней боковым граням стальных грузовых пластин (использование силы – «*Force*» для данной конкретной задачи не рекомендуется).


Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  **Static Structural (A5)**.

При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Environment*».

Для задания собственного веса балки находим вкладку «*Inertial*» и выбираем нажатием – «*Standard Earth Gravity*»:



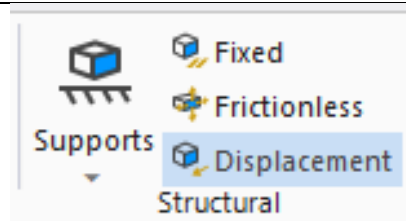
Проверяем направление приложения собственного веса в древовидном меню слева, при необходимости во вспомогательном нижнем меню в строке «*Direction*» изменяем направление приложения нагрузки.

Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  **Static Structural (A5)**.

При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Environment*».

В данной вкладке для задания нагружения балки выбираем нажатием – «*Displacement*»:

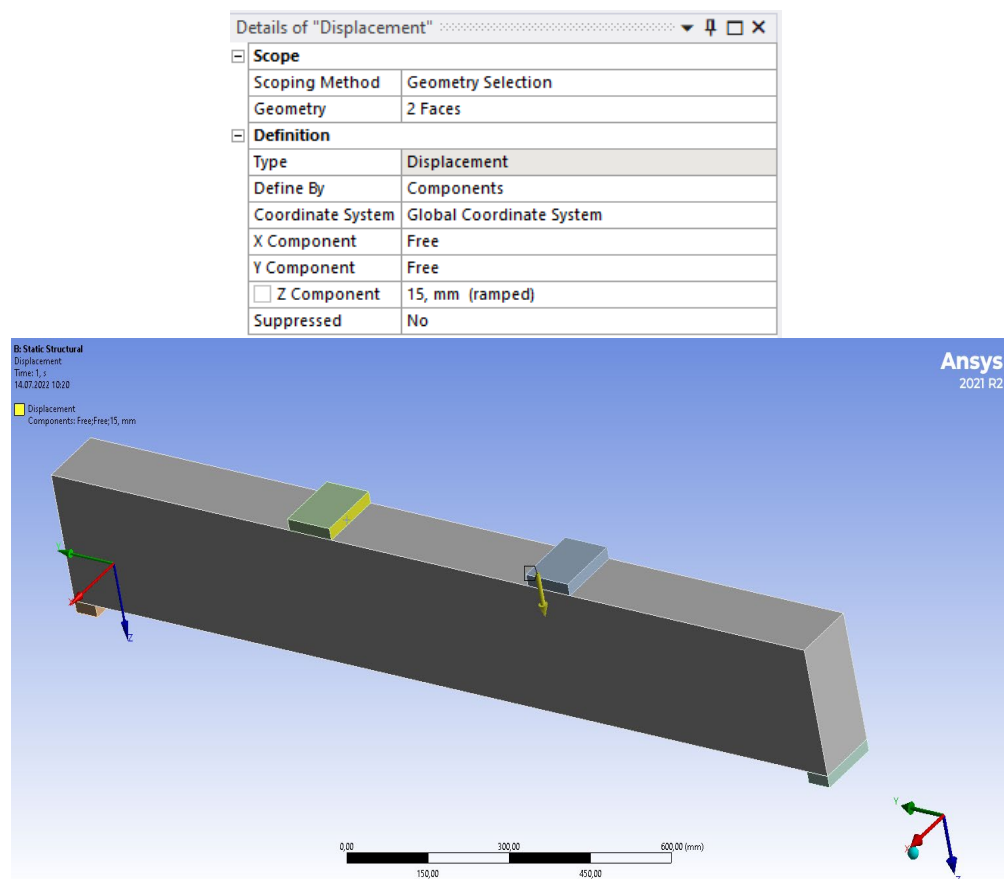
10. Задание условий нагружения конструкции







После этого слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*StaticStructural*» появляется параметр «*Displacement*». При нажатии на него в нижнем меню «*Details of «Displacement»*» необходимо нажать на строчку «*Geometry*», после чего в основном меню с геометрией модели необходимо выбрать внутренние боковые грани грузовых пластин, после чего в той же строчке «*Geometry*» в древовидном меню необходимо нажать на радиокнопку «*Apply*», подтвердив свой выбор.

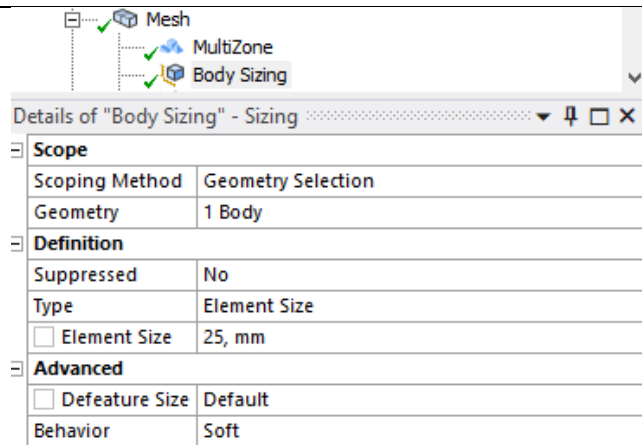
Далее в этом же меню «*Details of «Displacement»*» по вертикальному направлению (в нашем случае ось *Z*) необходимо ввести значение заданного перемещения (в данной задаче рекомендуется значение – 15 мм). По остальным двум направлениям должно стоять значение «*Free*».

После задания численного значения заданного перемещения в основном окне справа появляется стрелка с направлением приложения перемещения, а также выделяется желтым цветом площадка приложения заданного перемещения:



При неправильном направлении заданного перемещения, необходимо изменить знак при указании значения перемещения на противоположный.

<p>11. Задание настроек и создание сетки объемных конечных элементов</p>	<p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» нажимаем на заголовок вкладки  Mesh .</p> <p>При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «<i>Mesh</i>».</p> <p>В данной вкладке нажимаем на значок «<i>Method</i>».</p> <p>После этого слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» во вкладке «<i>Mesh</i>» появляется параметр «<i>AutomaticMethod</i>». Нажимаем на него.</p> <p>В основном окне с геометрией модели выделяем все тела рамкой (при этом сверху должен быть выбран метод выделения - ).</p> <p>Слева в нижнем меню «<i>Details of Method</i>» подтверждаем выбор геометрии радио-кнопкой «<i>Apply</i>».</p> <p>Далее в этом же меню во вкладке «<i>Definition</i>» в строчке «<i>Method</i>» меняем метод разбивки сетки КЭ на «<i>MultiZone</i>». В раскрывшихся настройках изменяем параметр «<i>ElementOrder</i>» на «<i>Quadratic</i>».</p> <p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» нажимаем на заголовок вкладки  Mesh .</p> <p>При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «<i>Mesh</i>».</p> <p>В данной вкладке нажимаем на значок «<i>Sizing</i>».</p> <p>Данный параметр появляется во вкладке «<i>Mesh</i>» древовидного меню слева.</p> <p>Нажав на параметр «<i>BodySizing</i>» в нижнем меню «<i>Details of BodySizing</i>» и далее на строку «<i>Geometry</i>» слева в основном окне выбираем все элементы рамкой с включенной радиокнопкой , подтверждаем выбор всех тел нажав на радио-кнопку «<i>Apply</i>».</p> <p>В этом же меню во вкладке «<i>Definition</i>» задаем значение размера грани объемных конечных элементов в поле «<i>ElementSize</i>» (в данной задаче наиболее оптимальное значение составляет 25 мм):</p>
--	---



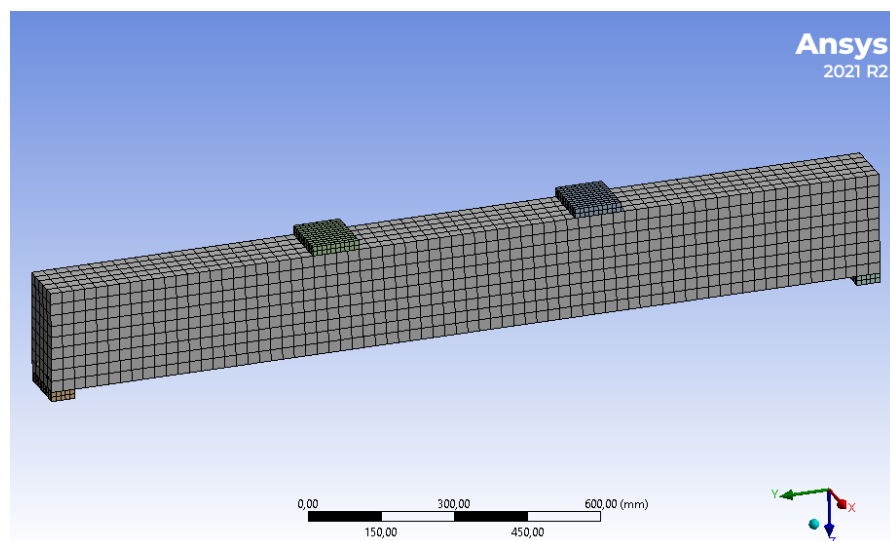
Примечание

Размер конечного элемента стоит задавать таким образом, чтобы по высоте сечения конструкция разбивалась не менее, чем на 8 конечных элементов (в нашем случае – 9 КЭ). При этом величину грани конечного элемента не стоит задавать меньше среднего размера заполнителя бетона.

Производим разбивку геометрии модели на конечные элементы, нажав правой кнопкой мыши на заголовок вкладки Mesh и в контекстном меню выбрав действие - «Generate Mesh».

Общее число узлов и конечных элементов в задаче можно увидеть, нажав на заголовок вкладки Mesh и в нижнем меню раскрыв самый нижний параметр «Statistics»:

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	21018
<input type="checkbox"/> Elements	4000

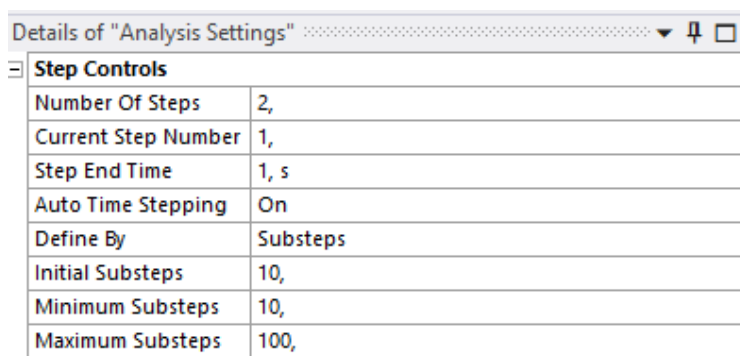


12. Задание настроек нелинейного решателя

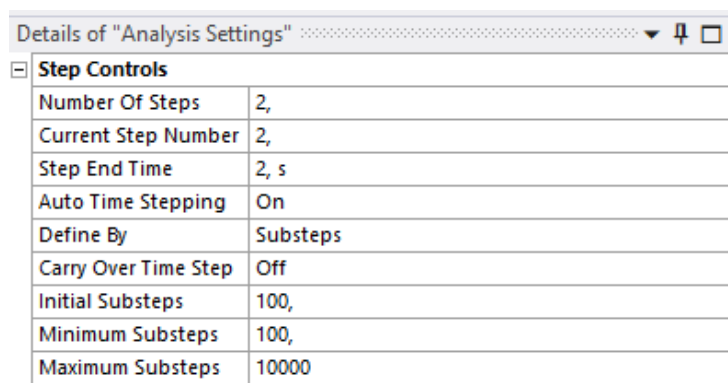
Ниже приведен алгоритм основных настроек нелинейного решателя, однако, необходимо помнить, что данные настройки могут существенно изменяться в зависимости от типа рассматриваемой задачи.

Слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*StaticStructural*» нажимаем на параметр, отвечающий за настройки решателя – «*AnalysisSettings*».

В нижнем меню «*Detailsof «AnalysisSettings»*» во вкладке «*StepControls*» создаем два основных шага расчета («*NumberofSteps*» - 2) изменяем значение параметра «*AutoTimeStepping*» на «*On*» для каждого шага, далее заполняем раскрывшиеся настройки следующим образом:



Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	2,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	10,
Minimum Substeps	10,
Maximum Substeps	100,



Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	2,
Current Step Number	2,
Step End Time	2, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Carry Over Time Step	Off
Initial Substeps	100,
Minimum Substeps	100,
Maximum Substeps	10000

Переходим в следующую вкладку «*SolverControls*», где меняем параметр «*SolverType*» на «*Direct*» (прямой метод решения). Также включаем возможность расчета при больших деформациях, изменяя параметр «*LargeDeflection*» на «*On*».


Переходим в следующую вкладку «*NonlinearControls*», где изменяем тип нелинейного решателя на несимметричный решатель Ньютона-Рафсона (в первом параметре выставляем «*Unsymmetric*»).

Далее отключаем все возможные типы отслеживания (контроля) сходимости решателя (переводя их в режим «Remove»или «Off»), за исключением отслеживания сходимости по силе (для этого напротив «ForceConvergence»выставляем «On»). Значение погрешности сходимости в 0,5% в данной задаче является достаточным (в некоторых расчетных случаях используется значение ниже, допустим – 0,1 %):

Nonlinear Controls	
Newton-Raphson O...	Unsymmetric
Force Convergence	On
--Value	Calculated by solver
--Tolerance	0,5%
--Minimum Reference	1,e-002 N
Moment Convergence	Remove
Displacement Conve...	Remove
Rotation Convergen...	Remove
Line Search	Off
Stabilization	Off

13.
Создание шаблонов для вывода основных результатов расчета

Для получения результатов по внутренним параметрам НДС конструкции необходимо создать основные шаблоны результатов.

Для этого слева в древовидном меню «Outline» нажимаем на заголовок вкладки  **Solution (A6)**. При нажатииданной заголовка сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «Solution»:


Раскрываемвкладку «Deformation» ивыбираем «Directional Deformation». Внижнемменю «Detailsof «DirectionalDeformation» вовкладке «Definition» встроке «Orientation» выбираемнаправление, соответствующеевертикальномупрогибубалки (вданномслучаеглобальнаяосьZ).

Таким же образом выполняем следующие операции:


«Solution» >«Strain»>«Equivalent Plastic Strain»;
 «Solution» >«Strain»>«Equivalent Total Strain»;
 «Solution» >«Stress»>«Maximum Principal Stress»;
 «Solution» >«Stress»>«Minimum Principal Stress»;
 «Solution» >«Stress»>« Equivalent(von-Mises) Stress»;
 «Solution» >«Strain»>«Equivalent Total Strain».

Для 1-4 шаблона результатов в нижнемменю во вкладке «Scope» в строке «ScopingMethod»задаем параметр «NamedSelection», а ниже в появившейся строке «NamedSelection» выбираемранее созданную именованную выборку – «beam».

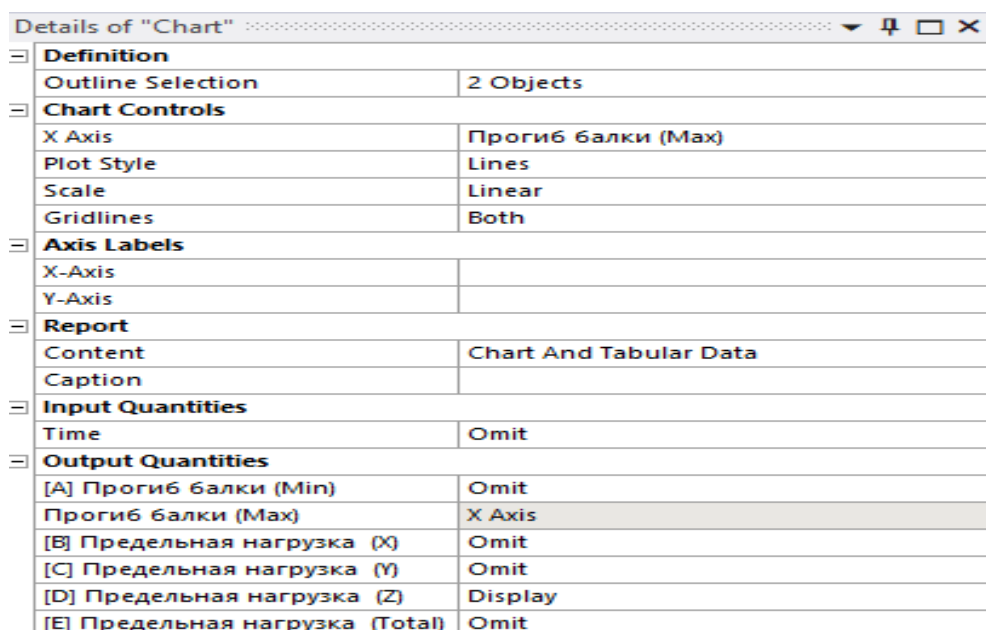
Для 5-6 шаблона результатов в нижнем меню во вкладке «*Scope*» в строке «*ScopingMethod*» задаем параметр «*NamedSelection*», а ниже в появившейся строке «*NamedSelection*» выбираем ранее созданную именованную выборку – «*rebar*».

Создаем шаблон для определения нагрузки, которая передается на балку при заданном перемещении. Для этого слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  **Solution (A6)**. При нажатии данной заголовка сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Solution*»:

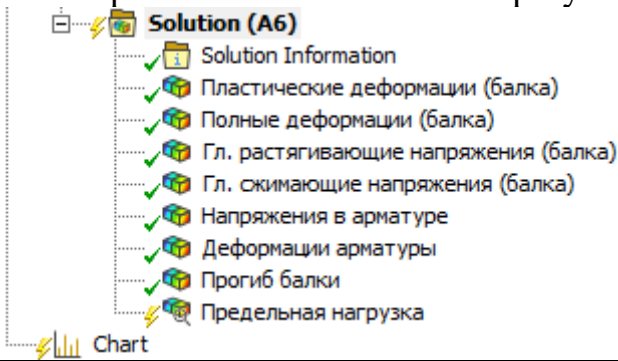

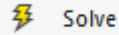
Раскрываем вкладку «*Probe*» и выбираем «*ForceReaction*». В нижнем левом вспомогательном меню «*Details of ForceReaction*» во вкладке «*Definition*» в строке «*BoundaryCondition*» выбираем параметр «*FixedSupport*».

Для получения графика в виде зависимости «нагрузка-прогиб» выполняем следующие действия. Слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*Solution*» одновременно выбираем шаблон результатов для вертикальных перемещений (*DirectionalDeformation*) и шаблон результатов для реакции силы (*ForceReaction*). При выделении обоих шаблонов в появившейся сверху в ленточном меню вкладке «*Multiple*» необходимо нажать на  **Chart**.

Слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*StaticStructural*» выбираем созданный график «*Chart*» и во вспомогательном меню снизу «*Details of Chart*» выставляем все параметры в соответствии:

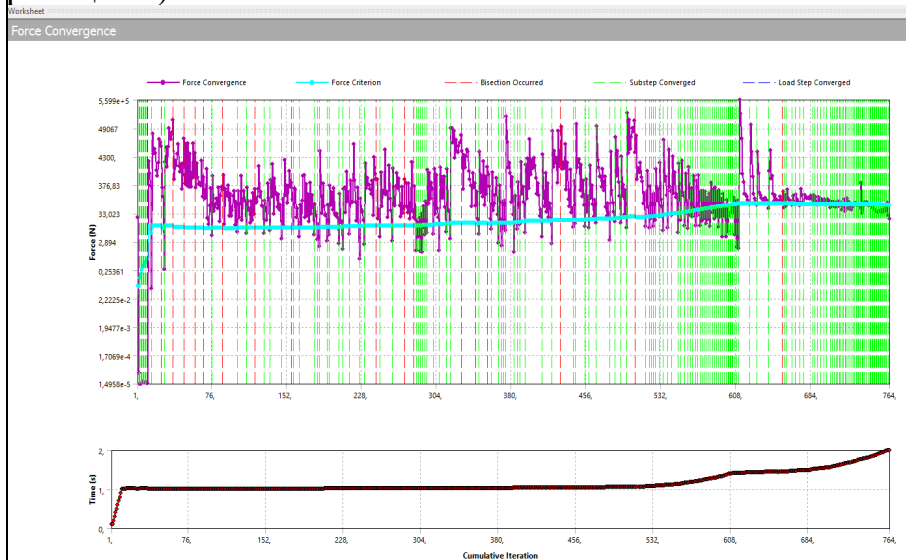


Details of "Chart"	
Definition	
Outline Selection	2 Objects
Chart Controls	
X Axis	Прогиб балки (Max)
Plot Style	Lines
Scale	Linear
Gridlines	Both
Axis Labels	
X-Axis	
Y-Axis	
Report	
Content	Chart And Tabular Data
Caption	
Input Quantities	
Time	Omit
Output Quantities	
[A] Прогиб балки (Min)	Omit
Прогиб балки (Max)	X Axis
[B] Предельная нагрузка (X)	Omit
[C] Предельная нагрузка (Y)	Omit
[D] Предельная нагрузка (Z)	Display
[E] Предельная нагрузка (Total)	Omit

	<p>Для удобства изменяем наименование шаблонов, используя правую кнопку мыши и в контекстном меню нажав на «<i>Rename</i>».</p> <p>После создания и переименования шаблонов результатов:</p> 
<p>14. Запуск задачи на расчет</p>	<p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» нажимаем правой кнопкой мыши на  Solution (A6).</p> <p>В открывшемся контекстном меню запускаем задачу на расчет, нажав на .</p>
<p>15. Отслеживание сходимости расчета в процессе решения задачи</p>	<p>Для отслеживания процесса сходимости нелинейного шагово-итерационного решателя во время выполнения расчета используется два основных инструмента:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. log-файл протокола расчета, обновляемый по ходу самого расчета: <p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» во вкладке «<i>Solution</i>» необходимо нажать на «<i>SolutionInformation</i>» с параметром в строкенижном меню «<i>SolutionOutput</i>» - «<i>SolverOutput</i>» (сходимость на представленном, к примеру, подшаге («<i>Substep</i>») нагружения достигнута за 6 итераций):</p> <pre> FORCE CONVERGENCE VALUE = 19.69 CRITERION= 9.773 EQUIL ITER 1 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.1130E-03 FORCE CONVERGENCE VALUE = 289.5 CRITERION= 9.772 EQUIL ITER 2 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.3436E-03 FORCE CONVERGENCE VALUE = 252.0 CRITERION= 9.772 EQUIL ITER 3 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 0.3202E-03 FORCE CONVERGENCE VALUE = 23.77 CRITERION= 9.772 EQUIL ITER 4 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 0.4647E-04 FORCE CONVERGENCE VALUE = 50.10 CRITERION= 9.772 EQUIL ITER 5 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.3066E-04 FORCE CONVERGENCE VALUE = 11.07 CRITERION= 9.772 EQUIL ITER 6 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 0.1908E-04 FORCE CONVERGENCE VALUE = 4.515 CRITERION= 9.772 <<< CONVERGED >>> SOLUTION CONVERGED AFTER EQUILIBRIUM ITERATION 6 *** LOAD STEP 2 SUBSTEP 10 COMPLETED. CUM ITER = 165 *** TIME = 1.01603 TIME INC = 0.100000E-03 *** MAX PLASTIC STRAIN STEP = 0.1946E-05 CRITERION = 0.1500 *** AUTO STEP TIME: NEXT TIME INC = 0.10000E-03 UNCHANGED </pre>

2. Отслеживание сходимости итерационного решения в виде графика:

Слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*Solution*» необходимо нажать на «*SolutionInformation*» и изменить параметр в строкенижном меню «*SolutionOutput*» на «*ForceConvergence*» (отслеживание сходимости по силовым реакциям):



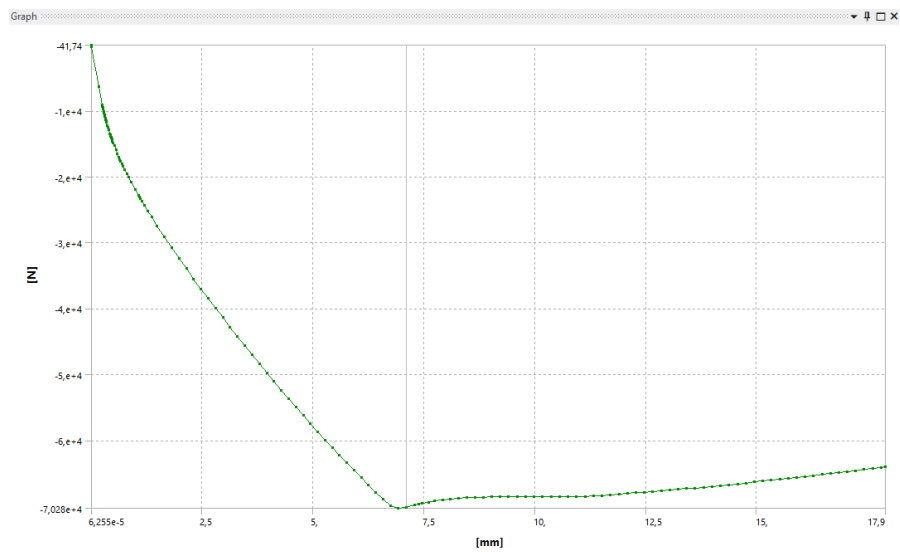
Голубыми линиями и точками на графике показан критерий сходимости (0,5 %). Фиолетовыми точками, соединенных линиями, показана каждая итерация решения. Общее число итераций, выполненных в ходе расчета, показано на графике по оси снизу – в правом углу. Вертикальными зелеными пунктирными линиями отмечают итерации, на которых достигнута сходимость решателя для каждого подшага нагружения. Вертикальными красными пунктирными линиями отмечают подшаги, на которых не достигнута сходимость и для продолжения решения потребовалось дополнительно поделить приращение заданного перемещения на данном подшаге нагружения в 2 раза.

Ход решения в процентах от заданного перемещения также показывается в нижнем левом углу основного окна «*Mechanical*».

16. Анализ результатов расчета

После завершения процесса расчета (время выполнения расчета на компьютере с 6 физическими ядрами и 12 потоками составило 21 min30 s) переходим в режим анализа результатов во вкладку «*Solution*» древовидного меню «*Outline*».

Для определения несущей способности балки по нормальному сечению слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*StaticStructural*» выбираем созданный ранее график «*Chart*»:



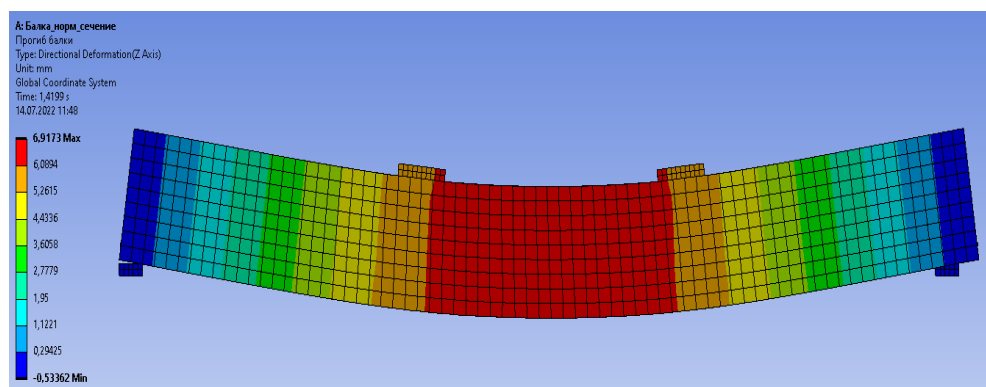
Как видно из данного графика максимальная общая вертикальная нагрузка, которая может быть выдержана балкой составляет 70285 Н (70,285 кН).

Данная максимальная нагрузка соответствует предельному моменту, действующему в нормальном сечении балки:

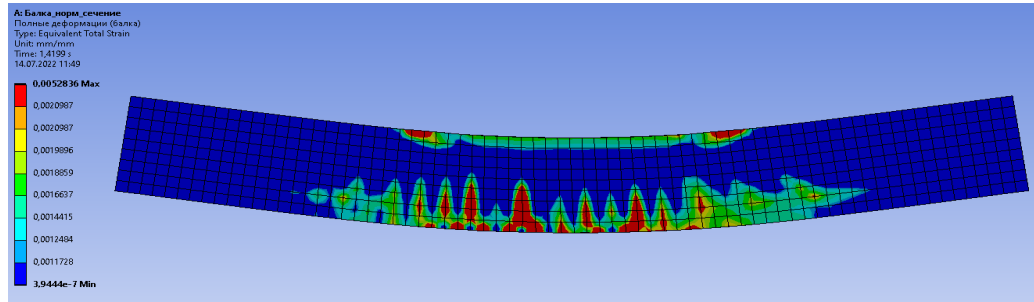
$$M_{ult} = 70,285 \cdot 0,57/2 = \mathbf{20,03 \text{ кНм.}}$$

Ниже приведем остальные основные результаты расчета:

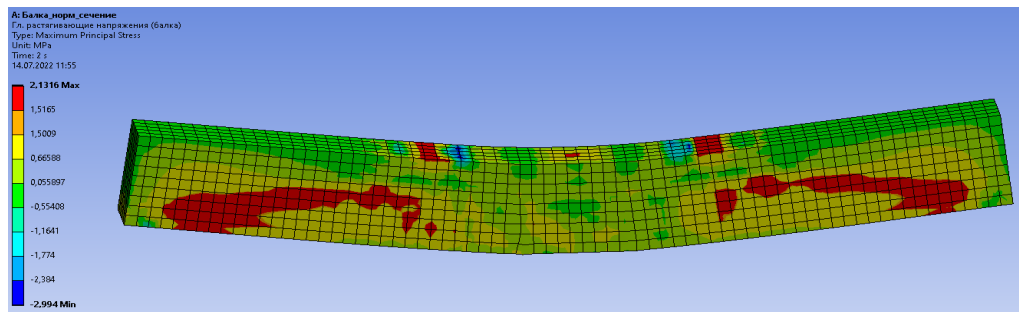
1. «*Solution*» > «*Прогиб балки*» (при M_{ult}):



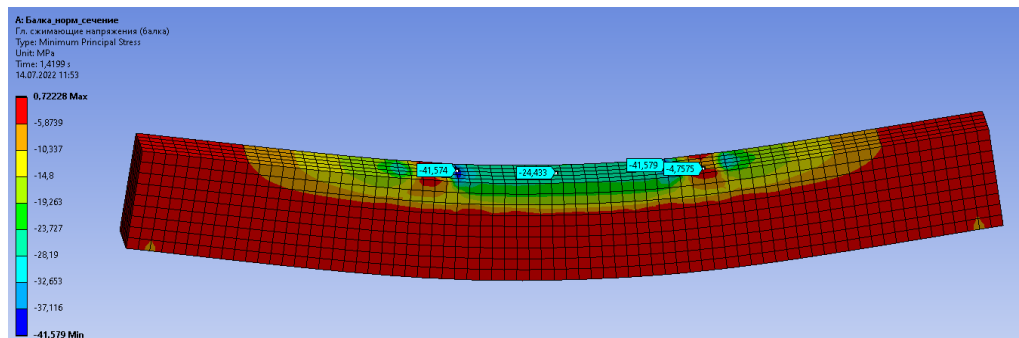
2. «Solution» > «Полные деформации (балка)» (при M_{ult}):



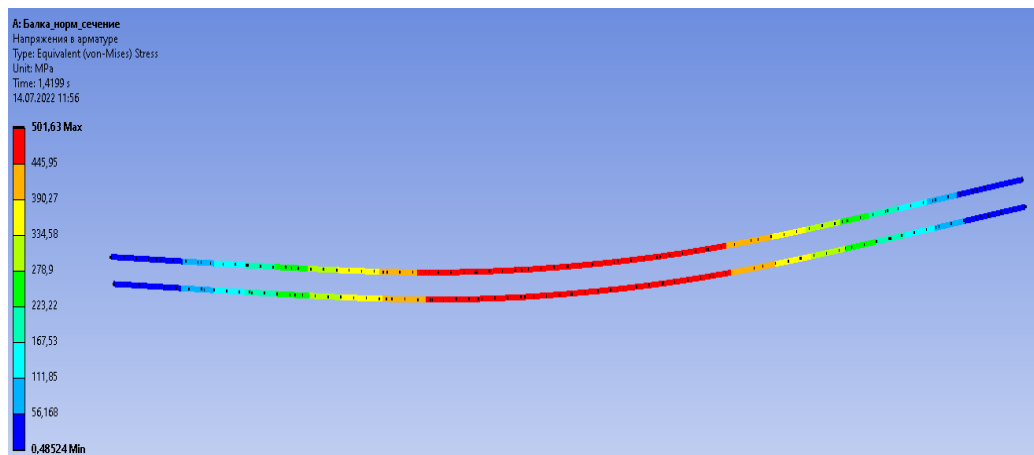
3. «Solution» > «Главные сжимающие напряжения (балка)»:



4. «Solution» > «Главные растягивающие напряжения (балка)»:



5. «Solution» > «Напряжения в арматуре» (при M_{ult}): (в арматуре достигнута площадка текучести):



4.2. Сравнение результатов эксперимента и численного исследования

Согласно произведенному численному исследованию, предельный изгибающий момент, воспринимаемый нормальным сечением балки, соответствует значению **20,03 кН*м**, что с достаточной степенью точности соответствует экспериментальному значению предельного изгибающего момента (см. табл. 3.1).

Погрешность в определении несущей способности железобетонной балки по нормальному сечению (при разрушении по растянутой арматуре) составляет:

$$\Delta = \frac{20,33 - 20,03}{20,33} \cdot 100\% = 1,48\%.$$

Ниже на рис. 3.3 приведено сравнение характера трещинообразования натуральных образцов [1, 45, 46, 73, 82] и численной модели балки.

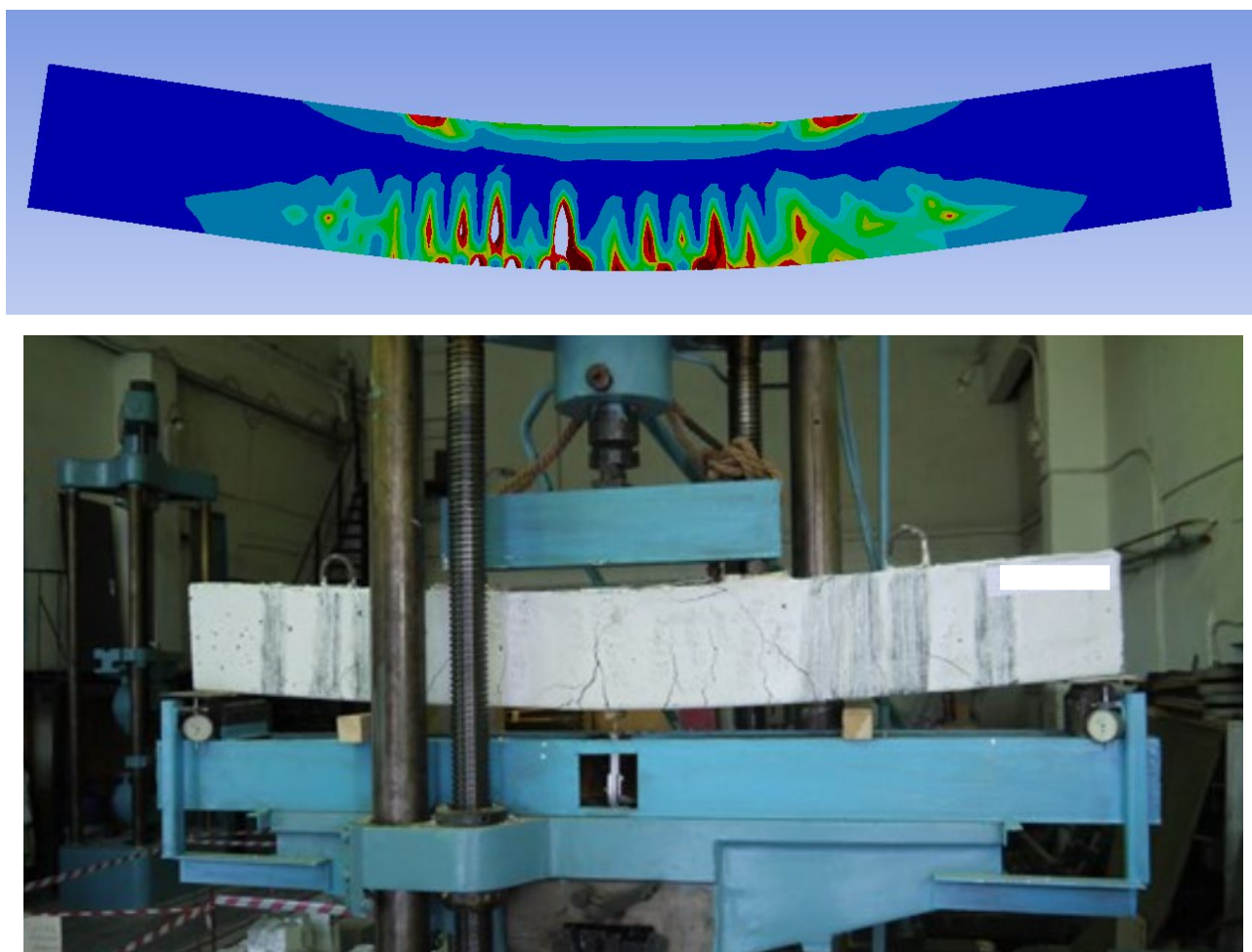


Рис. 3.3. Сравнение характера трещинообразования в растянутой зоне бетона

Как показывает сравнение характера трещинообразования в зоне чистого изгиба натуральных образцов [1, 8, 11, 45, 46, 49, 71, 73, 74, 80, 82,] и численной модели балки, расчетная модель корректно отображает напряженно-деформированное состояние, характер образования трещин и характер разрушения.

Вывод: Несущая способность балки по нормальному сечению при действии изгибающего момента в результате численного исследования в ПК «ANSYS Workbench» достаточно точно соответствует опытной несущей способности балки, определенной в ходе экспериментального исследования (разница в определении несущей способности составила менее 1,5%). Характер трещинообразования численной модели в растянутой зоне бетона достаточно точно соответствует характеру трещинообразования натурального образца балки.

4.3. Моделирование предварительного напряжения арматуры

Для моделирования и расчета железобетонных конструкций при наличии предварительного напряжения арматуры в ПК «ANSYS Workbench» необходимо выполнить дополнительные действия.

В данном подразделе монографии в качестве конструкции с предварительным напряжением арматуры рассмотрим балку, которая была смоделирована ранее в п. 4.1 настоящего пособия. Величину предварительного напряжения арматуры (для класса арматуры A500) примем равной $\sigma_{sp} = 400$ МПа (стоит обратить внимание, что данная величина при расчетах реальных конструкций должна учитывать все потери предварительного напряжения, за исключением потерь от укорочения или ползучести бетона – данные потери можно учесть напрямую в ПК «ANSYS Workbench»).

Алгоритм задания предварительного напряжения арматуры:

1. Слева в древовидном меню «*Outline*» «ANSYS Mechanical» при нажатии на заголовок вкладки «*Static Structural*» сверху в ленточном меню во вкладке «*Environment*» необходимо выбрать в разделе «*Insert*» командную вставку «*Commands*» (в древовидном меню должна появиться строка с добавленной командной вставкой - «*Commands (APDL)*»);

2. Так как на данный момент в ПК «ANSYSWorkbench» средствами стандартного интерфейса программы нельзя задать начальное состояние конструкции, то воспользуемся следующим кодом на программном языке –APDL, который должен быть записан в ранее созданную командную вставку (см. п.1 выше):

```
/solu  
ESEL,S,ENAME,,reinf264  
TIME,0  
INISTATE,DEFINE,,,,400  
OUTRES,ALL,ALL  
ALLSEL,ALL  
solve
```

В данном прописанном коде APDL:

- первая строка отвечает за обращение к разделу «*Solution*» (решателя);
- вторая строка отвечает за тип выбора (в данном случае выбор производится путем обращения к типу элемента (через параметр «*ENAME*») - к типу армирующих конечных элементов «*reinf264*»). При наличии как преднапрягаемой, так и ненапрягаемой арматуры наиболее подходящим вариантом обращения является обращение через тип материала (вместо параметра «*ENAME*» следует использовать параметр «*MAT*»);
- третья строка отвечает за номер шага по времени, на котором прикладывается предварительное напряжение;
- четвертая строка отвечает за непосредственное задание начального состояния конструкции – после всех запятых в данной строке прописывается значение предварительных напряжений в МПа (параметр «*STRE*», отвечающий за задание начальных напряжений, не прописывается, т.к. является стандартным и применяемым автоматически);
- пятая строка отвечает за вывод всех доступных результатов по НДС в постпроцессоре;
- шестая строка отвечает за выбор всех ранее указанных типов элементов;
- последняя строка отвечает за выполнение данной командной вставки при расчете.

3. Все внешние нагрузки следует задавать начиная со следующего шага по времени (в нашем примере с шага от 1 и далее («*TIME,1*»)).

В результате выполненного расчета балки из рассмотренного выше примера, с учетом заданного предварительного напряжения арматуры ($\sigma_{sp} = 400$ МПа), была получена несущая способность нормального сечения в зоне чистого изгиба, равная:

$$M_{ult,sp} = 20,41 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Повышение несущей способности нормального сечения балки с предварительным напряжением арматуры относительно нормального сечения балки без предварительного напряжения арматуры составляет порядка 2 %, что можно считать несущественным. Напомним, что некоторое повышение несущей способности нормального сечения предусматривается и нормативными документами (п. 9.2.7 СП 63.13330.2018).

Ниже приведем некоторые полученные результаты по развитию прогибов, пластических деформаций (трещин) в бетоне, а также напряжений в арматуре на стадии, соответствующей 80% от предельного изгибающего момента, с целью сравнения напряженно-деформированного состояния балок с предварительным напряжением и без предварительного напряжения арматуры в эксплуатационной стадии (при действии нормативных нагрузок).

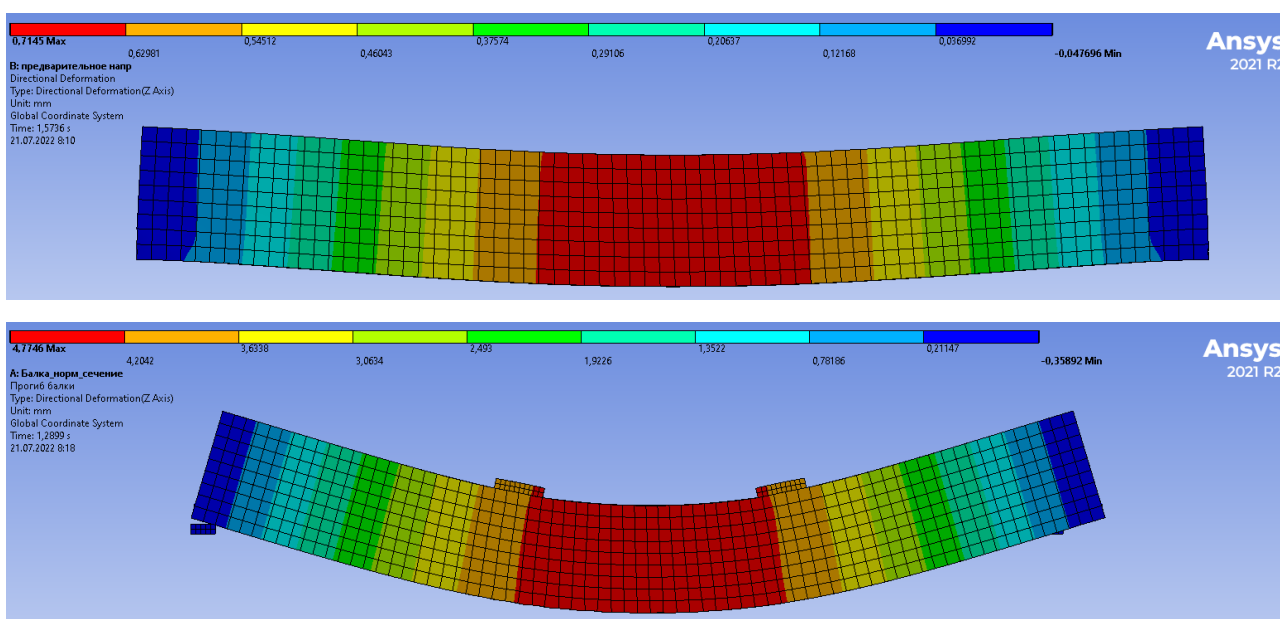


Рис. 4.4. Сравнение вертикального прогиба балки при $M = 0,8M_{ult}$.

(сверху – при наличии предварительного напряжения, снизу – при его отсутствии)

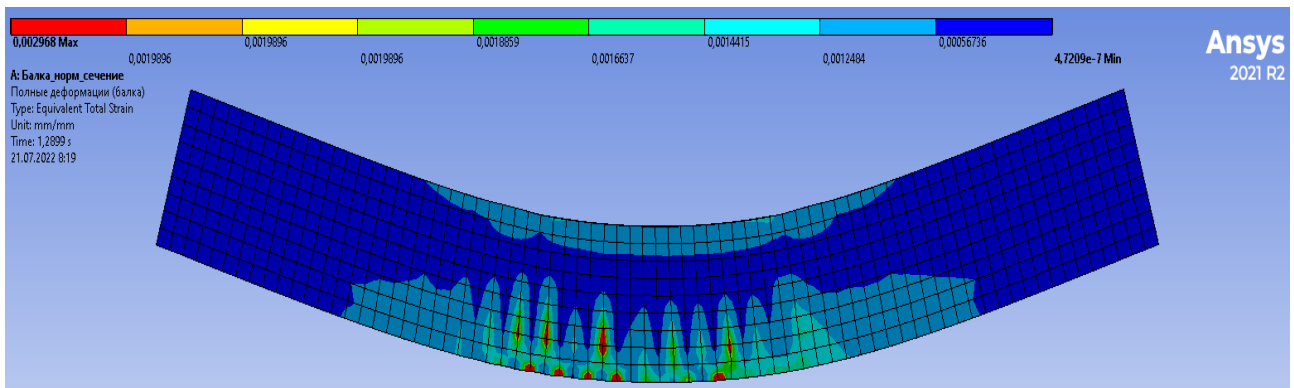
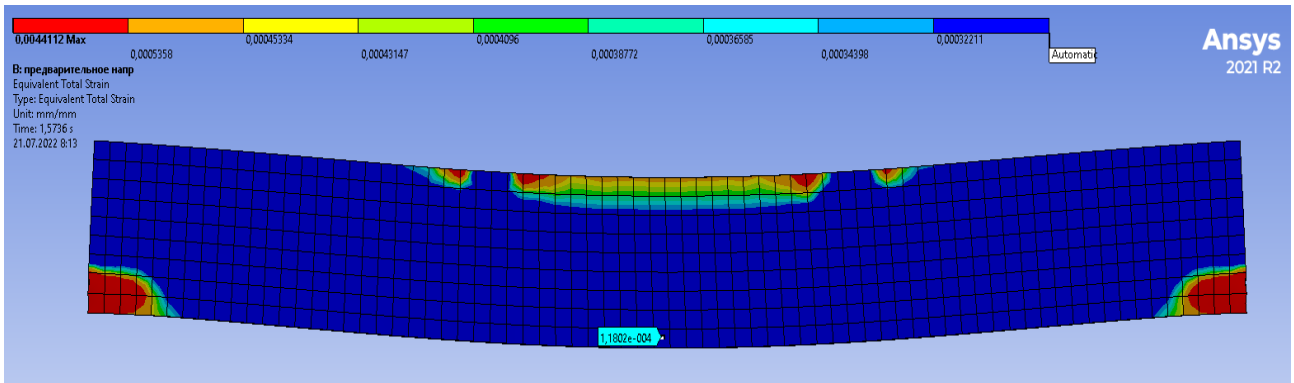


Рис. 4.5. Сравнение характера трещинообразования при $M = 0,8M_{ult}$ (сверху – при наличии предварительного напряжения, снизу – при его отсутствии)

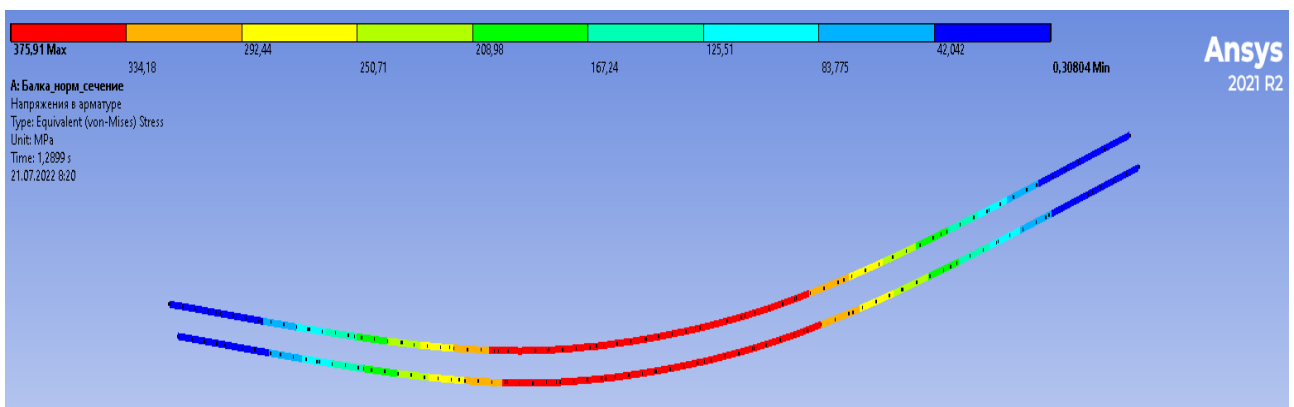
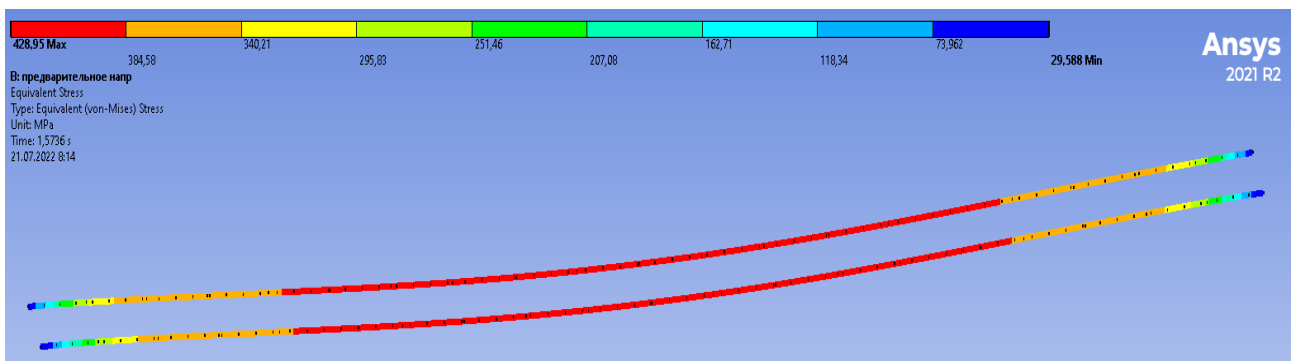


Рис. 4.6. Сравнение величин напряжений в арматуре при $M = 0,8M_{ult}$ (сверху – при наличии предварительного напряжения, снизу – при его отсутствии)

Вывод: Как видно из полученных результатов сравнения, прогиб балки при наличии предварительного напряжения в несколько раз меньше, чем при его отсутствии. В стадии, соответствующей $M = 0,8M_{ult}$ нормальные трещины в предварительно напряженной балке, в отличие от балки без предварительного напряжения, не образуются. Напряжения в растянутой арматуре в обоих случаях достаточно близки по своим значениям.

5. Моделирование и расчет несущей способности железобетонной балки при разрушении по наклонному сечению

В данном примере целью численного исследования является определение несущей способности железобетонной балки при ее разрушении по наклонному сечению (т.е. бетон в исследуемой зоне разрушения находится в сложном двухосном напряженно-деформированном состоянии).

Геометрические параметры железобетонной балки, механические свойства бетона и арматуры, а также условия нагружения приняты на основании экспериментально исследованного [51] образца балки марки ЗБ0-12-0-1 (см. рис. 5.1-5.2, табл.5.1).

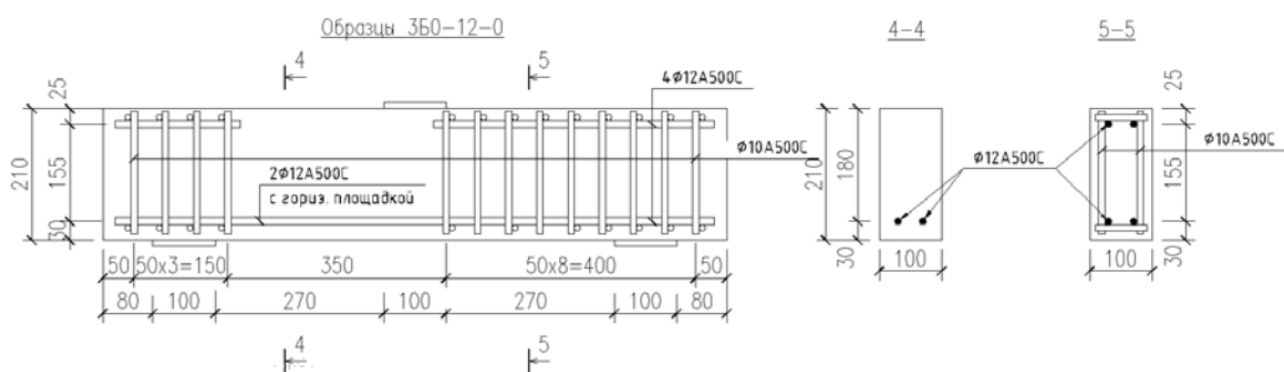


Рис. 5.1 Параметры исследуемой балки ЗБ0-12-0-1 и схема её нагружения



Рис. 5.2 Вид используемого армирования образца балки 3Б0-12-0-І

Таблица 5.1 Характеристики опытного образца 3Б0-12-0-І (выделены красным)

№	Наименование образца	b, мм	h, мм	h ₀ , мм	A _s , см ²	a _s , мм	A _{st} , см ² /тип	A _{sc} , см ²	a _{sc} , мм	W _s , М ³	σ _{ис.ult} , МПа	σ _{вл.ult} , МПа	E ₀ , МПа
1	2Б0-8ст-0-І	103	200	160	0,5	40	~2,5/1	0	-	5.03 · 10 ⁻⁸	30,5	2,22	37600
2	2Б0-8ст-0-ІІ	102	202	163	0,5	39	~2,5/1	0	-	5.03 · 10 ⁻⁸	30,5	2,22	37600
	2Б0-12-0	101	198	163	2,26	35	-	0	-	2 × 1.7 · 10 ⁻⁷	37,8	2,8	39630
3	2Б0-12ст-0-І	100	202	165	2,26	37	~1,45/1	0	-	2 × 1.7 · 10 ⁻⁷	18,5	1,6	30700
4	2Б0-12ст-0-ІІ	100	203	160	2,26	43	~1,4/1	0	-	2 × 1.7 · 10 ⁻⁷	18,5	1,6	30700
5	2Б0-0-0-І	103	205	-	-	-	-	-	-	-	28,9	2,18	37230
6	2Б0-0-0-ІІ	101	203	-	-	-	-	-	-	-	28,9	2,18	37230
7	3Б0-12-0-І	102	210	180	1,92	30	-	0	-	2 × 1.44 · 10 ⁻⁷	29	2,19	37440
8	3Б0-12-0-ІІ	104	210	185	2,1	25	-	0	-	2 × 1.44 · 10 ⁻⁷	29	2,19	37440
9	3Б0-ст-12-І	100	214	214	0	-	0,36/2	1,92	40	2 × 1.44 · 10 ⁻⁷	22	1,82	33970
10	3Б0-ст-12-ІІ	103	220	220	0	-	0,36/2	1,96	55	2 × 1.44 · 10 ⁻⁷	22	1,82	33970
11	4Б0-16-0	100	220	190	3,6	30	0	0	-	2 × 4.02 · 10 ⁻⁷	20,5	1,72	32380
12	4Б0-22-0	105	220	200	3,72	20	0	0	-	1.045 · 10 ⁻⁶	20,5	1,72	32380
13	5Б0-І	149	150	150	-	-	0,51/2	0	-	-	29	2,19	37440
14	5Б0-ІІ	151	148	148	-	-	0,51/2	0	-	-	29	2,19	37440

Результаты по процессу трещинообразования, а также по предельной разрушающей полной нагрузке на образец балки приведены в таблице 4.2 ниже.

Таблица 5.2 Результаты опытного исследования образца ЗБ0-12-0-I (красным)

№	Наименование образца	P_{nl} , кН	% от P_{fail}	P_{sh} , кН	% от P_{fail}	тип разрушения	P_{fail} , кН
1	2Б0-8ст-0-I	35,06	75,84	40,03	86,59	срез сж.з	46,23
2	2Б0-8ст-0-II	23,00	46,92	38,50	38,54	срез сж.з	49,02
	2Б0-12-0	30,00	40,85	55,16	75,11	продергивание	73,44
3	2Б0-12ст-0-I	39,54	80,48	39,54	80,48	срез сж.з	49,13
4	2Б0-12ст-0-II	25,00	58,15	40,03	93,11	срез сж.з	42,99
5	2Б0-0-0-I	-	-	184,3	~100	чистый срез	184,3
6	2Б0-0-0-II	-	-	157,2	87,3	чистый срез	180,1
7	ЗБ0-12-0-I	40,00	41,26	40,00	41,26	срез сж.з	96,94
8	ЗБ0-12-0-II	45,54	44,98	45,54	44,98	срез сж.з	101,25
9	ЗБ0-ст-12-I	30,00	52,3	40,00	63,61	срез сж.з	62,88
10	ЗБ0-ст-12-II	35,00	58,9	55,80	65,40	срез сж.з	85,32
11	4Б0-16-0	40	26,72	80,00	53,44	срез сж.з	149,7
12	4Б0-22-0	30	17,65	150,00	88,24	срез сж.з	170,0
13	5Б0-I	55,2	76,88	61,05	85,03	срез сж.з	71,8
14	5Б0-II	50,3	72,51	58,22	84,38	срез сж.з	69,0

5.1. Алгоритм моделирования и расчета

Ниже приведен основной алгоритм моделирования и расчета железобетонной балки в ПК «ANSYSWorkbench 2022R2» для определения несущей способности наклонного сечения при действии поперечной силы численным методом.

Целью также ставится сравнение полученной в программном комплексе разрушающей нагрузки на образец с результатами эксперимента, а также сравнение общего характера трещинообразования натурального образца и смоделированной математической модели.

Процесс моделирования геометрии в приведенном примере условно не показан, так как геометрия расчетной области может создаваться различными способами: импортом твердотельной модели из САД и ВМ-систем, а также путем непосредственного создания геометрии в «ANSYSWorkbench» с использованием на выбор двух встроенных инструментов:

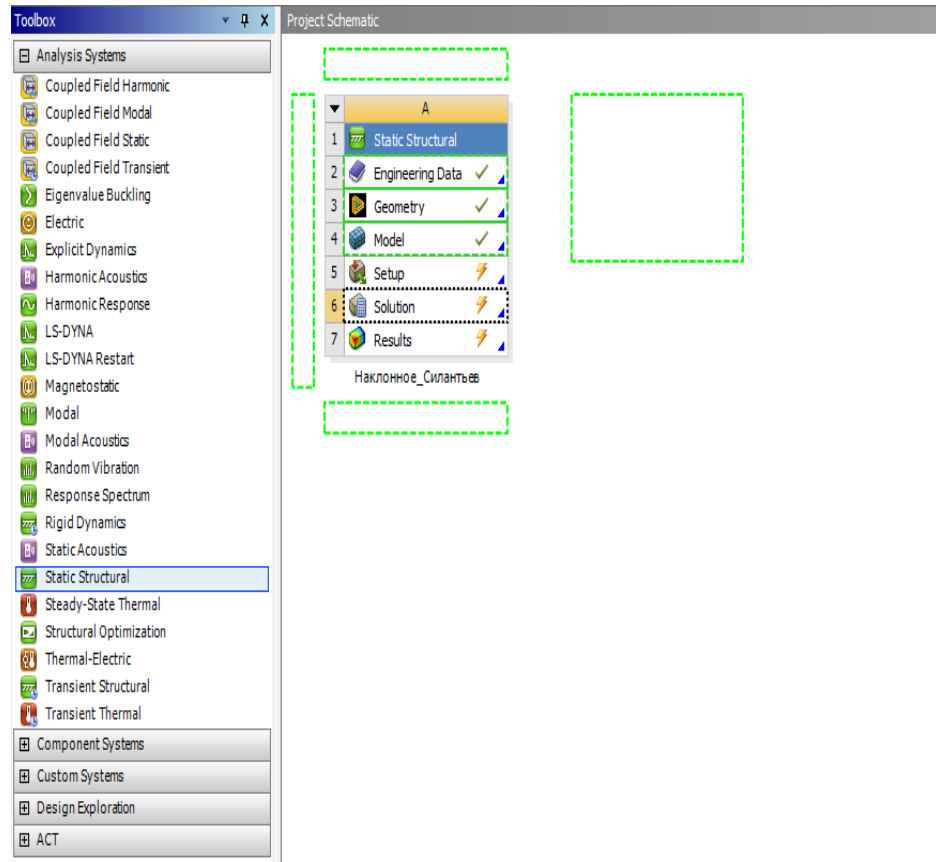
«*SpaceClaim*»(современный инструмент для создания геометрии) или «*DesignModeler*» (устаревший инструмент для создания геометрии).

В целом, задание параметров геометрии должно полностью совпадать с параметрами натурального образца балки. Для удобства задания граничных условий, а именно - для моделирования шарнирного опирания балки на опорные катки, размер двух опорных пластин в модели уменьшается в два раза таким образом, чтобы внутренние торцы пластин располагались в месте расположения опорных катков натурального образца по длине балки. Это делается с целью допустить в программном комплексе при нагружении балки её свободный поворот вокруг внутренних верхних ребер опорных пластин, что соответствует условиям эксперимента.

Также обязательными условиями для задания геометрии в ПК «*ANSYSWorkbench*» является наличие разделительных граней между соприкасающимися твердотельными элементами (разными «солидами»), имеющими разный материал (например, между стальными грузовыми пластинами и бетоном), а также моделирование арматуры линейными «балочными» элементами с назначенным круглым сечением, которое соответствует принятому диаметру арматуры натуральных образцов.

Описание действия	Алгоритм выполнения команд в интерфейсе ПК « <i>ANSYSWorkbench</i> »
1. Создание расчетного файла и расчетного случая	<p>При открытии программы «<i>Workbench</i>»слева в древовидном меню «<i>Toolbox</i>» в разделе «<i>AnalysisSystems</i>»находим расчетный случай, соответствующий статической постановке задачи механики твердого тела - «<i>StaticStructural</i>».</p> <p>Двойнымщелчкомпо значку «<i>StaticStructural</i>»переносим расчетный случай (задачу) в правую основную область, отвечающую за связь между разными задачами в рамках единого файла - «<i>ProjectSchematic</i>».</p>

При необходимости изменяем наименование расчетной задачи с использованием правой кнопки мыши выбором в контекстном меню кнопки «*Rename*».

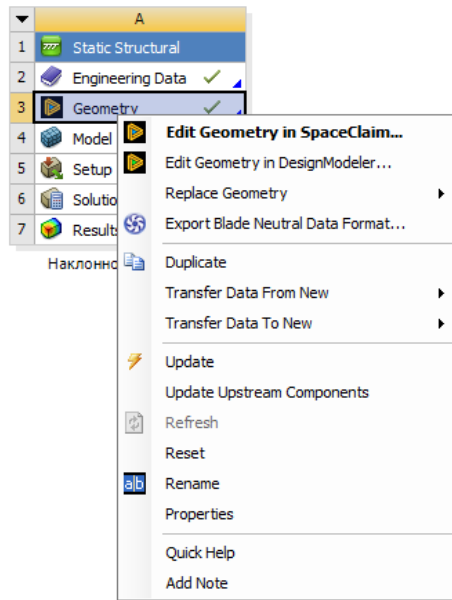


2. Создание геометрии расчетной модели

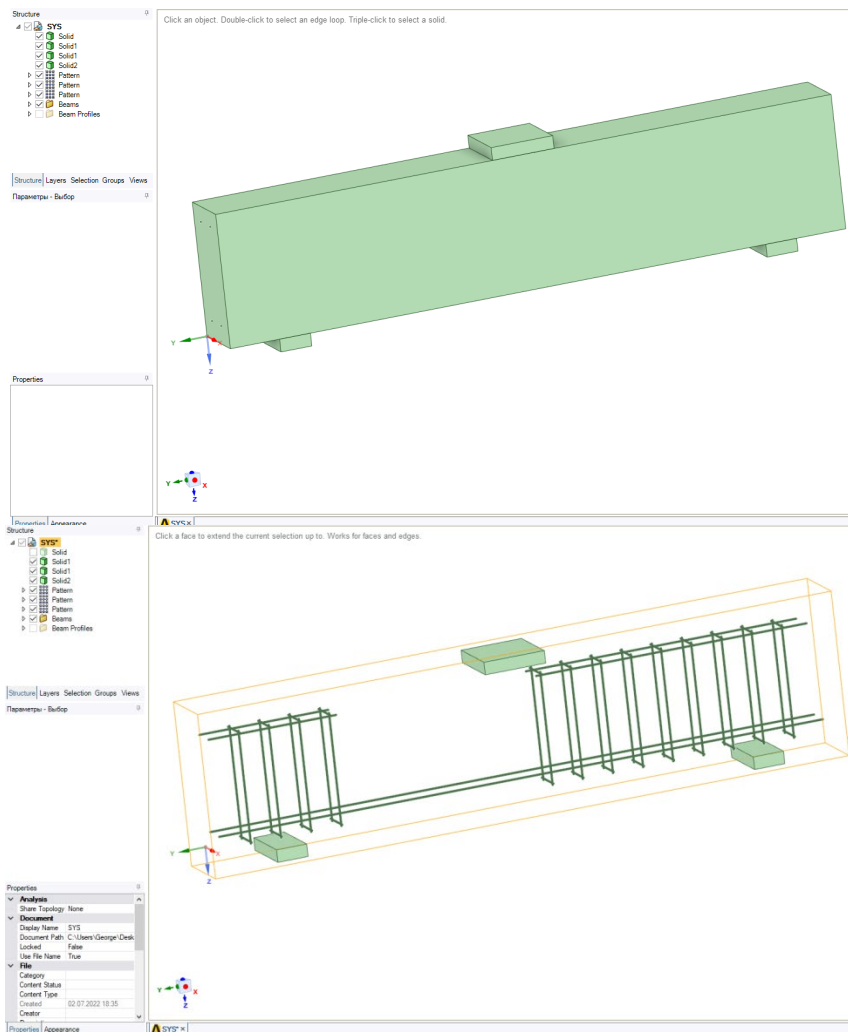
При нажатии правой кнопкой мыши по значку «3.Geometry» в основном окне Workbench(в ранее созданной расчетной задаче) в контекстном меню выбираем один из двух встроенных инструментов для создания геометрии модели: «*SpaceClaim*» или «*DesignModeler*». Рекомендуется использование более современного инструмента «*SpaceClaim*».

Примечание:

Создание геометрии производится различными способами, как встроенными инструментами Workbench, так и путем импорта файлов различных общепризнанных форматов для передачи и переноса геометрии(.ifc и т.п.). В данном пособии алгоритм задания геометрии расчетной схемы ввиду различных способов ее создания, не рассматривается.



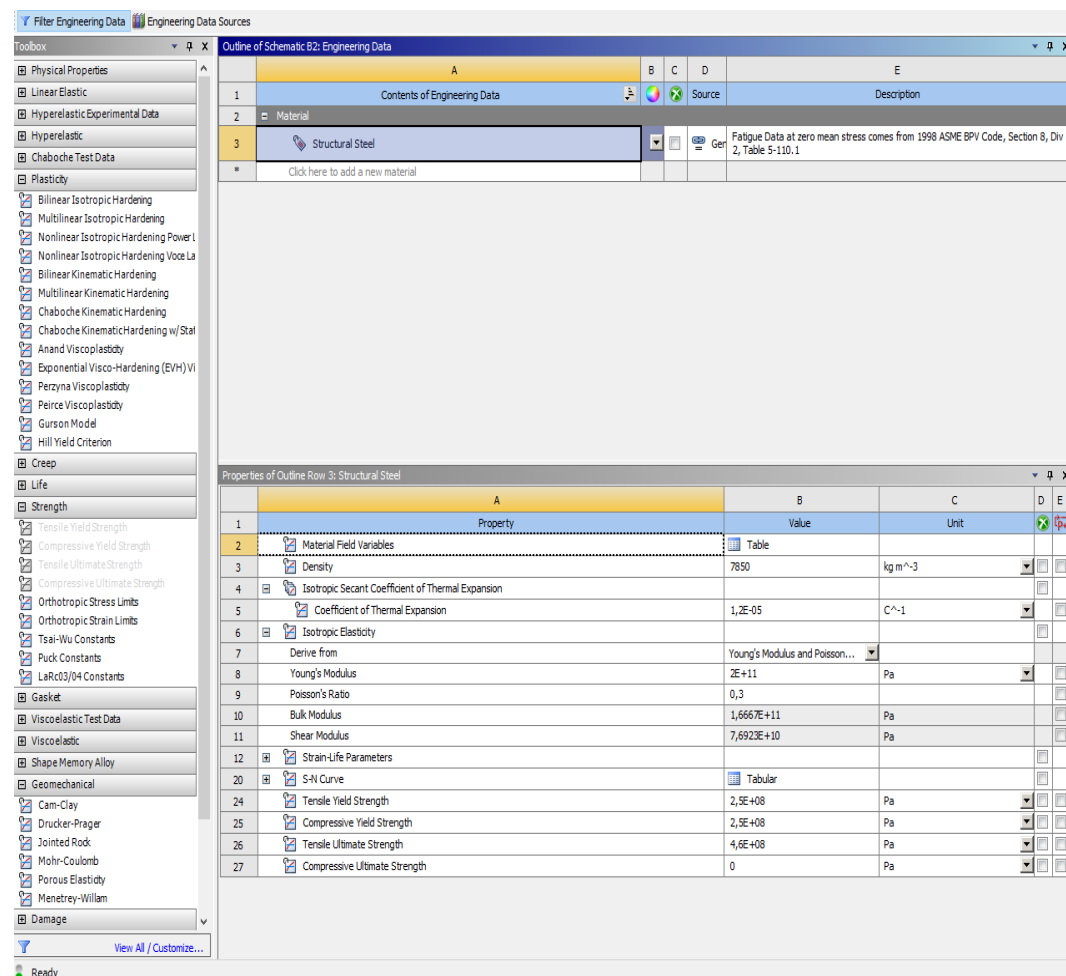
Если геометрия создана верно, напротив кнопки «3.Geometry» в окне задачи справа появляется ✓. После создания геометрии в окне«*SpaceClaim*»:



Здесь стоит отметить, что для арматуры в виде балочных элементов обязательно задается сечение с указанием радиуса или диаметра арматуры (задается параметр *BeamProfiles* в древовидном меню слева).

3. Добавление физически нелинейных моделей материалов бетона и арматуры

При нажатии двойным щелчком мыши по значку «2. *EngineeringData*» в основном окне Workbench(в ранее созданной расчетной задаче)попадаем в библиотеку используемых в данной задаче материалов.



Слева в древовидном меню «*Toolbox*» располагаются все доступные к применению математические модели описания для активного материала. В верхней центральной части расположен список используемых в данной задаче материалов. В нижней центральной части расположены физико-механические параметры для описания выбранного активного материала.

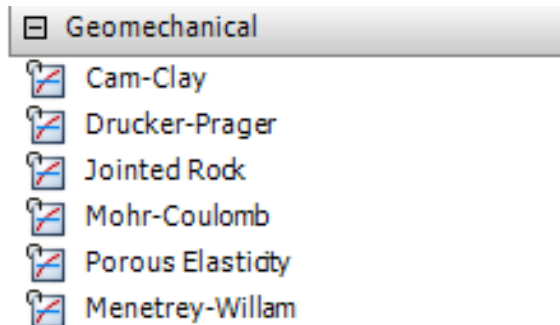
Заходим в полную библиотеку доступных материалов – «*EngineeringDataSources*». В верхнем центральном открывшемся меню находим и выбираем нажатием клавиши библиотеку «*GeneralNon-linearMaterials*». В меню ниже напротив материалов «*ConcreteNL*»и «*StructuralSteelNL*»в столбце «Add»нажимаем

После добавления данных выбранных материалов в расчетную задачу рядом с появляется значок .

Закрываем полную библиотеку материалов повторным нажатием по радио-кнопке «*EngineeringDataSources*».

4. Задание численного описания материала бетона

Из основного списка применяемых в задаче материалов выбираем щелчком мыши материал «ConcreteNL». Слева в древовидном меню «Toolbox» выбираем и раскрываем раздел «Geomechanical»:



Далее двойным щелчком мыши добавляем модель «Menetrey-Willam» к описанию модели бетона:

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	3E+10	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,18		
8	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength		Pa	
13	Uniaxial Tensile Strength		Pa	
14	Biaxial Compressive Strength		Pa	
15	Dilatancy Angle		radian	

При нажатии на строку №10 в нижнем центральном окне, отвечающему за задание параметров материала, слева в древовидном меню «Toolbox» двойным щелчком мыши выбираем модель разупрочнения «Softening». Далее строке № 17 «ActiveTable» меняем «Linear» на «Exponential».

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	3E+10	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,18		
8	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength		Pa	
13	Uniaxial Tensile Strength		Pa	
14	Biaxial Compressive Strength		Pa	
15	Dilatancy Angle		radian	
16	Softening			
17	Active Table	Exponential		
18	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength			
19	Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening			
20	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening			
21	Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening			
22	Residual Compressive Relative Stress			
23	Mode 1 Area Specific Fracture Energy		N m ⁻¹	
24	Residual Tensile Relative Stress			

Заполняем необходимые значения для математического описания модели бетона на основании п.1.1 раздела 1 данного пособия:

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2400	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	34946	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,2		
8	Bulk Modulus	1,9414E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,4561E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength	29	MPa	
13	Uniaxial Tensile Strength	2,19	MPa	
14	Biaxial Compressive Strength	34,8	MPa	
15	Dilatancy Angle	14	degree	
16	Softening			
17	Active Table	Exponential		
18	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength	0,001834		
19	Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,003254		
20	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening	0,2		
21	Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,85		
22	Residual Compressive Relative Stress	0,2		
23	Mode 1 Area Specific Fracture Energy	253	N m ⁻¹	
24	Residual Tensile Relative Stress	0,01		



5. Задание численного описания материала арматуры

Из основного списка применяемых в задаче материалов выбираем щелчком мыши материал «*StructuralSteelNL*».

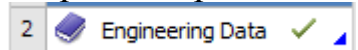
Properties of Outline Row 5: Structural Steel NL				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	2E+11	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
10	Bilinear Isotropic Hardening			
11	Yield Strength	2,5E+08	Pa	
12	Tangent Modulus	1,45E+09	Pa	

В нижнем окне заполняем необходимые значения для математического описания модели арматурной стали на основании п.1.2 раздела 1 данного пособия:

Properties of Outline Row 5: Structural Steel NL				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C ⁻¹	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
8	Young's Modulus	2E+05	MPa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
12	Bilinear Isotropic Hardening			
13	Yield Strength	500	MPa	
14	Tangent Modulus	727	MPa	

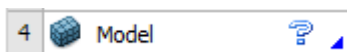
Сохраняем введенные данные в библиотеку материалов задачи нажатием  в верхнем левом углу окна «Workbench». Закрываем окно библиотеки материалов нажатием крестика  **A2:Engineering Data**, возвращаясь в основное меню «Workbench».

В основном меню при примененных параметрах материалов напротив строки №2 в меню к расчетной задаче ставится галочка



6. Задание материалов для созданной геометрии модели

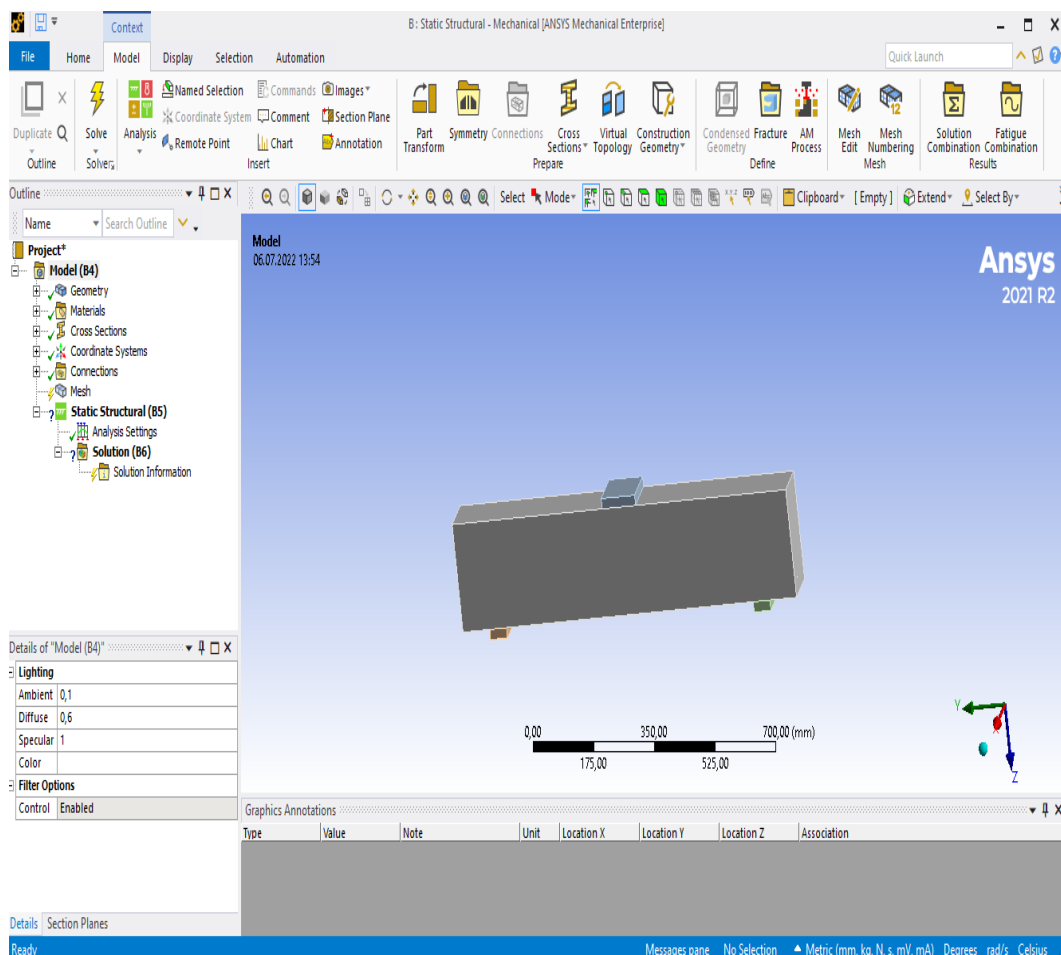
Выбираем двойным нажатием мыши в основном меню «Workbench» в окне расчетной задачи значок «Model»:




После некоторого времени, программа открывает дополнительное окно для дальнейшего моделирования текущей задачи – интерфейс для «Mechanical-APDL».

В древовидном меню слева («Outline») располагаются вкладки с основными параметрами модели, чуть ниже – поля для их подробного редактирования. В верхней части расположено ленточное меню с основными инструментами для работы с моделью.

В центральной части располагается сама расчетная модель с заранее заданной геометрией:



Слева в древовидном меню «*Outline*» раскрываем список во вкладке  *Geometry* .

Нажимая на каждый отдельный набор геометрии во вкладке «*Geometry*» справа в основном окне модели зеленым цветом выделяется выбранный набор геометрии.

Выбираем в списке «*Geometry*» основное тело балки. Снизу слева в поле для редактирования параметров «*Detail of SYS/Solid*» находим вкладку «*Material*» и в строке напротив «*Assignment*» выбираем ранее заданный материал «*ConcreteNL*». Удостоверяемся, что напротив следующей строки «*Nonlinear Effects*» стоит значение «*Yes*».

Выбираем в списке «*Geometry*» солиды – грузовые и опорные пластины и задаем им через вкладку «*Material*» в строке напротив «*Assignment*» стандартный материал «*Structural Steel*».

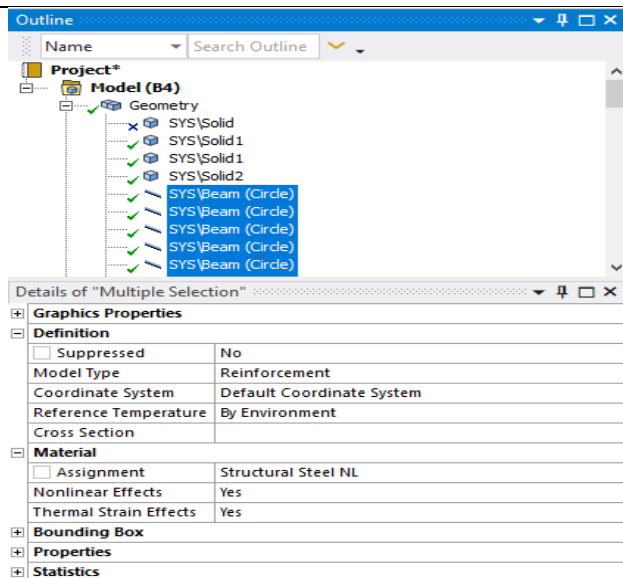
Выбираем в списке «*Geometry*» все балочные (линейные) элементы смоделированной ранее арматуры (путем зажатия клавиши Shift и поочередного выбора первого и последнего элемента).

Снизу слева в поле для редактирования параметров «*Detail of Multiple Selection*» находим вкладку «*Material*» и в строке напротив «*Assignment*» выбираем ранее заданный материал «*Structural SteelNL*». Удостоверяемся, что напротив следующей строки «*Nonlinear Effects*» стоит значение «*Yes*».

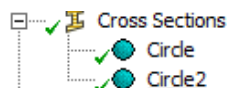
В поле для редактирования параметров «*Detail of Multiple Selection*» находим вкладку «*Definition*» и в строке напротив «*Model Type*» заменяем стандартный тип элемента «*Beam*» на «*Reinforcement*».

Примечание:

При использовании версий ПК «*ANSYS Workbench*» до 2021 R1, параметр «*Reinforcement*» в «*Model Type*» отсутствует. Для смены типа конечных элементов с балочного на армирующий в этом случае требуется вставка команды на внутри программном языке APDL.



Слева в древовидном меню «*Outline*» в открытой вкладке «*CrossSection*» проверяем наличие заранее заданных сечений арматурных стержней:

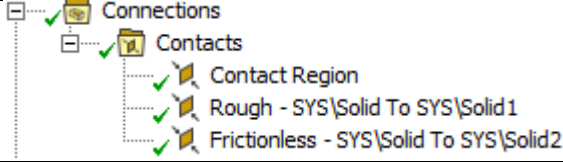

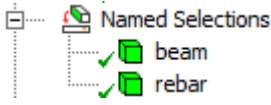

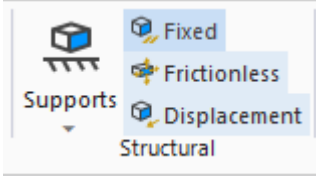


7. Задание контактов между грузовыми, опорными площадками и телом балки

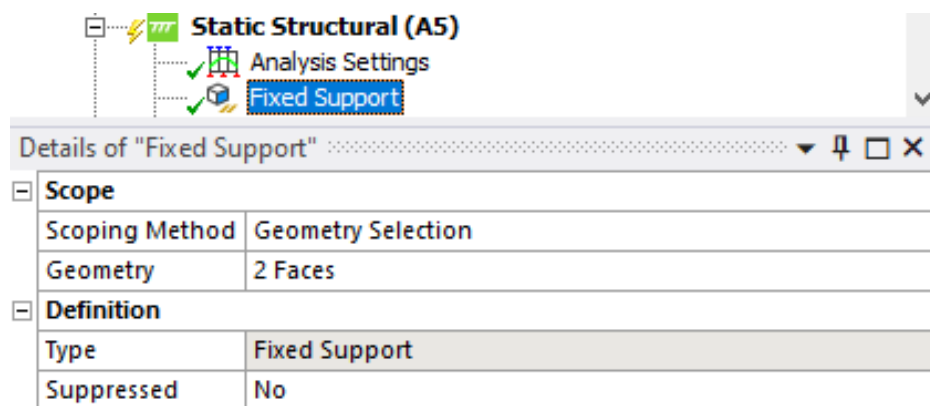
Слева в древовидном меню «*Outline*» в открытой вкладке «*Connections*»>«*Contacts*» выбираем контакт между верхней грузовой пластиной и верхней гранью балки (справа в основном виде с геометрией модели красным и синим цветом выделяются выбранные контактные поверхности). Для выбранного контакта в нижнем меню «*Detailsof «ContactRegion»*» во вкладке «*Definition*» в строке напротив «*Type*» проверяем выставленное значение «*Bonded*» (абсолютно жесткое сопряжение контактных поверхностей).

Далее в той же вкладке «*Contacts*» выбираем контакт между левой опорной пластиной и нижней гранью балки. В нижнем меню «*Detailsof «ContactRegion»*» в вкладке «*Definition*» в строке напротив «*Type*» меняем значение на «*Frictionless*» (контакт, допускающий как отрыв поверхностей друг от друга, так и проскальзывание поверхностей без трения – данный контакт моделирует шарнирно-подвижную опору балки при испытании).

В той же вкладке «*Contacts*» выбираем контакт между правой опорной пластиной и нижней гранью балки. В нижнем меню «*Detailsof «ContactRegion»*» во вкладке «*Definition*» в строке напротив «*Type*» меняем значение на «*Rough*» (контакт, допускающий отрыв поверхностей, но запрещающий их какое-либо проскальзывание - данный контакт моделирует шарнирно-неподвижную опору балки при испытании).

	
<p>8. Создание именованных наборов для бетона и арматуры балки</p>	<p>Для дальнейшего удобства анализа результатов расчета создадим две именованные выборки («<i>NamedSelections</i>») для бетона и армирования балки.</p> <p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» раскрываем список во вкладке  <i>Geometry</i> .</p> <p>В списке находим солид(тело) балки, нажимаем правой кнопкой мыши и в контекстном меню выбираем пункт «<i>CreateNamedSelection</i>», во всплывшем окне вводим наименование выборки (допустим «<i>beam</i>»).</p> <p>В том же списке с геометрией находим все линейные элементы, моделирующие армирование балки (для выбора всех элементов используем зажатую кнопку Shift), нажимаем правой кнопкой мыши на любом из выбранных элементов и в контекстном меню выбираем пункт «<i>CreateNamedSelection</i>», во всплывшем окне вводим наименование выборки (допустим «<i>rebar</i>»).</p> <p>После создания именованных выборок в древовидном меню «<i>Outline</i>» появляется новая вкладка:</p> 
<p>9. Задание граничных условий</p>	<p>Так как фактические условия опирания балки, соответствующие эксперименту, в данной задаче моделируются свойствами контактных поверхностей, то для задания граничных условий достаточно жестко закрепить по всем направлениям нижние поверхности опорных стальных пластин.</p> <p>Для этого слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» нажимаем на заголовок вкладки  <i>Static Structural (A5)</i> .</p> <p>При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «<i>Environment</i>».</p> <p>В данной вкладке для задания закреплений расчетной области выбираем в разделе «<i>Structural</i>» вид закрепления – «<i>Fixed</i>»:</p> 

Слева в древовидном меню «*Outline*» в вкладке «*StaticStructural*» появляется параметр «*FixedSupport*». При нажатии на него в нижнем меню «*Details of «FixedSupport»*» необходимо нажать на строчку «*Geometry*», после чего в основном меню с геометрией модели необходимо выбрать (через Ctrl) две нижние плоскости опорных стальных пластин, после чего в той же строчке «*Geometry*» в древовидном меню необходимо нажать на радио-кнопку «*Apply*», подтвердив свой выбор:



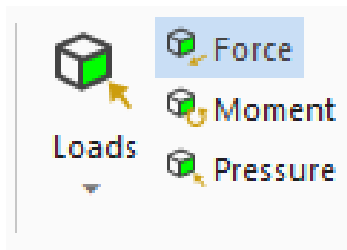
10. Задание условий нагружения конструкции

В качестве условия для нагружения конструкции используем силу, приложенную к верхней поверхности стальной грузовой пластины (использование давления по нагружающей поверхности – «*Pressure*» не рекомендуется).

Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки **Static Structural (A5)**.

При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Environment*».

В данной вкладке для задания нагружения балки выбираем нажатием – «*Force*»:

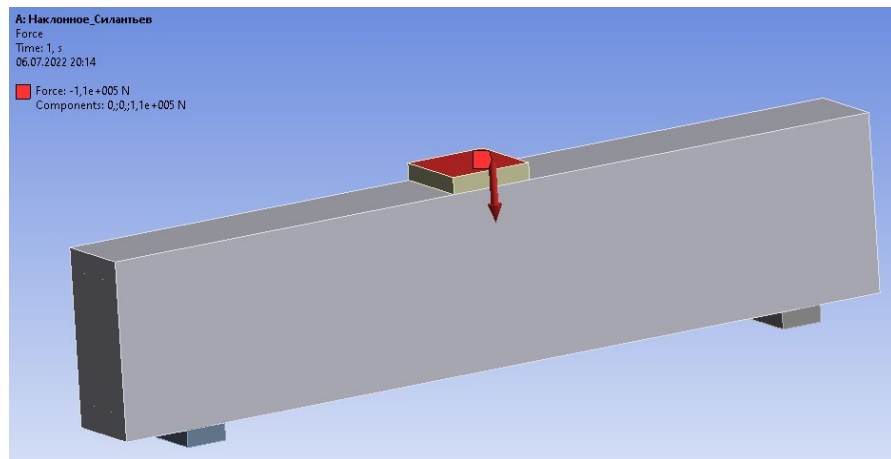


После этого слева в древовидном меню «*Outline*» в вкладке «*StaticStructural*» появляется параметр «*Force*». При нажатии на него в нижнем меню «*Detailsof «Force»*» необходимо нажать на строчку «*Geometry*», после чего в основном меню с геометрией модели необходимо выбрать верхнюю плоскость грузовой пластины, после чего в той же строчке «*Geometry*» в древовидном меню необходимо нажать на радио-кнопку «*Apply*», подтвердив свой выбор.

Далее в том же меню «*Detailsof«Force»*» напротив строки «*Magnitude*» необходимо ввести значение приложенной силы (в данной задаче рекомендуется значение – 110 000 Н (110 кН)).


После задания численного значения силы в основном окне справа появляется стрелка с направлением приложения силы, а также выделяется цветом площадка приложения нагрузки:

Details of "Force"	
<input type="checkbox"/> Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
<input type="checkbox"/> Definition	
Type	Force
Define By	Vector
Applied By	Surface Effect
<input type="checkbox"/> Magnitude	-1,1e+005 N (ramped)
Direction	Click to Change
Suppressed	No




При необходимости изменения направления нагрузки, необходимо изменить знак при указании значения силы на противоположный.

11. Задание настроек и создание сетки объемных конечных элементов


Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  Mesh.

При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Mesh*».

В данной вкладке нажимаем на значок «*Method*».

После этого слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*Mesh*» появляется параметр «*Automatic Method*». Нажимаем на него. В основном окне с геометрией модели выделяем все тела рамкой (при этом сверху должен быть выбран метод выделения - ). Слева в нижнем меню «*Detail of Method*» подтверждаем выбор геометрии радио-кнопкой «*Apply*».


Далее в этом же меню во вкладке «*Definition*» в строчке «*Method*» меняем метод разбивки сетки КЭ на «*MultiZone*». В раскрывшихся настройках изменяем параметр «*Element Order*» на «*Quadratic*».

Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  Mesh.

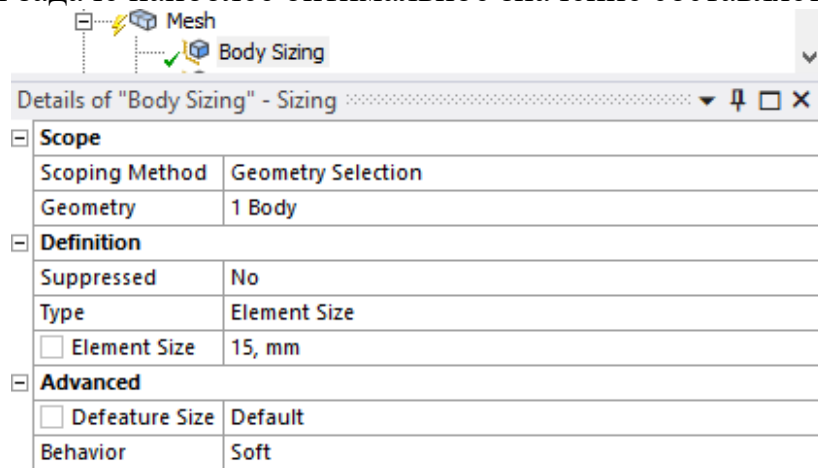
При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Mesh*».

В данной вкладке нажимаем на значок «*Sizing*».

Данный параметр появляется во вкладке «*Mesh*» древовидного меню слева.


Нажав на параметр «*Body Sizing*» в нижнем меню «*Details of Body Sizing*» и далее на строку «*Geometry*» слева в основном окне выбираем все элементы рамкой с включенной радиокнопкой , подтверждаем выбор всех тел нажав на радио-кнопку «*Apply*».


В этом же меню во вкладке «*Definition*» задаем значение размера грани объемных конечных элементов в поле «*Element Size*» (в данной задаче наиболее оптимальное значение составляет 15 мм):



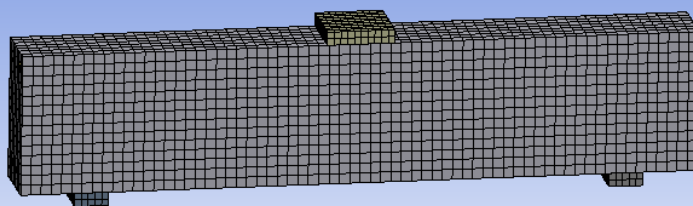
Примечание

Размер конечного элемента стоит задавать таким образом, чтобы по высоте сечения конструкция разбивалась не менее, чем на 8 конечных элементов (в нашем случае – 14 КЭ). При этом величину грани конечного элемента не стоит задавать меньше среднего размера заполнителя бетона.

Производим разбивку геометрии модели на конечные элементы нажав правой кнопкой мыши на заголовок вкладки  Mesh и в контекстном меню выбрав действие - «*Generate Mesh*».

Общее число узлов и конечных элементов в задаче можно увидеть, нажав на заголовок вкладки  Mesh и в нижнем меню раскрыв самый нижний параметр «*Statistics*»:

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	34762
<input type="checkbox"/> Elements	7398



0,00 200,00 400,00 (mm)



12. Задание настроек нелинейного решателя

Ниже приведен алгоритм основных настроек нелинейного решателя, однако, необходимо помнить, что данные настройки могут существенно изменяться в зависимости от типа рассматриваемой задачи.

Слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*StaticStructural*» нажимаем на параметр, отвечающий за настройки решателя – «*AnalysisSettings*».

Внижнем меню «*Details of AnalysisSettings*» во вкладке «*StepControls*» изменяем значение параметра «*AutoTimeStepping*» на «*On*», далее заполняем раскрывшиеся настройки следующим образом:

Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	100,
Minimum Substeps	100,
Maximum Substeps	2000,

Переходим в следующую вкладку «*SolverControls*», где меняем параметр «*SolverType*» на «*Direct*» (прямой метод решения). Также включаем возможность расчета при больших деформациях, изменяя параметр «*LargeDeflection*» на «*On*».


Переходим в следующую вкладку «*NonlinearControls*», где изменяем тип нелинейного решателя на несимметричный решатель Ньютона-Рафсона (в первом параметре выставляем «*Unsymmetric*»).

Далее отключаем все возможные типы отслеживания (контроля) сходимости решателя (переводя их в режим «Remove»или «Off»), за исключением отслеживания сходимости по перемещениям (для этого напротив «DisplacementConvergence»выставляем «On»). Значение погрешности сходимости в 0,5% в данной задаче является достаточным (в некоторых расчетных случаях используется значение ниже, допустим – 0,1 %):

Nonlinear Controls	
Newton-Raphson Option	Unsymmetric
Force Convergence	Remove
Moment Convergence	Remove
Displacement Convergence	On
--Value	Calculated by solver
--Tolerance	0,5%
--Minimum Reference	0, mm
Rotation Convergence	Remove
Line Search	Off
Stabilization	Off

13. Создание шаблонов для вывода основных результатов расчета

Для получения результатов по внутренним параметрам НДС конструкции необходимо создать основные шаблоны результатов.

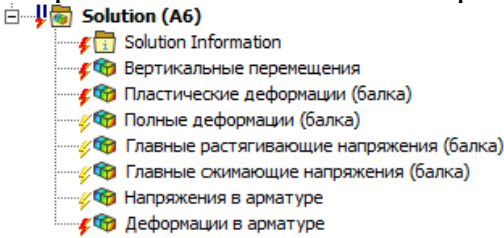


Для этого слева в древовидном меню «Outline» нажимаем на заголовок вкладки  Solution (A6). При нажатииданной заголовка сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «Solution»:

Раскрываемвкладку «Deformation» ивыбираем «Directional Deformation». Внижнемменю «Detailsof «DirectionalDeformation» вовкладке «Definition» встроке «Orientation» выбираемнаправление, соответствующеевертикальномуупрогибубалки (вданномслучаеглобальнаяосьZ).

Таким же образом выполняем следующие операции:

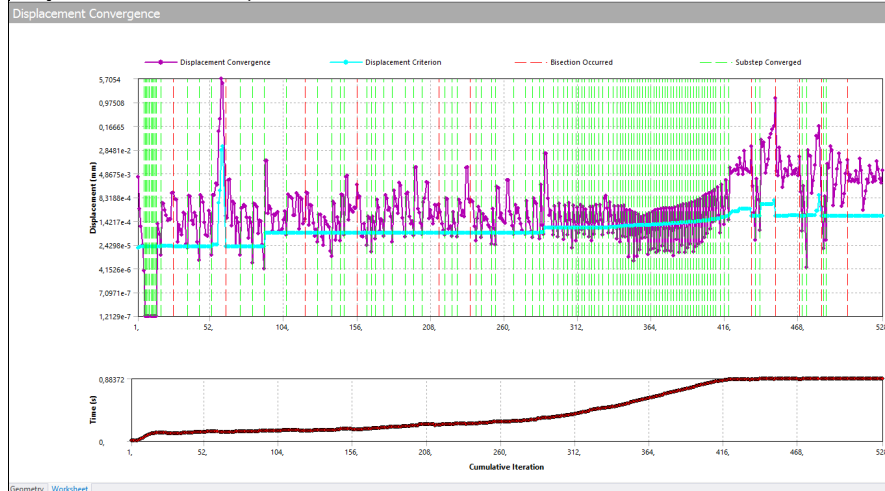
«Solution» >«Strain»>«Equivalent Plastic Strain»;
 «Solution» >«Strain»>«Equivalent Total Strain»;
 «Solution» >«Stress»>«Maximum Principal Stress»;
 «Solution» >«Stress»>«Minimum Principal Stress»;
 «Solution» >«Stress»>« Equivalent(von-Mises) Stress»;
 «Solution» >«Strain»>«Equivalent Total Strain».

Для 1-4 шаблона результатов в нижнемменю во вкладке «Scope» в строке «ScopingMethod»задаем параметр «NamedSelection», а ниже в появившейся строке «NamedSelection» выбираемранее созданную именованную выборку – «beam».

	<p>Для 5-6 шаблона результатов в нижнем меню во вкладке «Scope» в строке «ScopingMethod» задаем параметр «NamedSelection», а ниже в появившейся строке «NamedSelection» выбираем ранее созданную именованную выборку – «rebar».</p> <p>Для удобства изменяем наименование шаблонов, используя правую кнопку мыши и в контекстном меню нажав на «Rename».</p> <p>После создания и переименования шаблонов результатов:</p> 
<p>14. Запуск задачи на расчет</p>	<p>Слева в древовидном меню «Outline» нажимаем правой кнопкой мыши на  Solution (A6).</p> <p>В открывшемся контекстном меню запускаем задачу на расчет, нажав на  Solve.</p>
<p>15. Отслеживание сходимости расчета в процессе решения задачи</p>	<p>Для отслеживания процесса сходимости нелинейного шагово-итерационного решателя во время выполнения расчета используется два основных инструмента:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. log-файл протокола расчета, обновляемый по ходу самого расчета: <p>Слева в древовидном меню «Outline» во вкладке «Solution» необходимо нажать на «SolutionInformation» с параметром в строкенижнего меню «SolutionOutput» - «SolverOutput» (сходимость на представленном, к примеру, подшаге («Substep») нагружения достигнута за 3 итерации):</p> <pre> FORCE CONVERGENCE VALUE = 152.5 CRITERION= 26.25 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.3555E-03 CRITERION= 0.5833E-04 EQUIL ITER 1 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 0.3555E-03 FORCE CONVERGENCE VALUE = 245.6 CRITERION= 26.26 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.8394E-04 CRITERION= 0.5833E-04 EQUIL ITER 2 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 0.8394E-04 FORCE CONVERGENCE VALUE = 23.31 CRITERION= 26.26 <<< CONVERGED DISP CONVERGENCE VALUE = 0.2435E-04 CRITERION= 0.5833E-04 <<< CONVERGED EQUIL ITER 3 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC = 0.2435E-04 >>> SOLUTION CONVERGED AFTER EQUILIBRIUM ITERATION 3 *** LOAD STEP 1 SUBSTEP 37 COMPLETED. CUM ITER = 254 *** TIME = 0.267966 TIME INC = 0.750000E-02 *** MAX PLASTIC STRAIN STEP = 0.1021E-03 CRITERION = 0.1500 *** AUTO TIME STEP: NEXT TIME INC = 0.10000E-01 INCREASED (FACTOR = 1.3333) </pre>

2. Отслеживание сходимости итерационного решения в виде графика:

Слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*Solution*» необходимо нажать на «*Solution Information*» и изменить параметр в строкенижном меню «*Solution Output*» на «*Displacement Convergence*» (отслеживание сходимости по перемещениям):



Голубыми линиями и точками на графике показан критерий сходимости (0,5 %). Фиолетовыми точками, соединенных линиями, показана каждая итерация решения. Общее число итераций, выполненных в ходе расчета, показано на графике по оси снизу – в правом углу. Вертикальными зелеными пунктирными линиями отмечаются итерации, на которых достигнута сходимость решателя для каждого подшага нагружения. Вертикальными красными пунктирными линиями отмечаются подшаги, на которых не достигнута сходимость и для продолжения решения потребовалось дополнительно поделить приращение нагрузки на данном подшаге нагружения в 2 раза.

Ход решения в процентах от заданного силового нагружения также показывается в нижнем левом углу основного окна «*Mechanical*».

16. Анализ результатов расчета

После завершения процесса расчета (время выполнения расчета на компьютере с 6 физическими ядрами и 12 потоками составило 32 min 58 s) переходим в режим анализа результатов во вкладку «*Solution*» древовидного меню «*Outline*».

При нажатии на заголовок вкладки «*Solution*» в нижнем правом списке «*Tabular Data*» необходимо опуститься вниз для определения разрушающей нагрузки на образец, составляющую долю от заданной нагрузки:

Tabular Data			
	Time [s]	Step	Substep
96	0,85797	1.	96.
97	0,86797	1.	97.
98	0,87247	1.	98.
99	0,87697	1.	99.
100	0,87833	1.	100.
101	0,8797	1.	101.
102	0,8802	1.	102.
103	0,8807	1.	103.
104	1.	1.	1.e+006

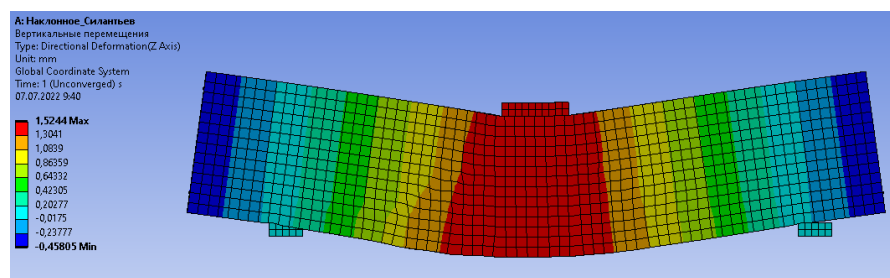
Как видно из таблицы, последним сошедшимся подшагом («Substep») расчета, который соответствует разрушению конструкции, является подшаг № 103.

Так как нагружение образца задается по линейному закону, то предпоследнее значение в столбце «Time (s)» представляет собой несущую способность балки в долях от полной (ранее заданной в п. 10) нагрузки на образец:

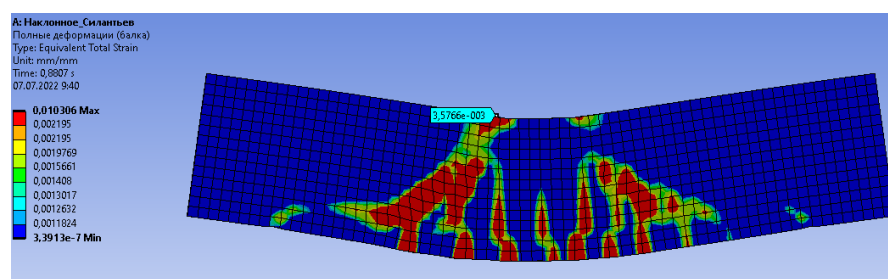
$$P_{ult} = 0,8807 \cdot P = 0,8807 \cdot 110 = 96,87 \text{ кН.}$$

Ниже приведем основные результаты расчета:

1. «Solution» > «Вертикальные перемещения»:

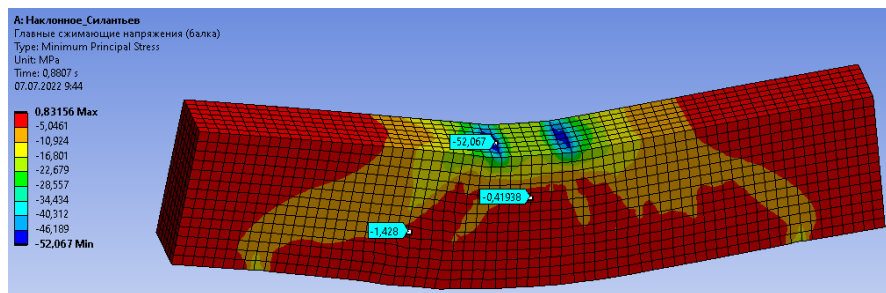


2. «Solution» > «Полные деформации (балка)»:

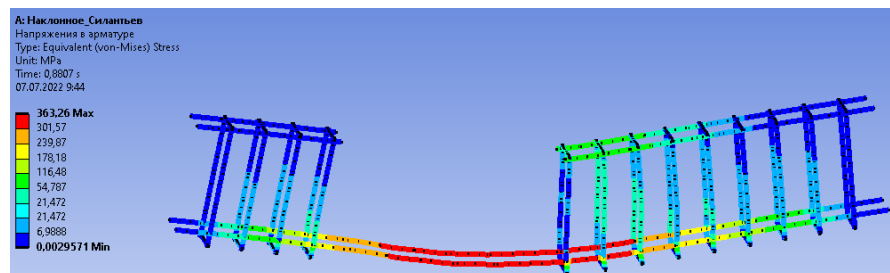


(значение относительных деформаций бетона в зоне разрушения – в зоне раздробления бетона сжатой зоны у края грузовой пластины составляет $\varepsilon_{b,ult} = 0,00358$)

3. «Solution» > «Главные сжимающие напряжения (балка)»:



4. «Solution» > «Напряжения в арматуре»: (площадка текучести в арматуре не достигнута)



5.2. Сравнение результатов эксперимента и численного исследования

Согласно произведенному численному исследованию, разрушающая нагрузка на балку соответствует значению **96,87 кН**, что практически точно совпадает с экспериментальным значением разрушающей нагрузки на образец (см. табл. 5.2). Погрешность в определении несущей способности составляет:

$$\Delta = \frac{96,94 - 96,87}{96,94} \cdot 100\% = 0,07\%$$

Несущая способность балки по наклонному сечению составила:

$$Q_{ult} = Q_b = 48,43 \text{ кН.}$$

Ниже на рис. 5.3 приведено сравнение характера трещинообразования численной модели балки и натурального образца.

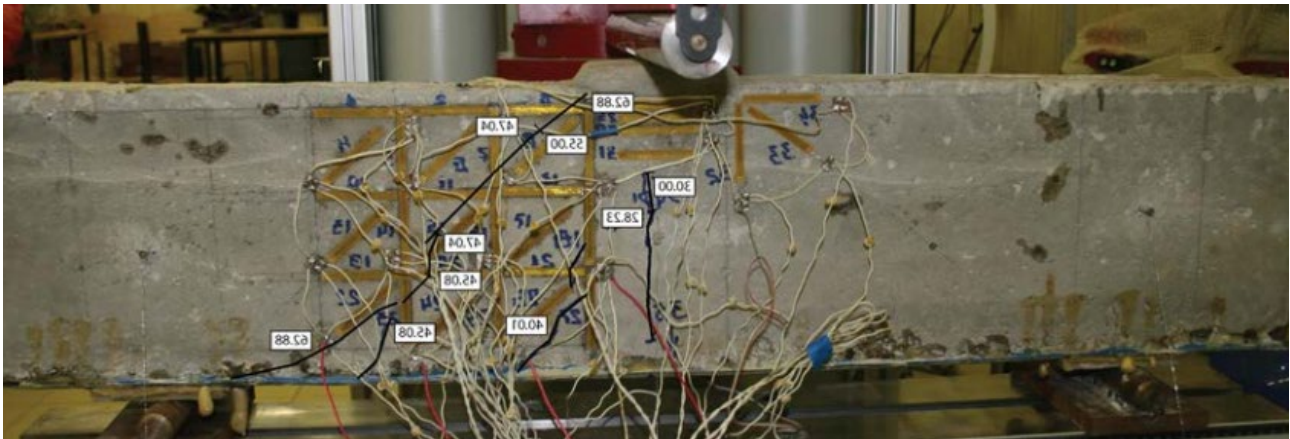
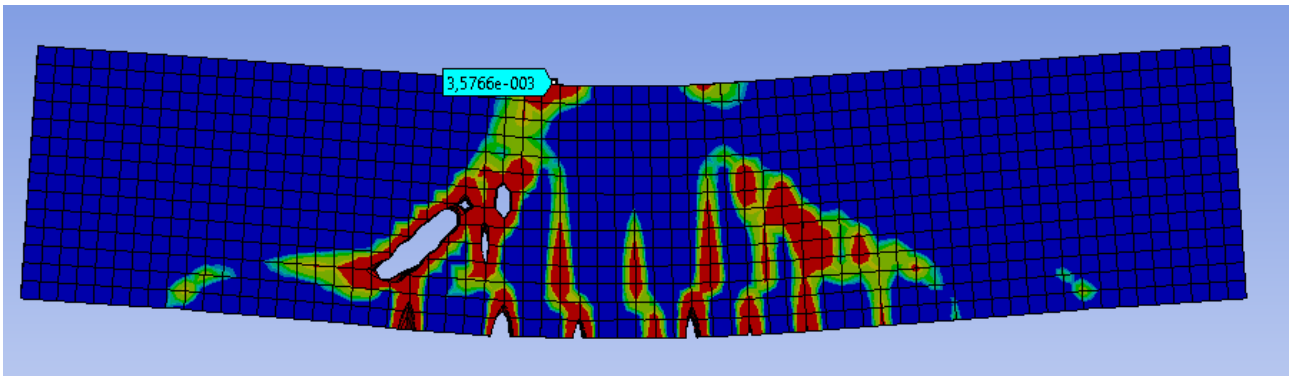


Рис. 5.3. Сравнение характера трещинообразования в растянутой зоне бетона

Полученные результаты расчета численными методами хорошо согласуются с научными основами сопротивления железобетонных балок действию поперечных сил [12, 19, 23 - 30, 31, 32, 34, 38 - 44, 47, 71, 82]

При $c_0/h_0 > 2,5$, как позволяет оценить метод контроля гистерезисных потерь [19, 20–22, 78, 79], еще до образования наклонных трещин, на термограммах балок выделяется траектория наибольших главных сжимающих напряжений,

положение которой связано не с точками приложения действующих на элемент внешних усилий и реакций опор (местное возмущение напряженного состояния ощутимо только вблизи этих точек и они незначительны), а с внутренними силовыми факторами,

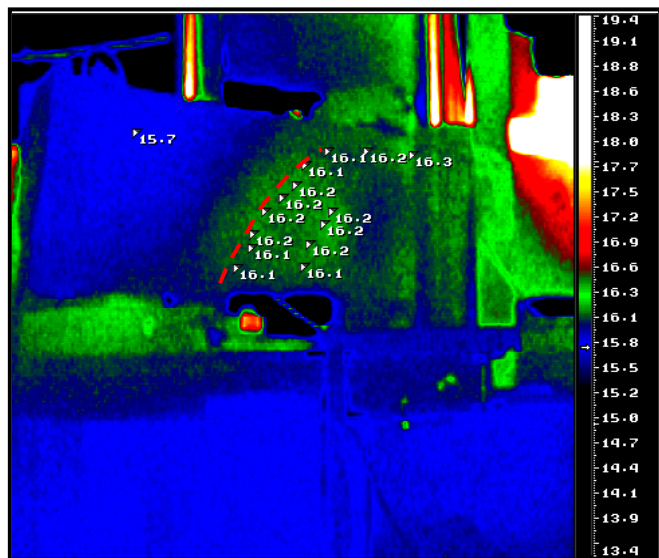


Рис. 5.4. Термограмма железобетонной балки при $c_0/h_0 > 2,5$ перед образованием наклонных трещин

действующими в рассматриваемых по длине опорной зоны сечениях (моментами и поперечными силами). На рис. 5.4 дано тепловизионное изображение балки с большим пролетом среза. Еще до образования наклонных трещин в приопорной зоне, в бетоне сжатой зоны зеленым цветом выделяется полоса более высоких напряжений, т.е. область, в пределах которой происходит концентрация напряжений в сжатой зоне балки. Высота этой полосы составляет примерно $0,20h_0$, т.е. концентрация напряжений в сжатой зоне балки происходит не в пределах всей высоты сжатой зоны, а только в пределах её определенной части, равной примерно $(0,4-0,5) \cdot x$, где x -высота сжатой зоны балки. С увеличением количества циклов нагружения в растянутой зоне балки, внутри зоны наибольших напряжений, которая выделилась зеленым цветом, образовалась критическая наклонная трещина (на рис. 5.4) траектория критической наклонной трещины показана красной пунктирной линией, по которой в конечном итоге и произошло разрушение балки по наклонному сечению. После образования критической наклонной трещины вдоль траектории наибольших главных сжимающих напряжений происходит концентрация напряжений в стержнях поперечной арматуры в местах пересечения с критической наклонной трещиной, а в бетоне сжатой зоны размеры полосы концентрации напряжений остаются такими же, как до образования критической наклонной трещины. Поэтому на термограмме балок с относительным пролетом среза $c_0/h_0 > 2,5$, полученной после приложения циклической нагрузки (рис. 5.5) эти места в поперечной арматуре и область концентрации напряжений в бетоне над критической наклонной трещиной нагреваются и за счет этого выделяются от менее нагруженных областей. При этом следует отметить, что температурные аномалии в поперечной арматуре проявляются даже сквозь толщу защитного слоя бетона, т.е. внутри элемента (на поверхности арматуры) температура гораздо выше, чем на поверхности балок. Полоса концентрации напряжений в зоне чистого изгиба и под грузовой площадкой горизонтальна, а с перемещением в область совместного действия изгибающего момента и поперечных сил - имеет угол наклона к горизонтали. Внутри полосы наибольших температур (напряжений) в сжатой зоне над

критической наклонной трещиной, распределение температур, а следовательно и напряжений неоднородно – по ширине полосы наибольшие значения находятся на расстоянии $\left(\frac{l}{3} - \frac{l}{2}\right)$ от верхней границы полосы, а с приближением к краям полосы напряжения постепенно уменьшаются; по длине полосы наибольшие значения наблюдаются перед передней кромкой грузовой пластины, в вертикальном сечении, проходящем через нормальную трещину в конце пролета среза.. Принимая в этой связи характер распределения напряжений в балке аналогично распределению температур на термограммах балки особенности напряженно-деформированного состояния и его влияние на характер образования и развития усталостных трещин и характер усталостного разрушения в зоне совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил можно описать следующим образом.

Задолго до образования нормальных и наклонных трещин в глубине пролета среза, тем более до формирования и развития критической наклонной трещины, в нормальном сечении в конце пролета среза, где действует максимальный момент, образуется нормальная трещина. К моменту образования остальных трещин в зоне действия поперечных сил эта нормальная трещина в конце пролета среза развивается на большую высоту, и растянутая зона бетона практически полностью исключается из работы; увеличивается полнота эпюры сжимающих напряжений $\sigma_x^{max}(t)$ и в верхней части этой эпюры начинает образовываться пластический участок, т.е. область (локальная полоса), в пределах которой происходит концентрация напряжений в сжатой

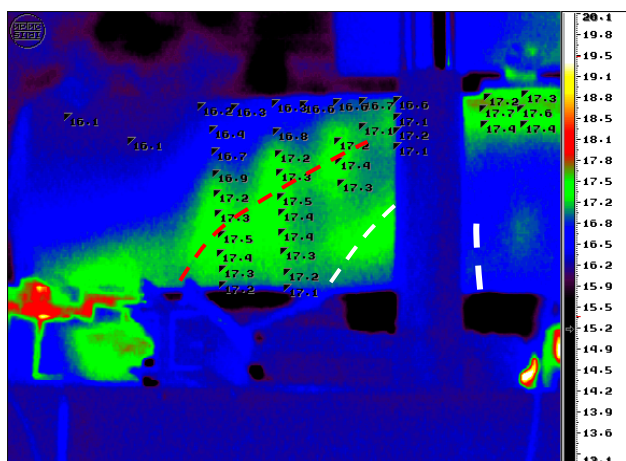


Рис. 5.5. Термограмма железобетонной балки при $c_0/h_0 > 2,5$ после образования наклонных трещин

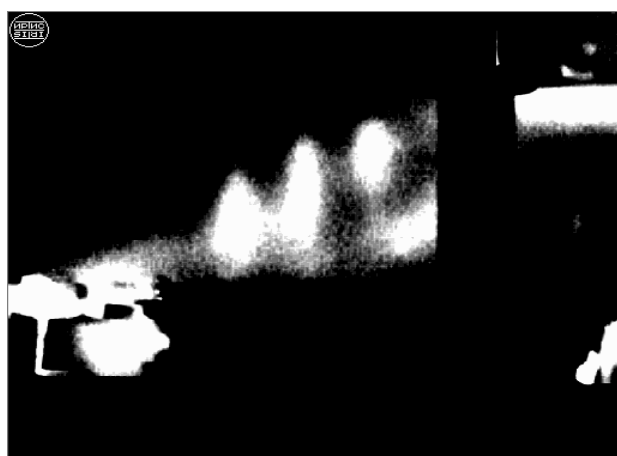


Рис. 5.6. Термограмма железобетонной балки при $c_0/h_0 > 2,5$ перед разрушением

зоне балки. Высота этой полосы составляет примерно $0,20h_0$, т.е. концентрация напряжений в сжатой зоне балки происходит не в пределах всей высоты сжатой зоны, а только в пределах её определенной части, равной примерно $(0,4-0,5)$

высоты сжатой зоны балки (рис. 5.5, 5.6); под грузовой площадкой и в зоне чистого изгиба эта локальная полоса параллельна к продольной оси балки, а с перемещением вглубь пролета среза – имеет угол наклона к продольной оси балки (видимо из-за резкого увеличения касательных напряжений $\tau_{xy}^{max}(t)$ вследствие уменьшения высоты нетреснутой части бетона в этом нормальном сечении с трещиной в конце пролета среза). Очевидно, в нормальном сечении с трещиной в конце пролета среза, где действуют максимальные изгибающий момент и поперечная сила, в пределах пластического участка x_{pl} сжатой зоны (локальной полосы) резко увеличивается равнодействующая N_{R2}^{max} нормальных $N_b^{max} = \int_{A_{pl}} \sigma_x^{max}(t) \cdot dA$ и касательных $Q_b^{max} = \int_{A_{pl}} \tau_{xy}^{max}(t) \cdot dA$ усилий, где A_{pl} – площадь пластического участка сжатой зоны (локальной полосы) в нормальном сечении с трещиной в конце пролета среза и поэтому под воздействием усилия N_{R2}^{max} в сжатой зоне, действующего в пределах ограниченной грузовой площади $\frac{x_{pl}}{\cos \gamma}$, в направлении действия этого усилия возникает наклонный сжимающий силовой поток под углом γ к продольной оси элемента (рис. 5.5-5.7). При этом как показывает распределение температур на поверхности балки, а следовательно и напряжений, напряжения вдоль верхней грани балки в зоне действия поперечных сил меньше, чем внутри локального сжимающего потока в сжатой зоне. С увеличением количества циклов нагружения в растянутой зоне балки, внутри зоны наибольших напряжений, которая выделилась зеленым цветом, образуется критическая наклонная трещина, которая развивается вдоль линии действия главных сжимающих усилий. Характерной особенностью развития трещин нормального отрыва, развивающихся вдоль линии действия сжимающих усилий, является стремление любой, даже первоначально наклонной к линии действия сжимающего усилия, трещины выравнивать свою траекторию в направлении сжатия. Очевидно, поэтому критической стала та наклонная трещина, которая попала в зону влияния наклонного сжимающего силового потока, образованного от действия равнодействующей N_{R2}^{max} усилий в сжатой зоне в пределах пластического участка x_{pl} , т.е. критическая наклонная трещина ориентируется вдоль оси локальной полосы концентрации напряжений в сжатой зоне, выделившейся на термограмме балки зеленым (белым) цветом (рис. 5.5-5.7). После образования критической наклонной трещины происходит резкое увеличение напряжений в стержнях поперечной арматуры, в местах пересечения с критической наклонной трещиной и поэтому резко повышается температура поперечной арматуры и в этой связи, даже несмотря что арматура находится под защитным слоем бетона, на термограммах четко видим контуры сильно нагретых (сильно напряженных) стержней поперечной арматуры (рис. 5.5-5.7). Как видно из термограмм балок область наибольших напряжений вдоль стержней распространяется на большую длину – практически охватывает всю длину стержней поперечной арматуры, пересекающихся с критической наклонной трещиной. В бетоне сжатой зоны размеры полосы концентрации напряжений остаются такими же, как до образования критической наклонной трещины, высота которой $x_{pl} \approx 0,2h_0$.

Наибольшие напряжения внутри этой локальной полосы сжимающих напряжений в сжатой зоне возникают внутри ядра сжатия, образующейся на уровне оси этой полосы.

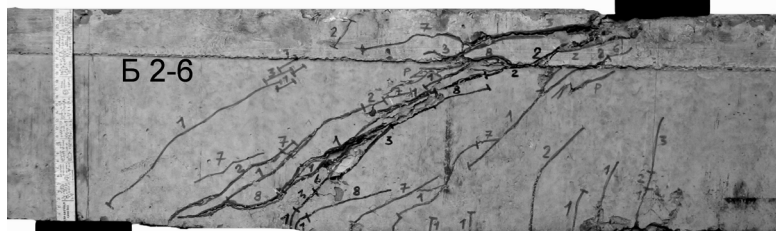


Рис.5.7. Разрушение железобетонных балок по наклонному сечению

Разрушение балок с большим пролетом среза происходило в пределах указанных локальных зон концентрации напряжений в бетоне и арматуре, выявленных предложенным методом (рис.5.7). Разрушение балок с большим пролетом

среза начинается в результате разрушения стержней поперечной арматуры в тех местах, где зафиксирована максимальная температура для каждого стержня поперечной арматуры на термограмме балки. Разрушение балок завершается раздроблением сжатой зоны над критической наклонной трещиной в пределах локальной полосы максимальных напряжений в сжатой зоне, которая проявлялась на термограмме. При этом происходит выкалывание (раздробление) бетона в ядре сжатия в центре этой локальной полосы концентрации напряжений (верхнее изображение рис. 5.3).

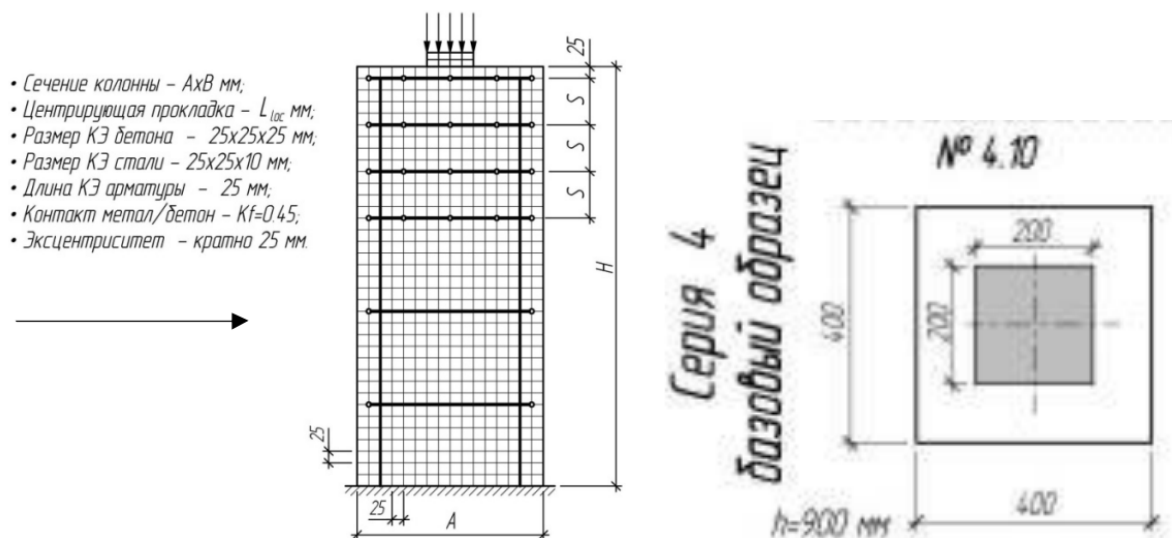
Вывод: Несущая способность балки на действие поперечной силы при численном исследовании в ПК «ANSYS Workbench» достаточно точно соответствует опытной разрушающей нагрузке, определенной в ходе экспериментальных исследований (разница в определении несущей способности составила менее 1%). Характер трещинообразования численной модели в растянутой зоне бетона достаточно точно соответствует характеру трещинообразования натуральных образцов.

6. Моделирование и расчет несущей способности оголовка колонны, подверженного местному сжатию

В данном примере целью численного исследования является определение несущей способности оголовка колонны при местном сжатии с учетом наличия косвенного армирования (бетон в исследуемой зоне местного сжатия находится в сложном напряженно-деформированном состоянии).

Геометрические параметры железобетонного оголовка колонны, механические свойства бетона и арматуры (продольной, косвенной), а также

условия нагружения приняты на основании экспериментально исследованного [52] образца оголовка, подверженного действию местного сжимающего, без эксцентриситета приложения, усилия (см. рис. 5.1, табл. 5.1). Экспериментальные исследования проводились на лабораторной базе кафедры «Железобетонных и каменных конструкций» КазГАСУ.



4	4.10	площадка на оси	Базовый образец Размеры – 40×40×90 (см); $L_{loc} = 20 \times 20$ см; косвенная арматура $\text{Ø}6\text{A}240$; шаг сеток $s = 125$ мм; ячейка $c = 100$ мм; класс бетона В25; продольная арматура $\text{Ø}16\text{A}400$
	4.11		
	4.12		

№ обр.	Характеристики образца				Результаты испытаний							
	Масса, г	Размер, см	ρ , кг/м ³	База измерения l , мм b , мм		N_{max} , кН	σ_{max} , МПа	$R_{пр,ср}$, МПа	E_b , МПа	$E_{b,ср}$, МПа	ν ,	$\nu_{ср}$,
П1	8960	10×10×40	2240	268	100	185	18.5	18.8	30000	29570	0.220	0.21
П2	9040	10×10×40	2260	268	100	205	20.5		29528		0.196	
П3	9080	10×10×40	2270	268	100	177	17.5		29182		0.214	
Изготовлен – 01.09.15; испытан – 19.08.16; фактический класс бетона соответствует проектному классу В25												

Рис.6.1 Параметры исследуемого образца оголовка колонны и схема его нагружения.

Результаты по процессу трещинообразования, а также по предельной разрушающей полной нагрузке на образцы оголовков колонн, полученные в рамках экспериментальных исследований, приведены в таблице 6.1 ниже.

Таблица.6.1 Результаты опытного исследования образцов (выделены красным)

№ серии	№ образца	N_{crc} , кН	N_{ult} , кН	$N_{ult,СП}$, кН	l_s , мм	a_{crc} , мм	h_{crc} , мм	Δ_b , мм	Δ_h , мм	$\frac{N_{crc}}{N_{ult}}$	$\frac{N_{crc}}{N_{ult,СП}}$	μ_{sw} %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1.1	265.2	510	388.7	98	0.3	310	-0.52	0.18	0.52	0.68	0.581
	1.2	224.4	336.6	273.9	90	0.3	250	-0.37	0.14	0.66	0.82	
	1.3	112.2	244.8	184.5	65	0.35	275	-0.42	0.12	0.46	0.61	
2	2.4	380.8	496.4	436.8	90	0.35	476	-0.72	0.15	0.77	0.87	0.435
	2.5	153.0	306	286.4	90	0.4	400	-0.44	0.11	0.50	0.53	
	2.6	112.8	255	174.6	70	0.3	350	-0.38	0.09	0.44	0.65	
3	3.7	408	671	402.3	96	0.2	470	-0.65	0.14	0.60	1.01	0.266
	3.8	238.0	459	253.2	108	0.35	400	-0.55	0.10	0.33	0.94	
	3.9	76.5	255	163.1	102	0.3	279	-0.54	0.07	0.30	0.47	
4 (базовый)	4.10	812	1443	1072.9	115	0.4	423	-0.77	0.22	0.55	0.75	0.266
	4.11	854	1416	1072.9	125	0.5	485	-0.65	0.19	0.60	0.80	
	4.12	826	1379	1072.9	120	0.4	465	-0.72	0.20	0.58	0.77	

6.1. Алгоритм моделирования и расчета

Ниже приведен основной алгоритм моделирования и расчета железобетонного оголовка колонны в ПК «ANSYSWorkbench 2022R2» для определения его несущей способности при действии местной вертикальной сжимающей силы.

Целью также ставится сравнение полученной в программном комплексе разрушающей нагрузки на образец с результатами эксперимента, а также сравнение общего характера трещинообразования натурального образца и смоделированной математической модели.

Процесс моделирования геометрии в приведенном примере условно не показан, так как геометрия расчетной области может создаваться различными способами: импортом твердотельной модели из САД и BIM-систем, а также путем непосредственного создания геометрии в «ANSYSWorkbench» с использованием на выбор двух встроенных инструментов: «SpaceClaim» (современный инструмент для создания геометрии) или «DesignModeler» (устаревший инструмент для создания геометрии).

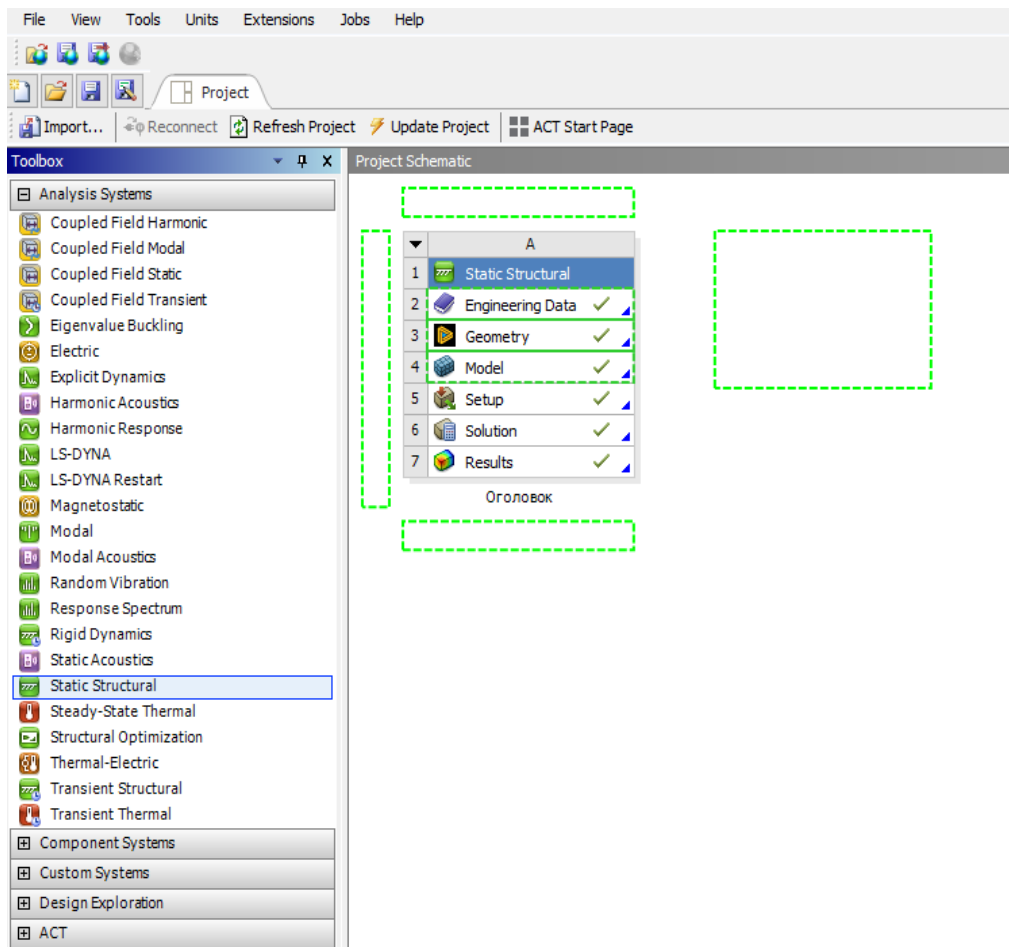
В целом, задание параметров геометрии должно полностью совпадать с параметрами натурального образца оголовка колонны. В данной задаче обязательным условием является учет трения на контакте «грузовая стальная пластина – оголовок», для корректного учета некоторого обжатия образца в пределах зоны передачи нагрузки.

Также обязательными условиями для задания геометрии в ПК «ANSYSWorkbench» является наличие разделительных граней между соприкасающимися твердотельными элементами (разными «солидами»), имеющими разный материал (например, между стальными грузовыми пластинами и бетоном), а также моделирование арматуры линейными «балочными» элементами с назначенным круглым сечением, которое соответствует принятому диаметру арматуры натуральных образцов.

Особенностью данного примера также является то, что для анализа напряженно-деформированного состояния в закритической области работы оголовка колонны под нагрузкой после достижения косвенной арматурой предела текучести, нагружение в ПК «ANSYSWorkbench» производится заданным вертикальным смещением грузовой пластины (моделируется перемещение нагрузочного штока испытательной машины).

Описание действия	Алгоритм выполнения команд в интерфейсе ПК «ANSYSWorkbench»
1. Создание расчетного файла и расчетного случая	<p>При открытии программы «Workbench»слева в древовидном меню «<i>Toolbox</i>» в разделе «<i>AnalysisSystems</i>» находим расчетный случай, соответствующий статической постановке задачи механики твердого тела - «<i>StaticStructural</i>».</p> <p>Двойным щелчком по значку «<i>StaticStructural</i>» переносим расчетный случай (задачу) в правую основную область, отвечающую за связь между разными задачами в рамках единого файла - «<i>ProjectSchematic</i>».</p>

При необходимости изменяем наименование расчетной задачи с использованием правой кнопки мыши и выбором в контекстном меню кнопки «*Rename*».

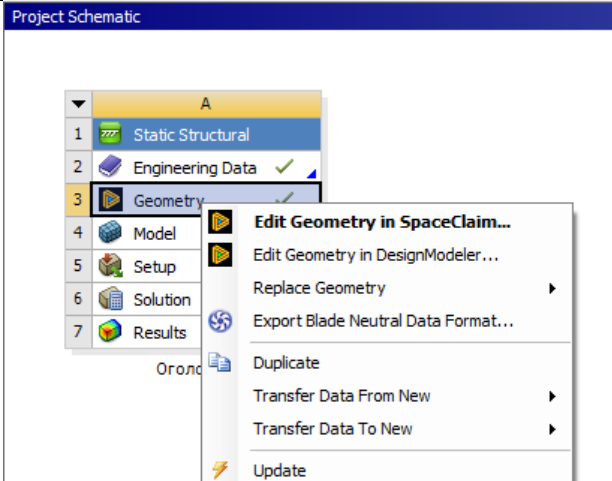


2. Создание геометрии расчетной модели

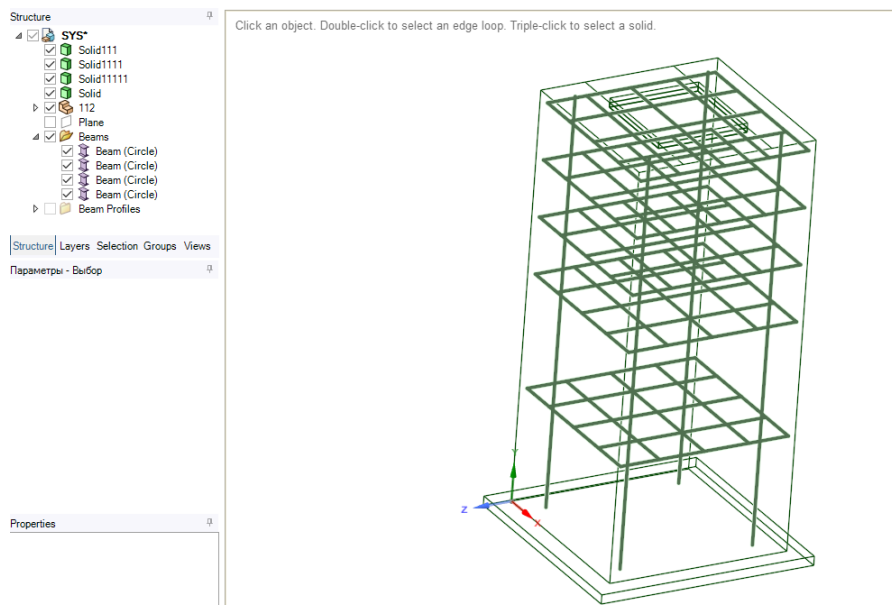
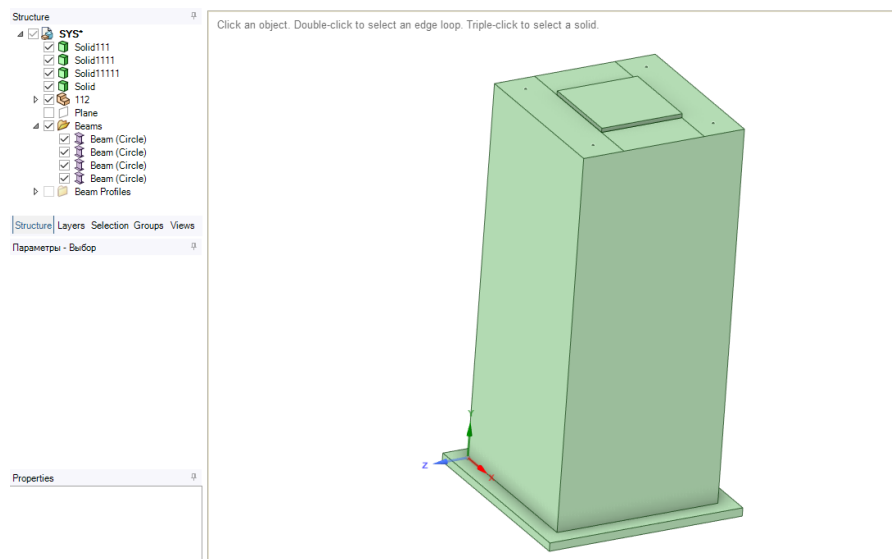
При нажатии правой кнопкой мыши по значку «3.Geometry» в основном окне Workbench(в ранее созданной расчетной задаче) в контекстном меню выбираем один из двух встроенных инструментов для создания геометрии модели: «*SpaceClaim*» или «*DesignModeler*». Рекомендуется использование более современного инструмента «*SpaceClaim*».

Примечание:

Создание геометрии производится различными способами, как встроенными инструментами Workbench, так и путем импорта файлов различных общепризнанных форматов для передачи и переноса геометрии(.ifc и т.п.). В данном пособии алгоритм задания геометрии расчетной схемы ввиду различных способов ее создания, не рассматривается.



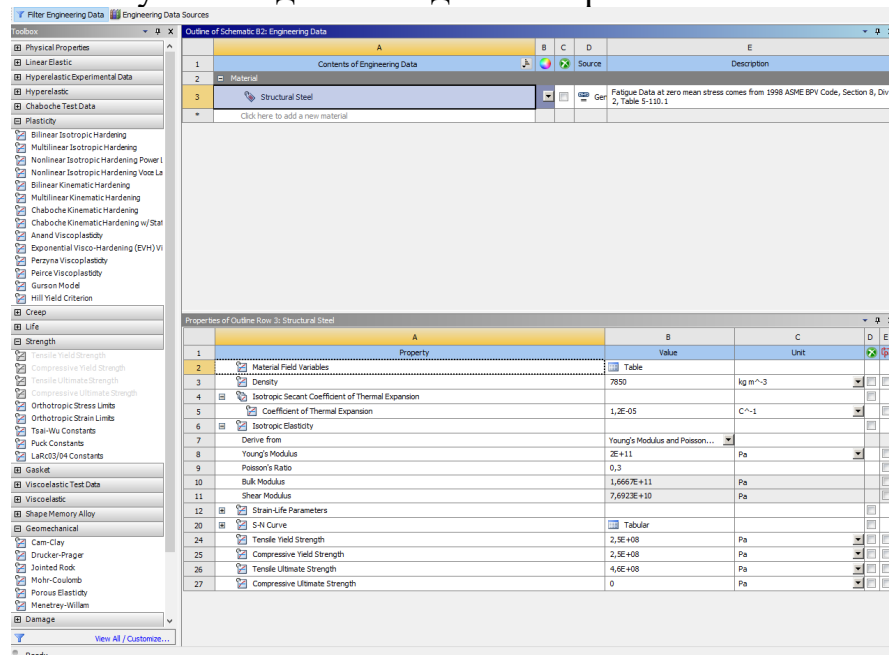
Если геометрия создана верно, напротив кнопки «3.Geometry» в окне задачи справа появляется ✓. После создания геометрии в окне «SpaceClaim»:




Здесь стоит отметить, что для арматуры в виде балочных элементов обязательно задается сечение с указанием радиуса или диаметра арматуры (задается параметр *BeamProfiles* в древовидном меню слева).



3. Добавление физически нелинейных моделей материалов бетона и арматуры

При нажатии двойным щелчком мыши по значку «2. *EngineeringData*» в основном окне Workbench(в ранее созданной расчетной задаче)попадаем в библиотеку используемых в данной задаче материалов.

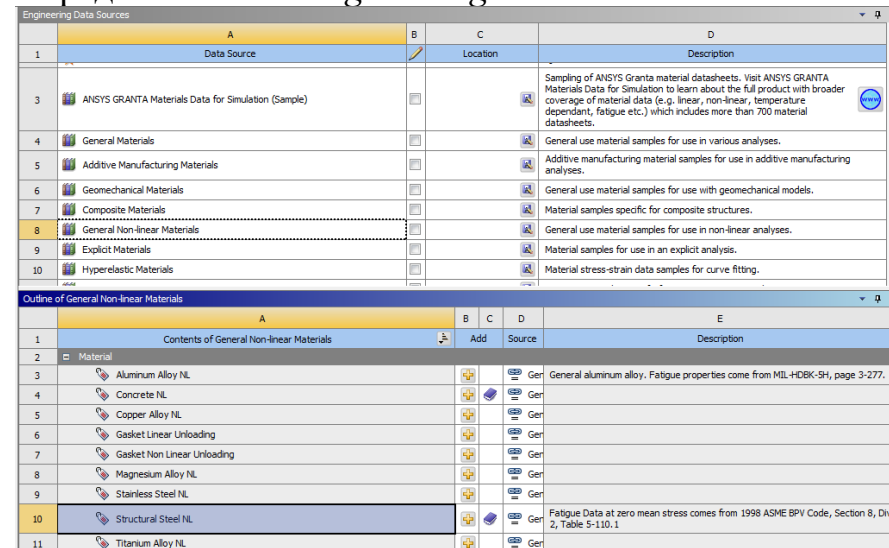


Слева в древовидном меню «*Toolbox*» располагаются все доступные к применению математические модели описания для активного материала. В верхней центральной части расположен список используемых в данной задаче материалов. В нижней центральной части расположены физико-механические параметры для описания выбранного активного материала.

Заходим в полную библиотеку доступных материалов – «*EngineeringDataSources*». В верхнем центральном открывшемся меню находим и выбираем нажатием клавиши библиотеку «*GeneralNon-linearMaterials*». В меню ниже напротив материалов «*ConcreteNL*»и «*StructuralSteelNL*»в столбце «*Add*»нажимаем .

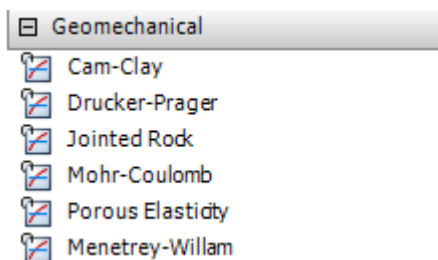
После добавления данных выбранных материалов в расчетную задачу рядом с  появляется значок .

Закрываем полную библиотеку материалов повторным нажатием по радио-кнопке «*EngineeringDataSources*».



4. Задание численного описания материала бетона

Из основного списка применяемых в задаче материалов выбираем щелчком мыши материал «Бетон В25». Слева в древовидном меню «*Toolbox*» выбираем и раскрываем раздел «*Geomechanical*»:



Далее двойным щелчком мыши добавляем модель «*Menetrey-Willam*» к описанию модели бетона:

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	3E+10	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,18		
8	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength		Pa	
13	Uniaxial Tensile Strength		Pa	
14	Biaxial Compressive Strength		Pa	
15	Dilatancy Angle		radian	

При нажатии на строку №10 в нижнем центральном окне, отвечающему за задание параметров материала, слева в древовидном меню «*Toolbox*» двойным щелчком мыши выбираем модель разупрочнения «*Softening*». Далее строке № 17 «*ActiveTable*» меняем «*Linear*» на «*Exponential*».

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	3E+10	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,18		
8	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength		Pa	
13	Uniaxial Tensile Strength		Pa	
14	Biaxial Compressive Strength		Pa	
15	Dilatancy Angle		radian	
16	Softening			
17	Active Table	Exponential		
18	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength			
19	Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening			
20	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening			
21	Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening			
22	Residual Compressive Relative Stress			
23	Mode 1 Area Specific Fracture Energy		N m ⁻¹	
24	Residual Tensile Relative Stress			

Заполняем необходимые значения для математического описания модели бетона на основании п.2.1 раздела 2 данного пособия:

Properties of Outline Row 6: Бетон B25				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2400	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	26994	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,2		
8	Bulk Modulus	1,4997E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,1248E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength	18,8	MPa	
13	Uniaxial Tensile Strength	1,55	MPa	
14	Biaxial Compressive Strength	21,6	MPa	
15	Dilatancy Angle	3,34	degree	
16	Softening			
17	Active Table	Exponential		
18	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength	0,00189		
19	Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,0035		
20	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening	0,2		
21	Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,85		
22	Residual Compressive Relative Stress	0,2		
23	Mode 1 Area Specific Fracture Energy	161,5	N m ⁻¹	
24	Residual Tensile Relative Stress	0,01		

Для данной задачи существенным является значение угла дилатации бетона, поэтому его стоит принять в запас несущей способности с наименьшим значениям.




5. Задание численного описания материала арматуры

Из основного списка применяемых в задаче материалов выбираем щелчком мыши материал арматуры «A240». В нижнем окне заполняем необходимые значения для математического описания модели арматурной стали на основании п.2.2 раздела 2 данного пособия:

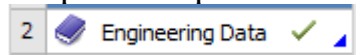
Properties of Outline Row 4: A240			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
6	Young's Modulus	2E+05	MPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
10	Bilinear Isotropic Hardening		
11	Yield Strength	235	MPa
12	Tangent Modulus	550	MPa

Из основного списка применяемых в задаче материалов выбираем щелчком мыши материал арматуры «A400». В нижнем окне заполняем необходимые значения для математического описания модели арматурной стали на основании п.2.2 раздела 2 данного пособия:

Properties of Outline Row 5: A400			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
6	Young's Modulus	2E+05	MPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
10	Bilinear Isotropic Hardening		
11	Yield Strength	390	MPa
12	Tangent Modulus	1265	MPa

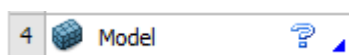
Сохраняем введенные данные в библиотеку материалов задачи нажатием  в верхнем левом углу окна «Workbench». Закрываем окно библиотеки материалов нажатием крестика   «A2:Engineering Data», возвращаясь в основное меню «Workbench».

В основном меню при примененных параметрах материалов напротив строки №2 в меню к расчетной задаче ставится галочка



6. Задание материалов для созданной геометрии модели

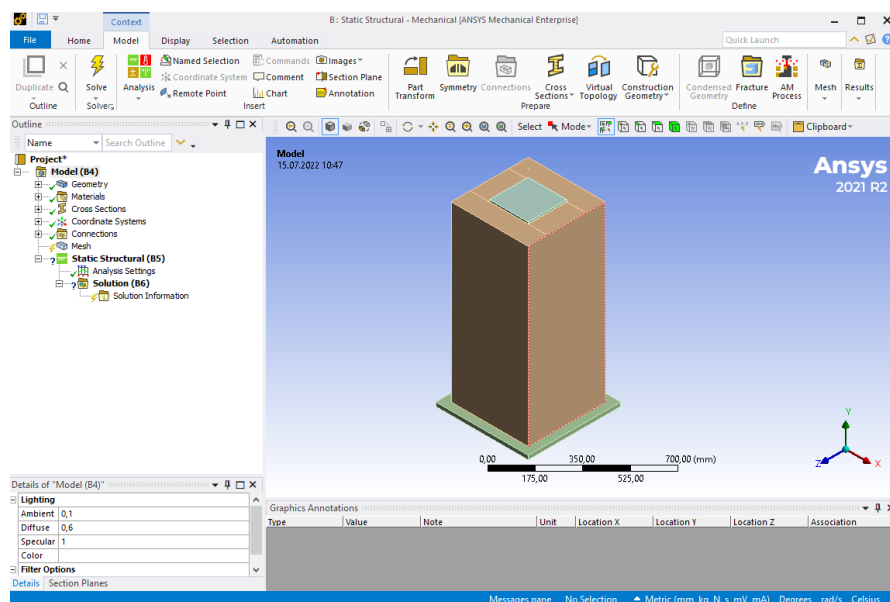
Выбираем двойным нажатием мыши в основном меню «Workbench» в окне расчетной задачи значок «Model»:




После некоторого времени, программа открывает дополнительное окно для дальнейшего моделирования текущей задачи–интерфейс для «Mechanical-APDL».

В древовидном меню слева («*Outline*») располагаются вкладки с основными параметрами модели, чуть ниже - поля для их подробного редактирования. В верхней части расположено ленточное меню с основными инструментами для работы с моделью.

В центральной части располагается сама расчетная модель с заранее заданной геометрией:



Слева в древовидном меню «*Outline*» раскрываем список во вкладке  **Geometry**.

Нажимая на каждый отдельный набор геометрии во вкладке «*Geometry*» справа в основном окне модели зеленым цветом выделяется выбранный набор геометрии.

Выбираем в списке «*Geometry*» основное тело оголовка колонны. Снизу слева в поле для редактирования параметров «*Details of SYS/Solid*» находим вкладку «*Material*» и в строке напротив «*Assignment*» выбираем ранее заданный материал «*Бетон B25*».

Удостоверяемся, что напротив следующей строки «*Nonlinear Effects*» стоит значение «*Yes*».

Выбираем в списке «*Geometry*» солиды – грузовые и опорные пластины и задаем им через вкладку «*Material*» в строке напротив «*Assignment*» стандартный материал «*Structural Steel*».

Выбираем в списке «Geometry» четыре балочных (линейных) элемента смоделированной ранее продольной арматуры.

Снизу слева в поле для редактирования параметров «Detail of «Multiple Selection»» находим вкладку «Material» и в строке напротив «Assignment» выбираем ранее заданный материал «A400». Удостоверяемся, что напротив следующей строки «Nonlinear Effects» стоит значение «Yes».

В поле для редактирования параметров «Detail of «Multiple Selection»» находим вкладку «Definition» и в строке напротив «Model Type» заменяем стандартный тип элемента «Beam» на «Reinforcement».

Выбираем в списке «Geometry» все балочные (линейные) элементы смоделированной ранее косвенной арматуры (поперечных хомутов). Легче всего для выбора воспользоваться зажатой кнопкой «Shift».

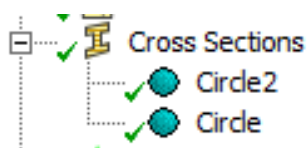
Снизу слева в поле для редактирования параметров «Detail of «Multiple Selection»» находим вкладку «Material» и в строке напротив «Assignment» выбираем ранее заданный материал «A240». Удостоверяемся, что напротив следующей строки «Nonlinear Effects» стоит значение «Yes».


В поле для редактирования параметров «Detail of «Multiple Selection»» находим вкладку «Definition» и в строке напротив «Model Type» заменяем стандартный тип элемента «Beam» на «Reinforcement».


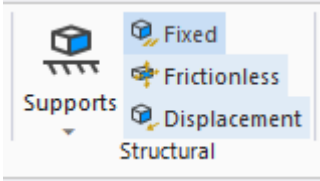
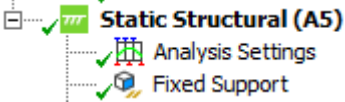

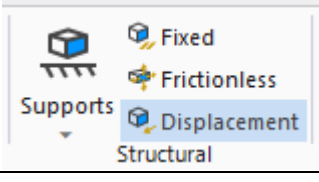
Примечание:

При использовании версий ПК «ANSYS Workbench» до 2021 R1, параметр «Reinforcement» в «Model Type» отсутствует. Для смены типа конечных элементов с балочного на армирующий в этом случае требуется вставка команды на внутри программном языке APDL.

Слева в древовидном меню «Outline» в открытой вкладке «Cross Section» проверяем наличие заранее заданных сечений арматурных стержней:



<p>7. Задание контактов между грузовыми, опорными площадками и оголовком</p>	<p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» в открытой вкладке «<i>Connections</i>»>«<i>Contacts</i>»выбираем все контактные поверхности между верхней грузовой, нижней опорной пластиной и оголовком колонны (справа в основном виде с геометрией модели красным и синим цветом выделяются выбранные контактные поверхности). Для выбранного контакта в нижнем меню «<i>Detailsof «ContactRegion»</i>»во вкладке «<i>Definition</i>»в строке напротив «<i>Type</i>»меняем значение на «<i>Frictional</i>»(контакт, моделирующий трение стали по бетону).Ниже,напротив, в строке «<i>FrictionCoefficient</i>» вводим значение коэффициента трения (рекомендуется принять – 0,4):</p> <div data-bbox="630 593 1212 896" data-label="Image"> </div>
<p>8. Создание именованных наборов для бетона и арматуры балки</p>	<p>Для дальнейшего удобства анализа результатов расчета создадим две именованные выборки («<i>NamedSelections</i>») для бетона и косвенного армирования оголовка.</p> <p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>»раскрываем список во вкладке  <i>Geometry</i> .</p> <p>В списке находим солид (тело) оголовка, нажимаем правой кнопкой мыши и в контекстном меню выбираем пункт «<i>CreateNamedSelection</i>», во всплывшем окне вводим наименование выборки (допустим «<i>Бетон</i>»).</p> <p>В том же списке с геометрией находим все линейные элементы, моделирующие косвенную (поперечную) арматуру оголовка (для выбора всех элементов используем зажатую кнопку Shift), нажимаем правой кнопкой мыши на любом из выбранных элементов и в контекстном меню выбираем пункт «<i>CreateNamedSelection</i>», во всплывшем окне вводим наименование выборки (допустим «<i>Арматура</i>»).</p> <p>После создания именованных выборок в древовидном меню «<i>Outline</i>»появляется новая вкладка:</p> <div data-bbox="774 1870 1045 1971" data-label="Image"> </div>

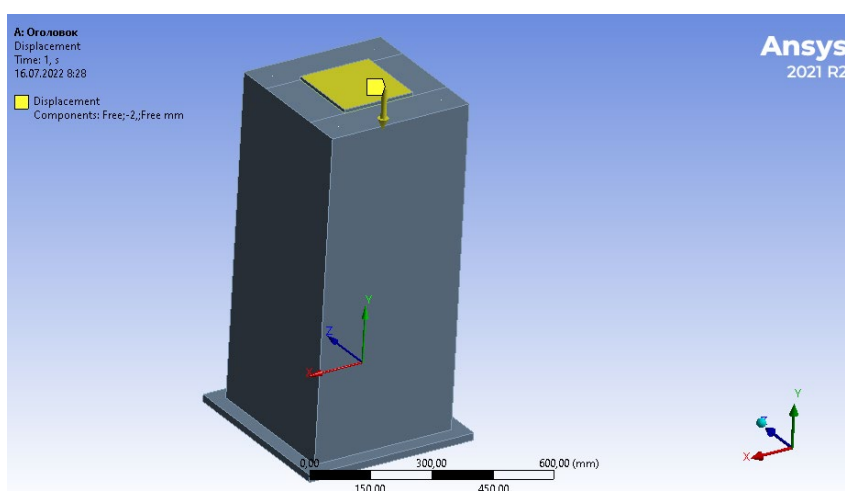
<p>9. Задание граничных условий</p>	<p>Для задания граничных условий в данной задаче достаточно жестко закрепить по всем направлениям нижнюю поверхность опорной стальной пластины.</p> <p>Для этого слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» нажимаем на заголовок вкладки  Static Structural (A5).</p> <p>При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «<i>Environment</i>».</p> <p>В данной вкладке для задания закреплений расчетной области выбираем в разделе «<i>Structural</i>» вид закрепления – «<i>Fixed</i>»:</p>  <p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» в вкладке «<i>Static Structural</i>» появляется параметр «<i>Fixed Support</i>».</p> <p>При нажатии на него в нижнем меню «<i>Details of Fixed Support</i>» необходимо нажать на строчку «<i>Geometry</i>», после чего в основном меню с геометрией модели необходимо выбрать нижнюю плоскость опорной стальной пластины, после чего в той же строчке «<i>Geometry</i>» в древовидном меню необходимо нажать на радио-кнопку «<i>Apply</i>», подтвердив свой выбор:</p> 
<p>10. Задание условий нагружения конструкции</p>	<p>В качестве условия для нагружения конструкции используем заданное перемещение, приложенное к верхней поверхности стальной грузовой пластины (использование силы – «<i>Force</i>» для данной конкретной задачи не рекомендуется).</p> <p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» нажимаем на заголовок вкладки  Static Structural (A5).</p> <p>При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «<i>Environment</i>».</p> <p>В данной вкладке для задания нагружения оголовка колонны выбираем нажатием – «<i>Displacement</i>»:</p> 

После этого слева в древовидном меню «*Outline*» в вкладке «*StaticStructural*» появляется параметр «*Displacement*». При нажатии на него в нижнем меню «*Details of «Displacement»*» необходимо нажать на строчку «*Geometry*», после чего в основном меню с геометрией модели необходимо выбрать верхнюю грань грузовой пластины, после чего в той же строчке «*Geometry*» в древовидном меню необходимо нажать на радио-кнопку «*Apply*», подтвердив свой выбор.

Далее в этом же меню «*Details of «Displacement»*» по вертикальному направлению (в нашем случае ось *Y*) необходимо ввести значение заданного перемещения (в данной задаче рекомендуется значение – 2мм). По остальным двум направлениям должно стоять значение «*Free*».


После задания численного значения заданного перемещения в основном окне справа появляется стрелка с направлением приложения перемещения, а также выделяется желтым цветом площадка приложения заданного перемещения:

Details of "Displacement"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	Free
<input type="checkbox"/> Y Component	-2, mm (ramped)
Z Component	Free
Suppressed	No




При неправильном направлении заданного перемещения, необходимо изменить знак при указании значения перемещения на противоположный.

11. Задание настроек и создание сетки объемных конечных элементов

Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  Mesh .

При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Mesh*».

В данной вкладке нажимаем на значок «*Method*».

После этого слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*Mesh*» появляется параметр «*Automatic Method*». Нажимаем на него. В основном окне с геометрией модели выделяем все тела рамкой (при этом сверху должен быть выбран метод выделения - ). Слева в нижнем меню «*Details of Method*» подтверждаем выбор геометрии радио-кнопкой «*Apply*».


Далее в этом же меню во вкладке «*Definition*» в строчке «*Method*» меняем метод разбивки сетки КЭ на «*Hex Dominant*». В раскрывшихся настройках изменяем параметр «*Element Order*» на «*Quadratic*».

Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  Mesh .

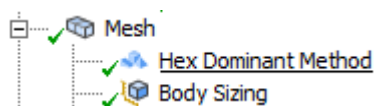
При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Mesh*».

В данной вкладке нажимаем на значок «*Sizing*».

Данный параметр появляется во вкладке «*Mesh*» древовидного меню слева.


Нажав на параметр «*Body Sizing*» в нижнем меню «*Details of Body Sizing*» и далее на строку «*Geometry*» слева в основном окне выбираем все элементы рамкой с включенной радиокнопкой , подтверждаем выбор всех тел нажав на радио-кнопку «*Apply*».


В этом же меню во вкладке «*Definition*» задаем значение размера грани объемных конечных элементов в поле «*Element Size*» (в данной задаче наиболее оптимальное значение составляет 20 мм):



Примечание

Размер конечного элемента стоит задавать таким образом, чтобы по высоте сечения конструкция разбивалась не менее, чем на 8 конечных элементов (в нашем случае – 20 КЭ). При этом величину грани конечного элемента не стоит задавать меньше среднего размера заполнителя бетона.

Производим разбивку геометрии модели на конечные элементы, нажав правой кнопкой мыши на заголовок вкладки  Mesh и в контекстном меню выбрав действие - «*Generate Mesh*».

Общее число узлов и конечных элементов в задаче можно увидеть, нажав на заголовок вкладки  Mesh и в нижнем меню раскрыв самый нижний параметр «*Statistics*»:

12. Задание настроек нелинейного решателя

Ниже приведен алгоритм основных настроек нелинейного решателя, однако, необходимо помнить, что данные настройки могут существенно изменяться в зависимости от типа рассматриваемой задачи.

Слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*StaticStructural*» нажимаем на параметр, отвечающий за настройки решателя – «*AnalysisSettings*».

В нижнем меню «*Detailsof «AnalysisSettings»*» во вкладке «*StepControls*» изменяем значение параметра «*AutoTimeStepping*» на «*On*», далее заполняем раскрывшиеся настройки следующим образом:

Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	10,
Minimum Substeps	10,
Maximum Substeps	2000,

Переходим в следующую вкладку «*SolverControls*», где меняем параметр «*SolverType*» на «*Direct*» (прямой метод решения). Также включаем возможность расчета при больших деформациях, изменяя параметр «*LargeDeflection*» на «*On*».


Переходим в следующую вкладку «*NonlinearControls*», где изменяем тип нелинейного решателя на несимметричный решатель Ньютона-Рафсона (в первом параметре выставляем «*Unsymmetric*»).

Далее отключаем все возможные типы отслеживания (контроля) сходимости решателя (переводя их в режим «*Remove*» или «*Off*»), за исключением отслеживания сходимости по силе (для этого напротив «*ForceConvergence*» выставляем «*On*»). Значение погрешности сходимости в 0,5% в данной задаче является достаточным (в некоторых расчетных случаях используется значение ниже, допустим – 0,1 %):

[-] Nonlinear Controls	
Newton-Raphson O...	Unsymmetric
Force Convergence	On
--Value	Calculated by solver
--Tolerance	0,5%
--Minimum Reference	1,e-002 N
Moment Convergence	Remove
Displacement Conve...	Remove
Rotation Convergen...	Remove
Line Search	Off
Stabilization	Off

13. Создание шаблонов для вывода основных результатов расчета

Для получения результатов по внутренним параметрам НДС конструкции необходимо создать основные шаблоны результатов.


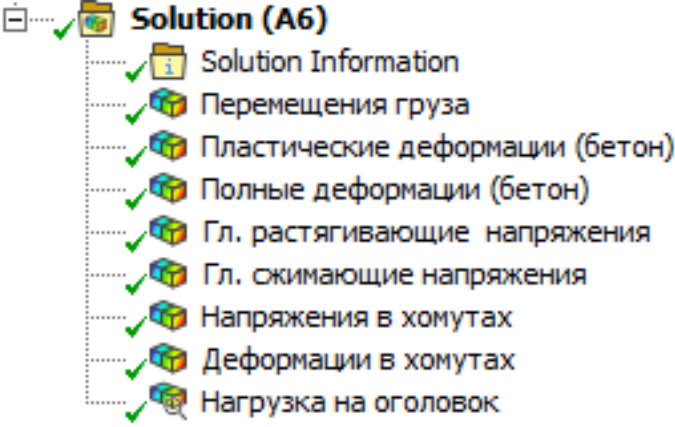


Для этого слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  **Solution (A6)**. При нажатии данной заголовка сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Solution*»:

Раскрываем вкладку «*Deformation*» и выбираем «*Directional Deformation*». В нижнем меню «*Details of «Directional Deformation»*» в вкладке «*Definition*» в строке «*Orientation*» выбираем направление, соответствующее вертикальному перемещению грузовой пластины (в данном случае глобальная ось Y).

Таким же образом выполняем следующие операции:

«*Solution*» > «*Strain*» > «*Equivalent Plastic Strain*»;
 «*Solution*» > «*Strain*» > «*Equivalent Total Strain*»;
 «*Solution*» > «*Stress*» > «*Maximum Principal Stress*»;
 «*Solution*» > «*Stress*» > «*Minimum Principal Stress*»;
 «*Solution*» > «*Stress*» > «*Equivalent (von-Mises) Stress*»;
 «*Solution*» > «*Strain*» > «*Equivalent Total Strain*».

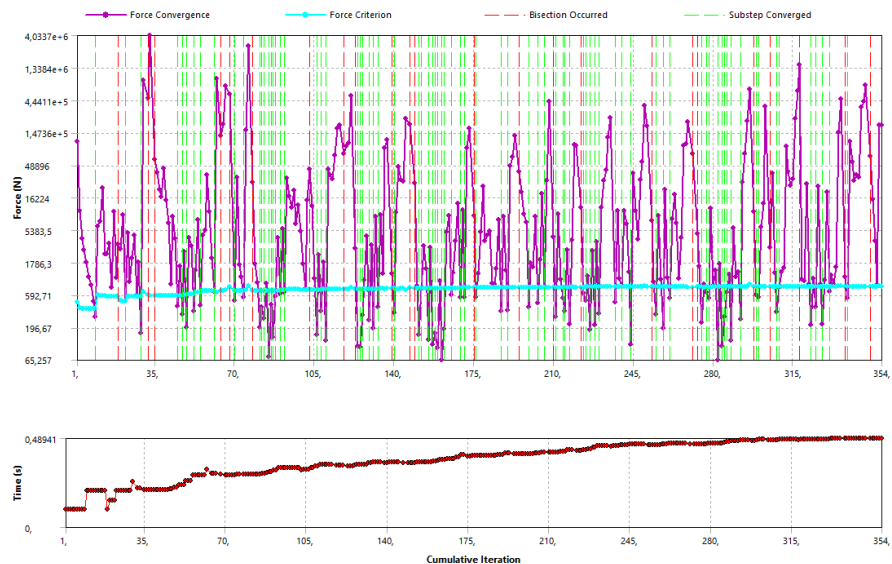
Для 1-4 шаблона результатов в нижнем меню во вкладке «*Scope*» в строке «*Scoping Method*» задаем параметр «*Named Selection*», а ниже в появившейся строке «*Named Selection*» выбираем ранее созданную именованную выборку – «*Бетон*».

	<p>Для 5-6 шаблона результатов в нижнем меню во вкладке «<i>Scope</i>» в строке «<i>ScopingMethod</i>» задаем параметр «<i>NamedSelection</i>», а ниже в появившейся строке «<i>NamedSelection</i>» выбираем ранее созданную именованную выборку – «<i>Арматура</i>».</p> <p>Создаем шаблон для определения несущей способности оголовка колонны в виде реакции опорной пластины при заданном перемещении. Для этого слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» нажимаем на заголовок вкладки  Solution (A6). При нажатии данного заголовка сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «<i>Solution</i>»:</p> <p>Раскрываем вкладку «<i>Probe</i>» и выбираем «<i>ForceReaction</i>». В нижнем левом вспомогательном меню «<i>Detailsof</i> «<i>ForceReaction</i>» во вкладке «<i>Definition</i>» в строке «<i>BoundaryCondition</i>» выбираем параметр «<i>FixedSupport</i>».</p> <p>Для удобства изменяем наименование шаблонов, используя правую кнопку мыши и в контекстном меню нажав на «<i>Rename</i>».</p>
	<p>После создания и переименования шаблонов результатов:</p> 
<p>14. Запуск задачи на расчет</p>	<p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» нажимаем правой кнопкой мыши на  Solution (A6).</p> <p>В открывшемся контекстном меню запускаем задачу на расчет, нажав на  Solve.</p>

<p>15. Отслеживани е сходимости расчета в процессе решения задачи</p>	<p>Для отслеживания процесса сходимости нелинейного шагово-итерационного решателя во время выполнения расчета используется два основных инструмента:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. log-файл протокола расчета, обновляемый по ходу самого расчета: <p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» во вкладке «<i>Solution</i>» необходимо нажать на «<i>SolutionInformation</i>» с параметром в строкенижного меню «<i>SolutionOutput</i>» - «<i>SolverOutput</i>»(сходимость на представленном, к примеру, подшаге («<i>Substep</i>») нагружения достигнута за 4итерации):</p> <pre> FORCE CONVERGENCE VALUE = 1806. CRITERION= 788.5 EQUIL ITER 1 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 0.5197E-02 FORCE CONVERGENCE VALUE = 0.1051E+05 CRITERION= 788.3 EQUIL ITER 2 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 0.3976E-02 FORCE CONVERGENCE VALUE = 6613. CRITERION= 787.0 EQUIL ITER 3 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.1913E-02 FORCE CONVERGENCE VALUE = 1315. CRITERION= 787.4 EQUIL ITER 4 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 0.6754E-03 FORCE CONVERGENCE VALUE = 109.3 CRITERION= 787.5 <<< CONVERGEI >>> SOLUTION CONVERGED AFTER EQUILIBRIUM ITERATION 4 *** LOAD STEP 1 SUBSTEP 59 COMPLETED. CUM ITER = 244 *** TIME = 0.451328 TIME INC = 0.388108E-02 *** MAX PLASTIC STRAIN STEP = 0.8596E-03 CRITERION = 0.1500 *** AUTO TIME STEP: NEXT TIME INC = 0.58216E-02 INCREASED (FACTOR = 1.5000) </pre>
---	---

2. Отслеживание сходимости итерационного решения в виде графика:

Слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*Solution*» необходимо нажать на «*Solution Information*» и изменить параметр в строкенижном меню «*Solution Output*» на «*Force Convergence*» (отслеживание сходимости по силовым реакциям):



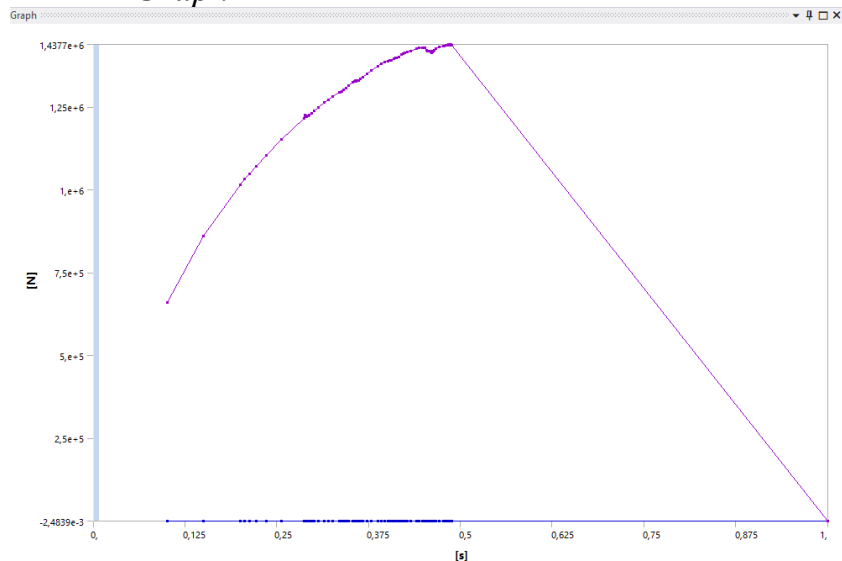
Голубыми линиями и точками на графике показан критерий сходимости (0,5 %). Фиолетовыми точками, соединенных линиями, показана каждая итерация решения. Общее число итераций, выполненных в ходе расчета, показано на графике по оси снизу – в правом углу. Вертикальными зелеными пунктирными линиями отмечаются итерации, на которых достигнута сходимость решателя для каждого подшага нагружения. Вертикальными красными пунктирными линиями отмечаются подшаги, на которых не достигнута сходимость и для продолжения решения потребовалось дополнительно поделить приращение заданного перемещения на данном подшаге нагружения в 2 раза.

Ход решения в процентах от заданного перемещения также показывается в нижнем левом углу основного окна «*Mechanical*».

16. Анализ результатов расчета

После завершения процесса расчета (время выполнения расчета на компьютере с 6 физическими ядрами и 12 потоками составило 3h18min) переходим в режим анализа результатов во вкладку «*Solution*» древовидного меню «*Outline*».

Для определения несущей способности оголовка колонны на центрально приложенное сжимающее усилие в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*Solution*» выбираем созданный ранее шаблон «*Нагрузка на оголовок (ForceReaction)*», переходим в нижнее окно «*Graph*»:



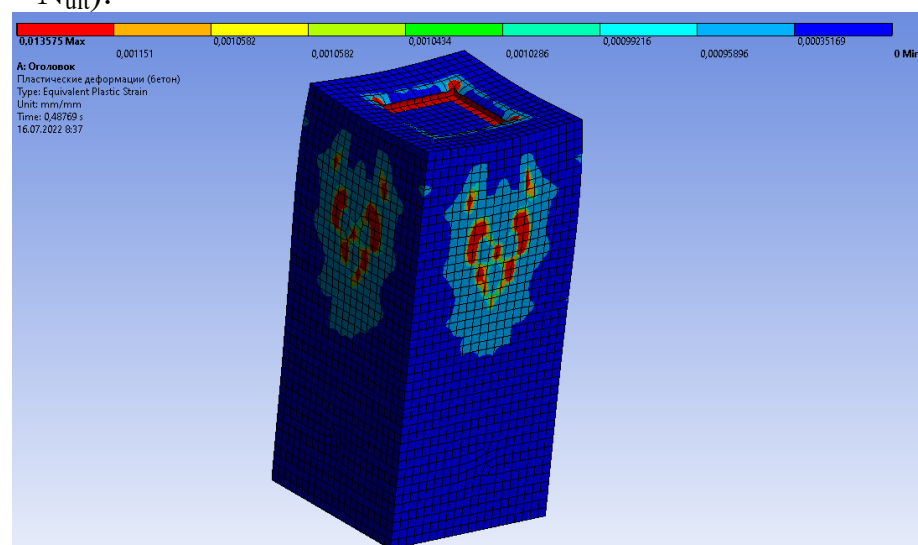
Как видно из данного графика максимальное вертикальное усилие, которое может быть выдержано оголовком колонны составляет 1437700 Н. Однако, снижение действующей нагрузки (что свидетельствует о переходе образца в стадию разрушения) зафиксировано чуть ранее при нагрузке 1428000 Н.

Таким образом, предельная несущая способность оголовка на сжатие по результатам численного расчета составила:

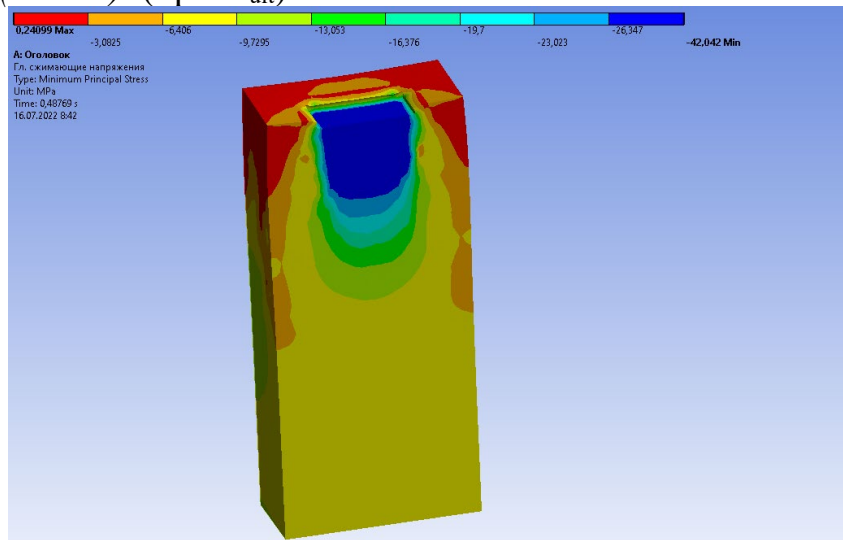
$$N_{ult} = 1428 \text{ кН.}$$

Ниже приведем остальные основные результаты расчета:

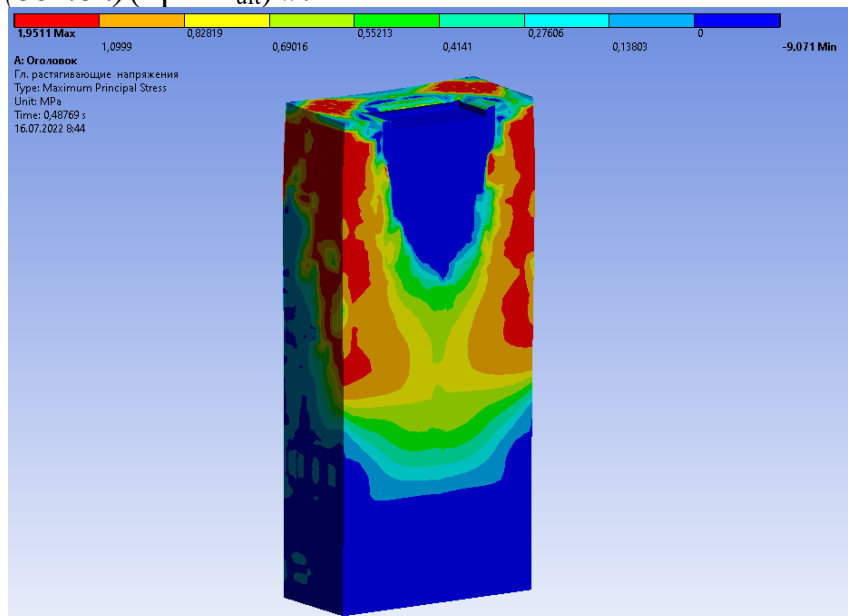
1. «*Solution*» > «*Полные деформации (бетон)*» (при N_{ult}):



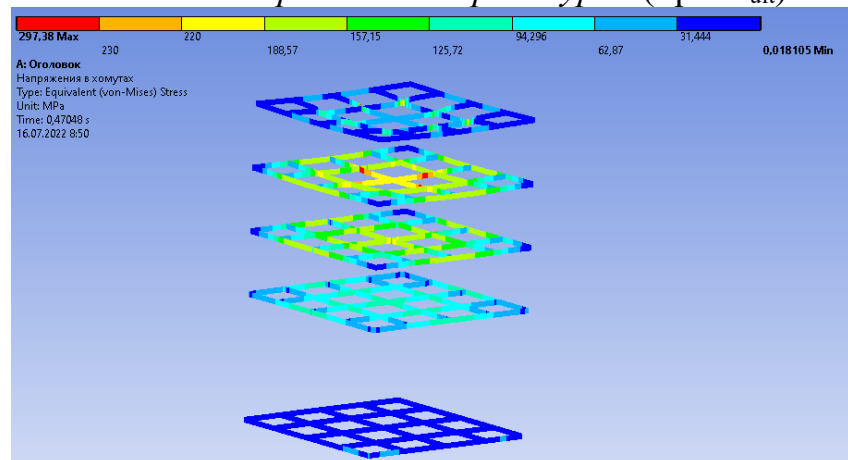
2. «Solution» > «Главные сжимающие напряжения (бетон)» (при N_{ult})::



3. «Solution» > «Главные растягивающие напряжения (бетон)» (при N_{ult})::



4. «Solution» > «Напряжения в арматуре» (при N_{ult}):



(в косвенной арматуре (вторая сетка сверху) достигнута площадка текучести)

6.2. Сравнение результатов эксперимента и численного исследования

Согласно произведенному численному исследованию, предельное местное сжимающее усилие на оголовок колонны соответствует значению $N_{ult} = 1428$ кН, что достаточно хорошо совпадает с экспериментальным значением разрушающей нагрузки на образец (среднее значение разрушающей нагрузки из 3-ех проведенных испытаний – 1412 кН (см. табл. 6.1). Погрешность в определении несущей способности оголовка численным методом в ПК «ANSYS Workbench» в данной задаче составляет:

$$\Delta = \frac{1428 - 1412}{1412} \cdot 100\% = 1,2\%$$

Ниже на рис. 6.5.2 приведено сравнение характера трещинообразования численной модели оголовка колонны и натурального образца.

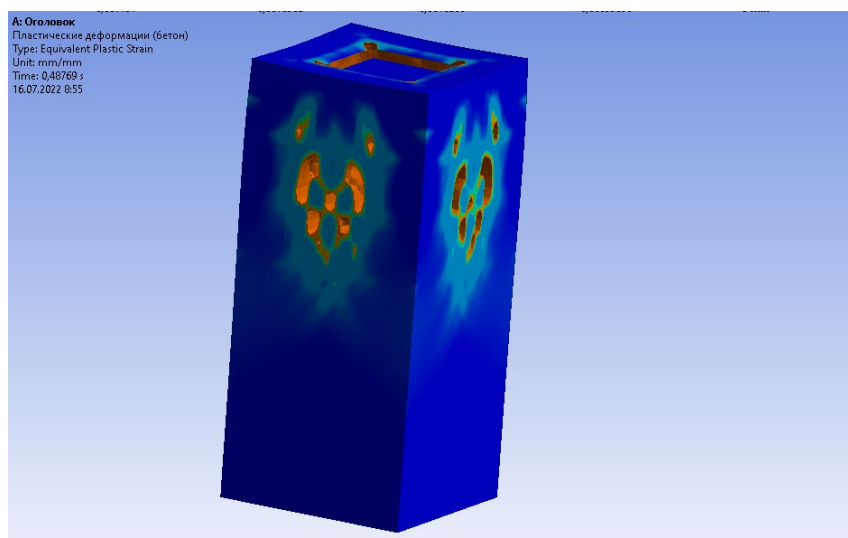


Рис. 5.2. Сравнение характера трещинообразования оголовка колонны

Вывод: Несущая способность оголовка колонны на действие местной вертикальной сжимающей силы при численном исследовании в ПК «ANSYSWorkbench» достаточно точно соответствует опытной разрушающей нагрузке, определенной в ходе экспериментального исследования (разница в определении несущей способности составила менее 2%). Характер трещинообразования численной модели оголовка колонны достаточно точно соответствует характеру трещинообразования натурального образца.

7. Моделирования и расчет несущей способности плиты перекрытия при продавливании колонной

В данном примере целью численного исследования является определение несущей способности железобетонной монолитной плиты перекрытия при продавливании колонной.

Геометрические параметры монолитной плиты и колонны, механические свойства бетона и арматуры, а также условия нагружения приняты в соответствии с экспериментально исследованным образцом [5] опорной зоны плиты перекрытия (КСП-2,5) с центрально расположенной колонной прямоугольного сечения, к которой в рамках испытания прикладывается продавливающее усилие (см. рис. 7.1-7.2).

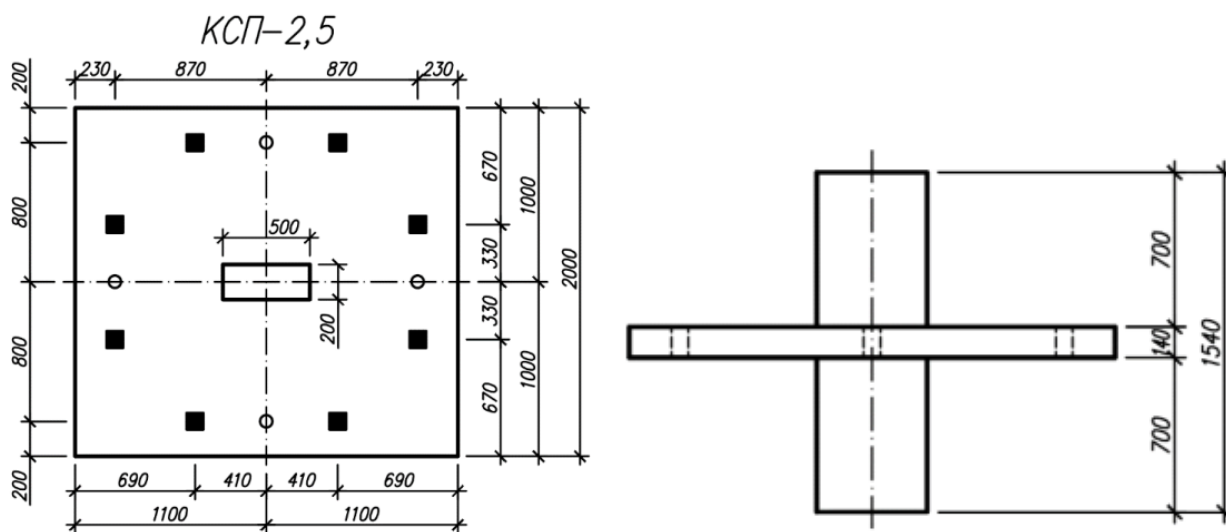


Рис.7.1 Геометрические параметры и условия нагружения исследуемого образца плиты (черные квадраты на виде сверху соответствуют местам приложения нагрузки)

Таблица 7.1. Данные по механическим характеристикам бетона образца плиты

Марка образца	Кубиковая прочность бетона R_m , МПа	Прочность бетона при раскалывании $R_{tt,m}$, МПа	Прочность бетона при растяжении $R_{t,m}$, МПа	Призменная прочность бетона $R_{b,m}$, МПа	Модуль упругости бетона E_b , МПа	Коэффициент Пуассона μ
КСП-1	33,6	2,19	1,82	26,5	24170	0,187
КСП-2,5	27,5	1,93	1,60	21,2	21060	0,199
КСП-4	35,7	2,30	1,91	25,6	22910	0,188
КСК	42,2	3,15	2,61	34,4	25990	0,181

Армирование плиты образцов выполнялось двумя вязаными сетками. У верхней (растянутой) грани плиты сетка состояла из стержней диаметром 14 мм класса А500, расположенных с шагом 100 мм, у нижней (сжатой) грани сетка состояла из проволоки диаметром 5 мм класса В500, расположенной с шагом 100 мм. Поперечное армирование в плите отсутствовало. Рабочая высота плиты составила 100 мм.

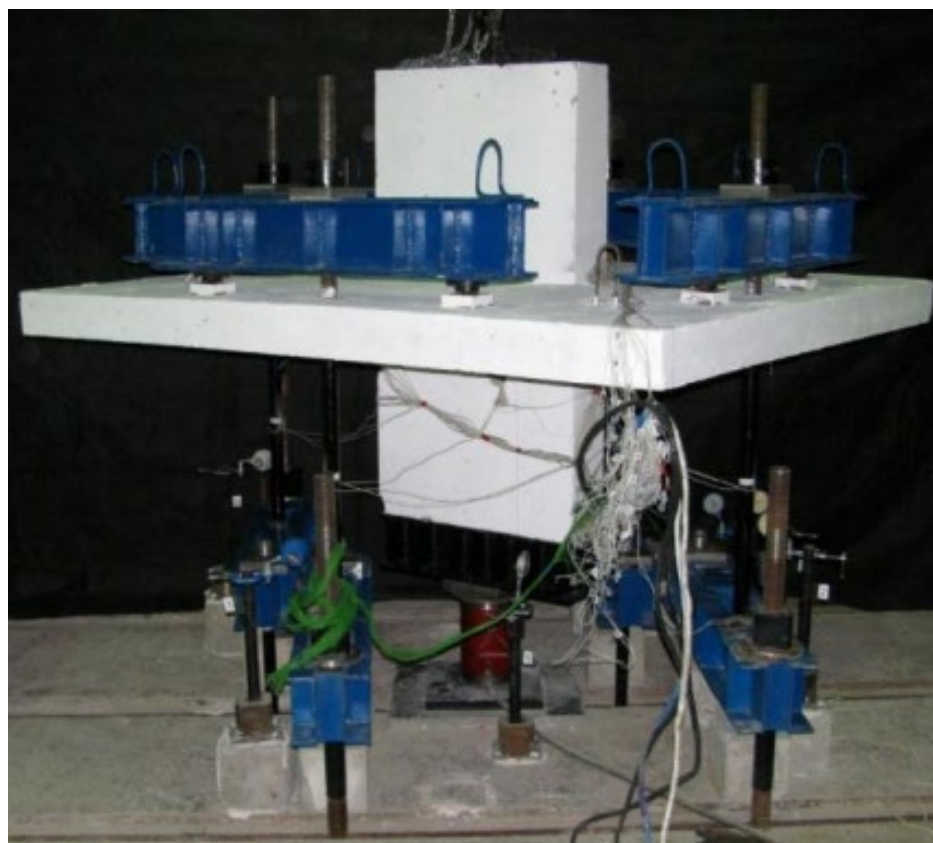


Рис.7.2Общий вид испытательного стенда для исследования опорной зоны плиты

Таблица 7.2. Несущая способность образцов КСП-2,5 при продавливании

Марка образца	h_0 , мм	u , мм	$P_{exp.}$, кН	$F_{calc.}$, кН	$P_{exp.}/F_{calc.}$
КСП-1	100	1200	272,0	220,8	1,23
КСП-2,5	100	1800	281,3	293,4	0,96
КСП-4	100	2400	328,4	468,0	0,70
КСК	105	990	284,9	267,0	1,07

7.1. Алгоритм моделирования и расчета

Ниже приведен основной алгоритм моделирования и расчета опорной зоны железобетонной монолитной плиты перекрытия в ПК «ANSYSWorkbench2022R2» для определения её несущей способности при продавливании колонной.

Целью также ставится сравнение полученной в программном комплексе разрушающей продавливающей нагрузки на образец с результатами эксперимента, а также сравнение общего характера деформирования и трещинообразования натурального образца и смоделированной математической модели плиты.

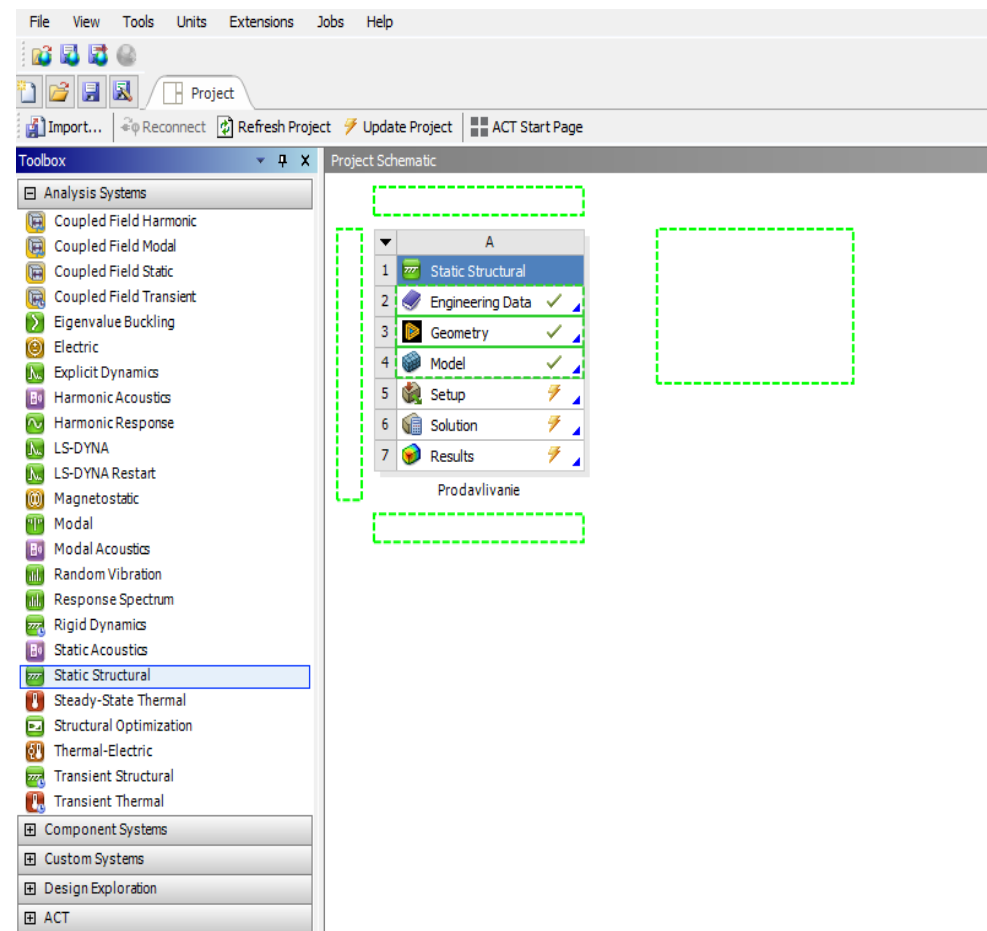
Процесс моделирования геометрии в приведенном примере условно не показан, так как геометрия расчетной области может создаваться различными способами: импортом твердотельной модели из САД и BIM-систем, а также путем непосредственного создания геометрии в «ANSYSWorkbench» с использованием на выбор двух встроенных инструментов: «*SpaceClaim*» (современный инструмент для создания геометрии) или «*DesignModeler*» (устаревший инструмент для создания геометрии).

В целом, задание параметров геометрии не отличается от предыдущих рассмотренных примеров. Единственной особенностью данного примера является то, что рассматриваемая задача является осесимметричной относительно двух вертикальных плоскостей, проходящих через центр тяжести плиты и перпендикулярных ее торцевым граням, поэтому (для уменьшения времени выполнения нелинейного итерационного расчета) моделирование геометрии производится только для одной четверти образца. При анализе напряженно-деформированного состояния численной модели после выполнения

расчета результаты будут симметрично отзеркалены на остальные $\frac{3}{4}$ реального образца.

Нагружение численной модели плиты перекрытия в связи с хрупким разрушением по бетону производим усилием, приложенным к грузовым площадкам на поверхности плиты.

Описание действия	Алгоритм выполнения команд в интерфейсе ПК «ANSYSWorkbench»
<p>1. Создание расчетного файла и расчетного случая</p>	<p>При открытии программы «Workbench»слева в древовидном меню «<i>Toolbox</i>» в разделе«<i>AnalysisSystems</i>» находим расчетный случай, соответствующий статической постановке задачи механики твердого тела - «<i>StaticStructural</i>».</p> <p>Двойным щелчком по значку «<i>StaticStructural</i>» переносим расчетный случай (задачу) в правую основную область, отвечающую за связь между разными задачами в рамках единого файла - «<i>ProjectSchematic</i>».</p> <p>При необходимости изменяем наименование расчетной задачи с использованием правой кнопки мыши и выбором в контекстном меню кнопки «<i>Rename</i>».</p>

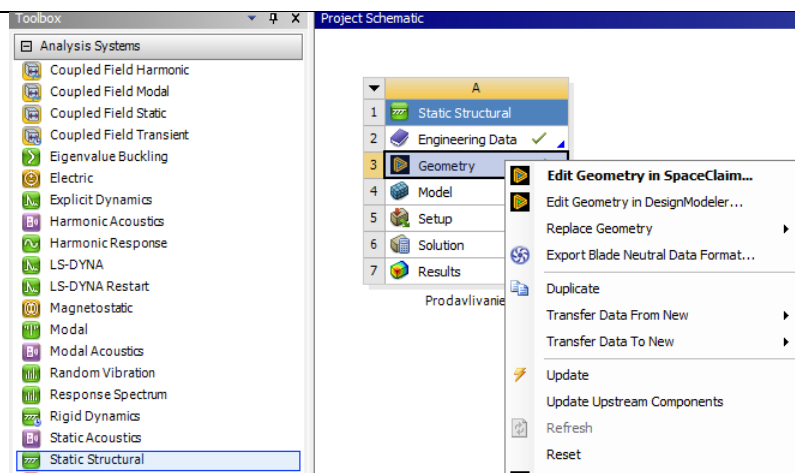


2. Создание геометрии расчетной модели

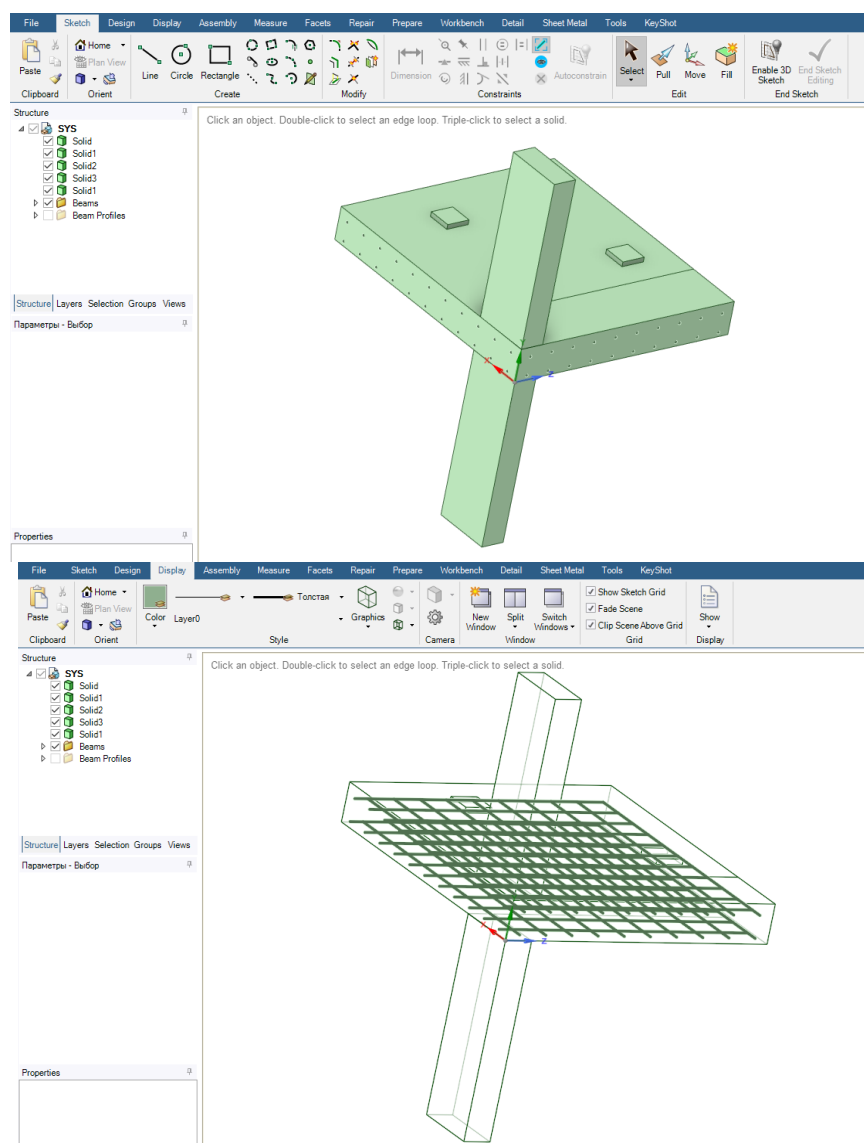
При нажатии правой кнопкой мыши по значку «3.Geometry» в основном окне Workbench(в ранее созданной расчетной задаче) в контекстном меню выбираем один из двух встроенных инструментов для создания геометрии модели: «*SpaceClaim*» или «*DesignModeler*». Рекомендуется использование более современного инструмента «*SpaceClaim*».

Примечание:

Создание геометрии производится различными способами, как встроенными инструментами Workbench, так и путем импорта файлов различных общепризнанных форматов для передачи и переноса геометрии(.ifsci т.п.). В данной монографии алгоритм задания геометрии расчетной схемы ввиду различных способов ее создания, не рассматривается.



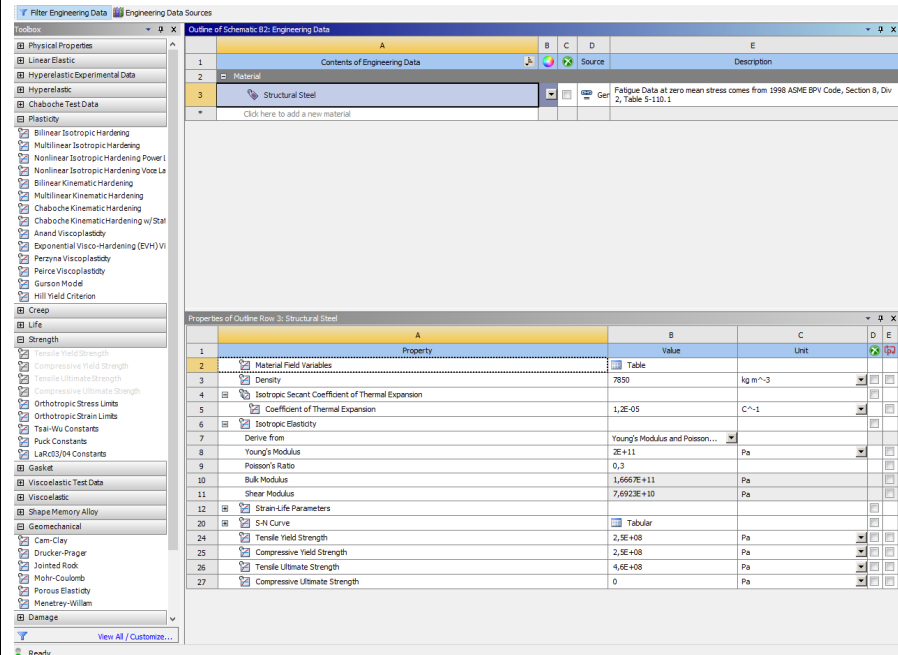
Если геометрия создана верно, напротив кнопки «3.Geometry» в окне задачи справа появляется ✓. После создания геометрии в окне «*SpaceClaim*»:




Здесь стоит отметить, что для арматуры в виде балочных элементов обязательно задается сечение с указанием радиуса или диаметра арматуры (задается параметр *BeamProfiles* в древовидном меню слева).

3. Добавление физически нелинейных моделей материалов бетона и арматуры

При нажатии двойным щелчком мыши по значку «2. EngineeringData» в основном окне Workbench(в ранее созданной расчетной задаче)попадаем в библиотеку используемых в данной задаче материалов.

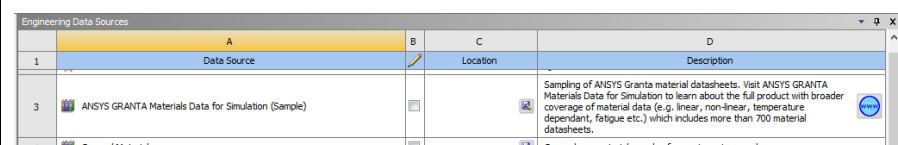


Слева в древовидном меню «Toolbox» располагаются все доступные к применению математические модели описания для активного материала. В верхней центральной части расположен список используемых в данной задаче материалов. В нижней центральной части расположены физико-механические параметры для описания выбранного активного материала.

Заходим в полную библиотеку доступных материалов – «EngineeringDataSources». В верхнем центральном открывшемся меню находим и выбираем нажатием клавиши библиотеку «GeneralNon-linearMaterials». В меню ниже напротив материалов «ConcreteNL»и «StructuralSteelNL»в столбце «Add»нажимаем .

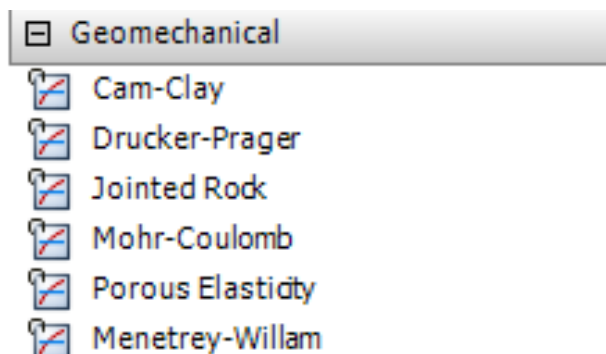
После добавления данных выбранных материалов в расчетную задачу рядом с  появляется значок .

Закрываем полную библиотеку материалов повторным нажатием по радио-кнопке «EngineeringDataSources».



4. Задание численного описания материала бетона

Из основного списка применяемых в задаче материалов выбираем щелчком мыши материал «ConcreteNL». Слева в древовидном меню «Toolbox» выбираем и раскрываем раздел «Geomechanical»:



Далее двойным щелчком мыши добавляем модель «Menetrey-Willam» к описанию модели бетона:

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	3E+10	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,18		
8	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength		Pa	
13	Uniaxial Tensile Strength		Pa	
14	Biaxial Compressive Strength		Pa	
15	Dilatancy Angle		radian	

При нажатии на строку №10 в нижнем центральном окне, отвечающему за задание параметров материала, слева в древовидном меню «Toolbox» двойным щелчком мыши выбираем модель разупрочнения «Softening».

Далее в строке № 17 «ActiveTable» меняем «Linear» на «Exponential».

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	3E+10	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,18		
8	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength		Pa	
13	Uniaxial Tensile Strength		Pa	
14	Biaxial Compressive Strength		Pa	
15	Dilatancy Angle		radian	
16	Softening			
17	Active Table	Exponential		
18	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength			
19	Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening			
20	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening			
21	Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening			
22	Residual Compressive Relative Stress			
23	Mode 1 Area Specific Fracture Energy		N m ⁻¹	
24	Residual Tensile Relative Stress			

Заполняем необходимые значения для математического описания модели бетона на основании п.2.1 раздела 2 данного пособия:

Properties of Outline Row 5: Бетон				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2400	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Po...		
6	Young's Modulus	19390	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,2		
8	Bulk Modulus	1,0772E+10	Pa	
9	Shear Modulus	8,0792E+09	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength	21,2	MPa	
13	Uniaxial Tensile Strength	1,6	MPa	
14	Biaxial Compressive Strength	25,45	MPa	
15	Dilatancy Angle	3,1	degree	
16	Softening			
17	Active Table	Exponential		
18	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength	0,00187		
19	Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,00342		
20	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening	0,2		
21	Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,85		
22	Residual Compressive Relative Stress	0,2		
23	Mode 1 Area Specific Fracture Energy	164	N m ⁻¹	
24	Residual Tensile Relative Stress	0,01		



5. Задание численного описания материала арматуры

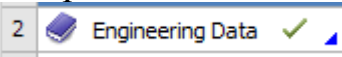
Из основного списка применяемых в задаче материалов выбираем щелчком мыши материал «*StructuralSteelNL*».

Properties of Outline Row 5: Structural Steel NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	2E+11	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
10	Bilinear Isotropic Hardening			
11	Yield Strength	2,5E+08	Pa	
12	Tangent Modulus	1,45E+09	Pa	

В нижнем окне заполняем необходимые значения для математического описания модели арматурной стали на основании п.2.2 раздела 2 данного пособия:

Properties of Outline Row 4: Rebar				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Po...		
6	Young's Modulus	2E+05	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
10	Bilinear Isotropic Hardening			
11	Yield Strength	500	MPa	
12	Tangent Modulus	727	MPa	

Сохраняем введенные данные в библиотеку материалов задачи нажатием  в верхнем левом углу окна «Workbench». Закрываем окно библиотеки материалов нажатием крестика  **A2:Engineering Data**, возвращаясь в основное меню «Workbench».

В основном меню при примененных параметрах материалов напротив строки №2 в меню к расчетной задаче ставится галочка .

6. Задание материалов для созданной геометрии модели

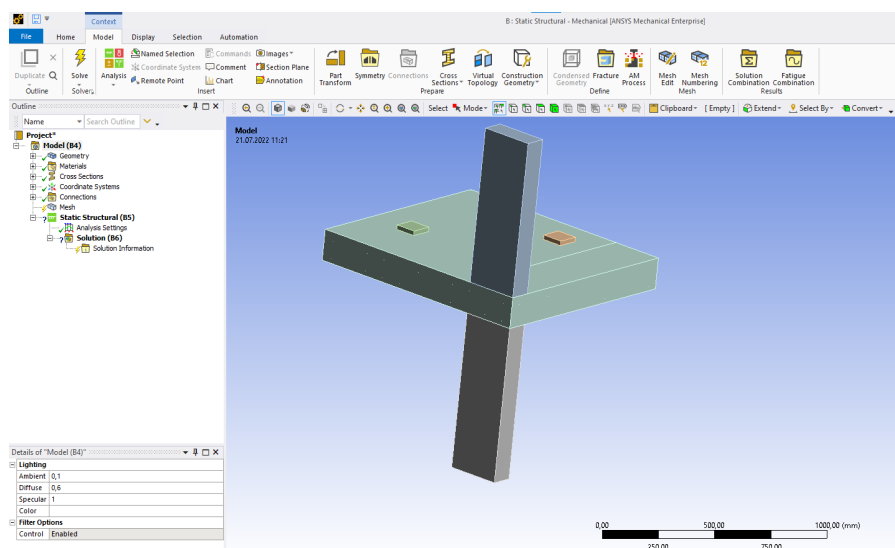
Выбираем двойным нажатием мыши в основном меню «Workbench» в окне расчетной задачи значок «Model»:




После некоторого времени, программа открывает дополнительное окно для дальнейшего моделирования текущей задачи – интерфейс для «Mechanical-APDL».

В древовидном меню слева («Outline») располагаются вкладки с основными параметрами модели, чуть ниже - поля для их подробного редактирования. В верхней части расположено ленточное меню с основными инструментами для работы с моделью.

В центральной части располагается сама расчетная модель с заранее заданной геометрией:



Слева в древовидном меню «*Outline*» раскрываем список во вкладке  *Geometry* .

Нажимая на каждый отдельный набор геометрии во вкладке «*Geometry*» справа в основном окне модели зеленым цветом выделяется выбранный набор геометрии.

Выбираем в списке «*Geometry*» трисолида (тела), моделирующие участки колонн и саму плиту. Снизу слева в поле для редактирования параметров «*Details of SYS/Solid*» находим вкладку «*Material*» и в строке напротив «*Assignment*» выбираем ранее заданный материал «*ConcreteNL*». Удостоверяемся, что напротив следующей строки «*Nonlinear Effects*» стоит значение «*Yes*».

Выбираем в списке «*Geometry*» солиды – грузовые пластины и задаем им через вкладку «*Material*» в строке напротив «*Assignment*» стандартный материал «*Structural Steel*».

Выбираем в списке «*Geometry*» все балочные (линейные) элементы смоделированной ранее арматуры

Снизу слева в поле для редактирования параметров «*Details of Multiple Selection*» находим вкладку «*Material*» и в строке напротив «*Assignment*» выбираем ранее заданный материал «*Structural SteelNL*». Удостоверяемся, что напротив следующей строки «*Nonlinear Effects*» стоит значение «*Yes*».

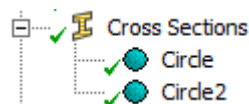
В поле для редактирования параметров «*Details of Multiple Selection*» находим вкладку «*Definition*» и в строке напротив «*Model Type*» заменяем стандартный тип элемента «*Beam*» на «*Reinforcement*».

Примечание:

При использовании версий ПК «*ANSYS Workbench*» до 2021 R1, параметр «*Reinforcement*» в «*Model Type*» отсутствует. Для смены типа конечных элементов с балочного на армирующий в этом случае требуется вставка команды на внутри программном языке APDL.

Details of "SYS\Beam (Circle)"	
Graphics Properties	
Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Model Type	Reinforcement
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Cross Section	Circle
Material	
<input type="checkbox"/> Assignment	Rebar
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes

Слева в древовидном меню «*Outline*» в открытой вкладке «*CrossSection*» проверяем наличие заранее заданного сечения арматурных стержней:

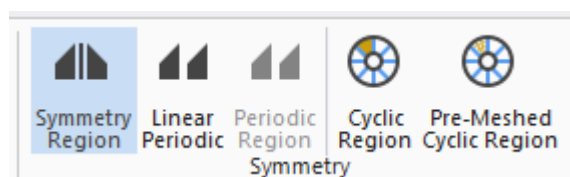


7. Задание условий для осесимметричной задачи

Так как модель является осесимметричной, то необходимо создать симметрию модели. Для этого при нажатии на **Model (B4)** в древовидном меню «*Outline*» сверху в ленточном меню появляется вкладка «*Model*». В данной вкладке в разделе «*Prepare*» необходимо выбрать «*Symmetry*»:

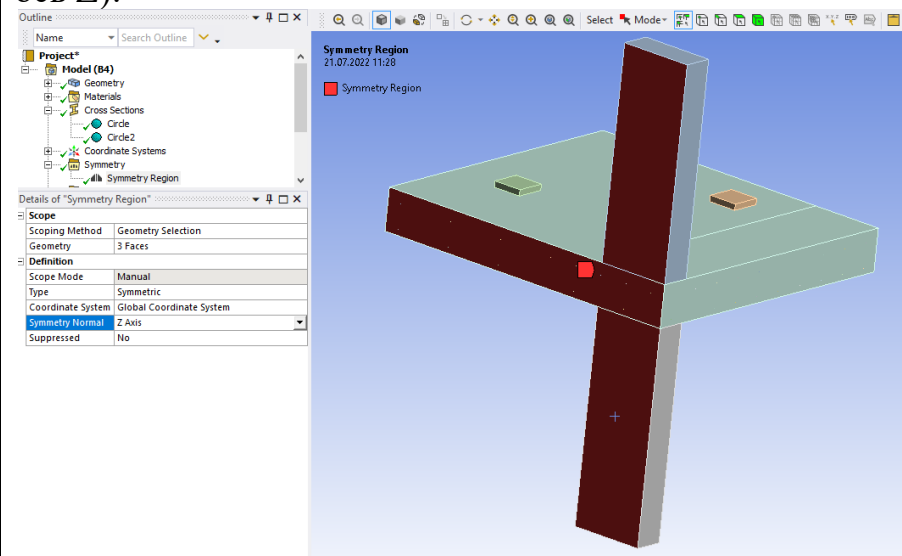


После этого слева в древовидном меню «*Outline*» появляется вкладка «*Symmetry*». При нажатии на данный заголовок сверху в ленточном меню появляется вкладка «*Symmetry*», в данной вкладке необходимо выбрать «*SymmetryRegion*»:

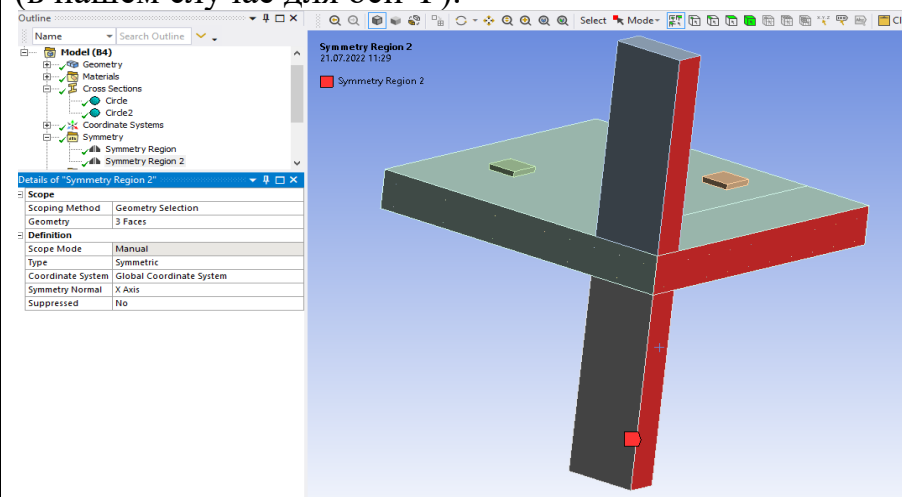


После этого слева в древовидном меню «*Outline*» появляется параметр «*SymmetryRegion*». При нажатии на него снизу во вспомогательном меню «*Detailsof SymmetryRegion*» необходимо выбрать строку «*Geometry*» после чего с зажатой кнопкой «*Ctrl*» выбрать все плоскости, относительно которых задача является симметричной, после этого в древовидном меню необходимо нажать на радио-кнопку «*Apply*», подтвердив свой выбор.

Далее в том же меню «*Details of «SymmetryRegion»*» в строке напротив «*SymmetryNormal*» необходимо выбрать ось, перпендикулярную выбранным плоскостям (в нашем случае – ось Z):



Те же самые операции по созданию плоскости симметрии необходимо выполнить для перпендикулярного направления (в нашем случае для оси Y):

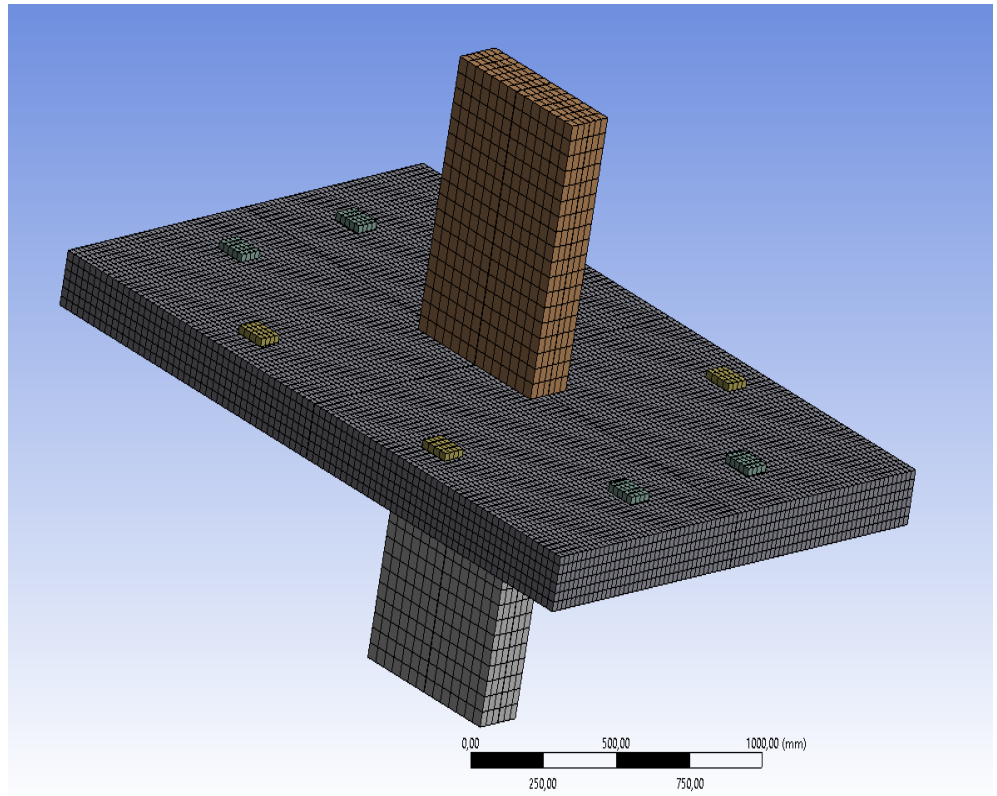


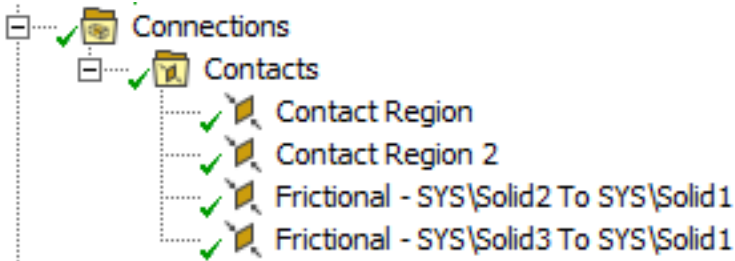
С целью анализа результатов для всей модели в целом, необходимо в основном окне «Workbench» сверху перейти в раздел настроек: «Tools»>«Options». В открывшемся окне во вкладке «Appearance» необходимо поставить галочку напротив «BetaOptions».


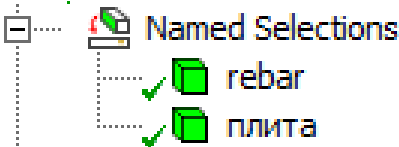

Далее в окне «Mechanical» при нажатии в древовидном меню «Outline» на заголовок вкладки «Symmetry» снизу в окне «Detail of «Symmetry»» нужно задать настройки для «GraphicalExpansion 1, 2». Если центр глобальных осей совпадает с центром тяжести колонны, то настройки должны выглядеть следующим образом:

Если центр глобальных осей не совпадает с центром тяжести

Details of "Symmetry"	
Graphical Expansion 1 (Beta)	
Num Repeat	2
Type	Cartesian
Method	Half
ΔX	0, mm
ΔY	0, mm
ΔZ	1, mm
Coordinate System	Global Coordinate System
Graphical Expansion 2 (Beta)	
Num Repeat	2
Type	Cartesian
Method	Half
ΔX	-1, mm
ΔY	0, mm
ΔZ	0, mm
Coordinate System	Global Coordinate System

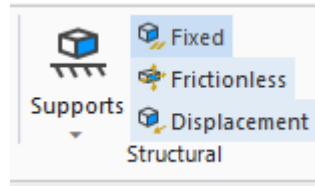


<p>8. Задание контактов между грузовыми площадками и плитой</p>	<p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» в открытой вкладке «<i>Connections</i>»>«<i>Contacts</i>»выбираем контактные поверхности между верхними грузовыми пластинами и плитой (справа в основном виде с геометрией модели красным и синим цветом выделяются выбранные контактные поверхности).</p> <p>Для выбранных контактов в нижнем меню «<i>Details of ContactRegion</i>»во вкладке «<i>Definition</i>»в строке напротив «<i>Type</i>»меняем значение на «<i>Frictional</i>»(контакт, моделирующий трение стали по бетону).</p> <p>Ниже напротив строки «<i>FrictionCoefficient</i>» вводим значение коэффициента трения, равного 0,4:</p> <table border="1" data-bbox="539 763 1366 898"> <tr> <td colspan="2">[-] Definition</td> </tr> <tr> <td>Type</td> <td>Frictional</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Friction Coefficient</td> <td>0,4</td> </tr> </table>	[-] Definition		Type	Frictional	<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0,4
[-] Definition							
Type	Frictional						
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0,4						
	<p>Две контактные поверхности в списке (между торцамиколонны,верхней и нижней плоскостью плиты) оставляем без изменения – «<i>Bonded</i>» (жесткое сопряжение бетонных поверхностей).</p> <p>После создания всех контактных поверхностей во вкладке «<i>Connections</i>» древовидного меню слева:</p> 						

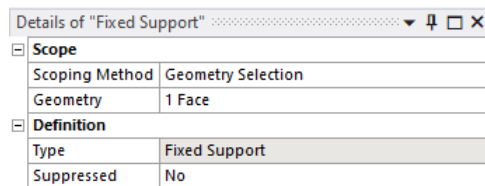
<p>9. Создание именованных наборов для бетона и арматуры плиты</p>	<p>Для дальнейшего удобства анализа результатов расчета создадим две именованные выборки («<i>NamedSelections</i>») для бетона и армирования плиты.</p> <p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» раскрываем список во вкладке  Geometry .</p> <p>В списке находим солид (тело) плиты, нажимаем правой кнопкой мыши и в контекстном меню выбираем пункт «<i>CreateNamedSelection</i>», во всплывшем окне вводим наименование выборки (допустим «<i>плита</i>»).</p> <p>В том же списке с геометрией находим все линейные элементы, моделирующие нижнюю арматуру плиты (для выбора всех элементов используем зажатую кнопку Shift), нажимаем правой кнопкой мыши на любом из выбранных элементов и в контекстном меню выбираем пункт «<i>CreateNamedSelection</i>», во всплывшем окне вводим наименование выборки (допустим «<i>rebar</i>»).</p> <p>После создания именованных выборок в древовидном меню «<i>Outline</i>» появляется новая вкладка:</p> 
<p>10. Задание граничных условий</p>	<p>В данной задаче за опору принимаем нижнюю поверхность моделируемого участка колонны под плитой.</p> <p>Для задания граничного условия слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» нажимаем на заголовок вкладки  Static Structural (A5) .</p>

При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Environment*».

В данной вкладке для задания закреплений расчетной области выбираем в разделе «*Structural*» вид закрепления – «*Fixed*»:




Слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*Static Structural*» появляется параметр «*Fixed Support*». При нажатии на него в нижнем меню «*Details of Fixed Support*» необходимо нажать на строчку «*Geometry*», после чего в основном меню с геометрией модели необходимо выбрать нижнюю плоскость нижнего участка колонны, после чего в той же строчке «*Geometry*» в древовидном меню необходимо нажать на радио-кнопку «*Apply*», подтвердив свой выбор:



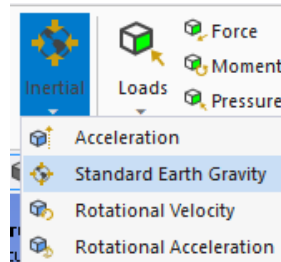
11. Задание условий нагружения конструкции

В качестве условия для нагружения конструкции используем усилие, приложенное к двум грузовым пластинам, расположенным на поверхности плиты (использование давления по нагружающей поверхности – «*Pressure*» не рекомендуется).

Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  **Static Structural (A5)**.


При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Environment*».

Для задания собственного веса балки находим вкладку «*Inertial*» и выбираем нажатием – «*Standard Earth Gravity*»:



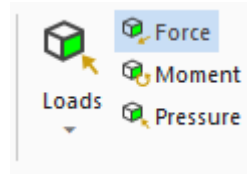
11. Задание условий нагружения конструкции

Проверяем направление приложения собственного веса в древовидном меню слева, при необходимости во вспомогательном нижнем меню в строке «*Direction*»изменяем направление приложения нагрузки.

Слева в древовидном меню «*Outline*»нажимаем на заголовок вкладки  **Static Structural (A5)**.

При нажатииданной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Environment*».

В данной вкладке для задания нагружения плиты выбираем нажатием – «*Force*»:



После этого слева в древовидном меню «*Outline*» в вкладке «*StaticStructural*»появляетсяпараметр «*Force*».

При нажатии на него в нижнем меню «*Details of Force*» необходимо нажать на строчку «*Geometry*», после чего в основном меню с геометрией модели необходимо выбратьдве верхние плоскости грузовой пластины (через зажатую кнопку Ctrl), после чего в той же строчке «*Geometry*» в древовидном меню необходимо нажать на радио-кнопку «*Apply*», подтвердив свой выбор.


Далее в том же меню «*Details of Force*» напротив строки «*Magnitude*»необходимо ввести значение приложенного усилия (в данной задаче рекомендуется значение – 100 000 Н (100 кН)).

Т.к. усилие прикладывается на втором шаге расчета, то необходимо вручную изменить условия нагружения конструкции по шагам в таблице справа «*TabularData*»:

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
Definition	
ID (Beta)	259
Type	Force
Define By	Components
Applied By	Surface Effect
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0, N (ramped)
Y Component	Tabular Data
<input type="checkbox"/> Z Component	0, N (ramped)
Suppressed	No
Tabular Data	
Independent Variable	Time


	Steps	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> X [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Y [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Z [N]
1	1	0,	= 0,	0,	= 0,
2	1	1,	0,	0,	0,

12. Задание настроек и создание сетки объемных конечных элементов


Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  Mesh .

При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Mesh*».

В данной вкладке нажимаем на значок «*Method*».

После этого слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*Mesh*» появляется параметр «*AutomaticMethod*». Нажимаем на него. В основном окне с геометрией модели выделяем все тела рамкой (при этом сверху должен быть выбран метод выделения - ). Слева в нижнем меню «*Details of Method*» подтверждаем выбор геометрии радио-кнопкой «*Apply*».


Далее в этом же меню во вкладке «*Definition*» в строчке «*Method*» меняем метод разбивки сетки КЭ на «*MultiZone*». В раскрывшихся настройках изменяем параметр «*ElementOrder*» на «*Quadratic*».

Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  Mesh .

При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Mesh*».

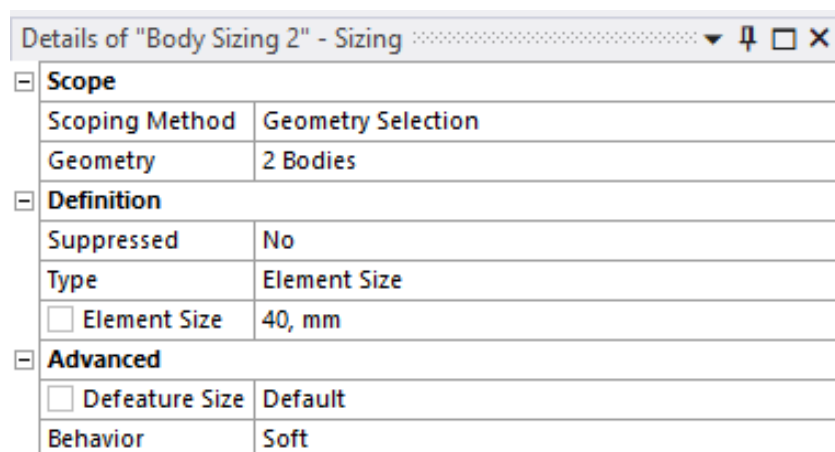
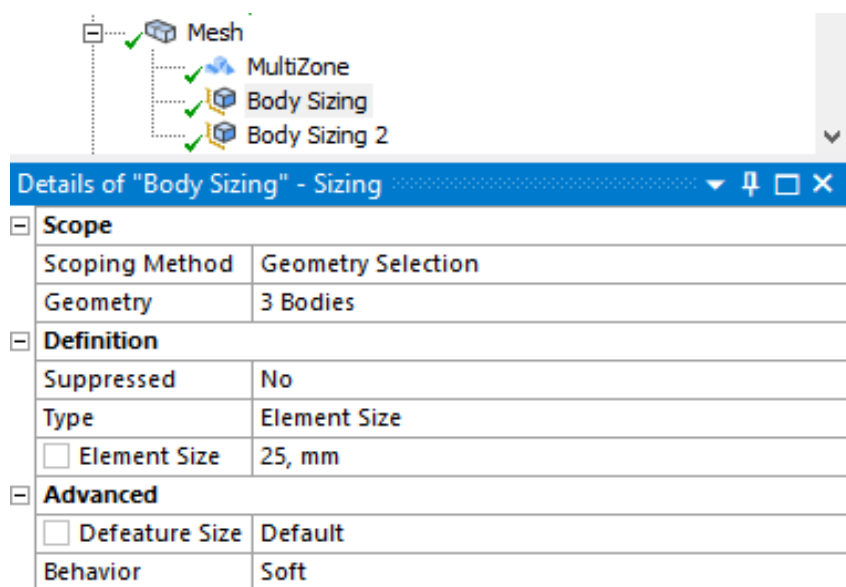
В данной вкладке нажимаем на значок «*Sizing*».

Данный параметр появляется во вкладке «*Mesh*» древовидного меню слева.

Нажав на параметр «*BodySizing*» в нижнем меню «*Details of BodySizing*» и далее на строку «*Geometry*» слева в основном окне выбираем тело плиты, а также грузовые пластины, рамкой с включенной радиокнопкой , далее подтверждаем выбор всех тел нажав на радио-кнопку «*Apply*».


В этом же меню во вкладке «*Definition*» задаем значение размера грани объемных конечных элементов в поле «*ElementSize*» (в данной задаче наиболее оптимальное значение размера КЭ для плиты составляет 25 мм).


Выполняем создание «BodySizing 2» аналогично вышеприведенным указаниям. Данные параметры сетки КЭ применяем для тел - участков колонн выше и ниже плиты. В «BodySizing 2» во вкладке «Definition» задаем значение размера грани объемных конечных элементов в поле «ElementSize» (в данной задаче наиболее оптимальное значение размера КЭ для колонн составляет 40 мм).



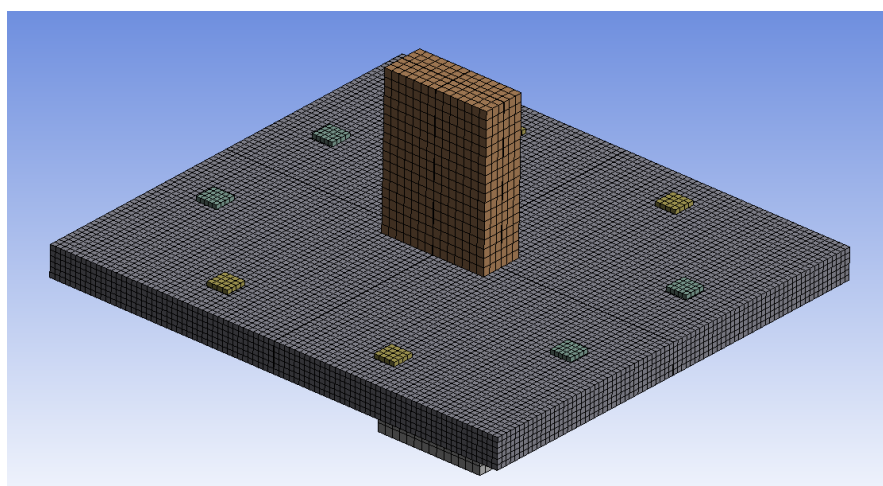
Примечание

Размер конечного элемента стоит задавать таким образом, чтобы по высоте сечения конструкция разбивалась не менее, чем на 8 конечных элементов (в нашем случае – 6 КЭ, однако используются квадратичные функции формы КЭ, что увеличивает точность вычисления параметров НДС в 2 раза). При этом величину грани конечного элемента не стоит задавать меньше среднего размера заполнителя бетона.

Производим разбивку геометрии модели на конечные элементы, нажав правой кнопкой мыши на заголовок вкладки  Mesh и в контекстном меню выбрав действие - «GenerateMesh».

Общее число узлов и конечных элементов в задаче можно увидеть, нажав на заголовок вкладки  Mesh и в нижнем меню раскрыв самый нижний параметр «Statistics»:

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	55766
<input type="checkbox"/> Elements	11960



(визуализация с учетом симметрии задачи)

13. Задание настроек нелинейного решателя

Ниже приведен алгоритм основных настроек нелинейного решателя, однако, необходимо помнить, что данные настройки могут существенно изменяться в зависимости от типа рассматриваемой задачи.

Слева в древовидном меню «Outline» в вкладке «StaticStructural» нажимаем на параметр, отвечающий за настройки решателя – «AnalysisSettings».

Внижнемменю «Detailsof «AnalysisSettings» вкладке «StepControls» создаем два основных шага расчета («NumberOfSteps» - 2),изменяемзначение параметра «AutoTimeStepping»на «On» для каждого шага, далее заполняем раскрывшиеся настройки следующим образом:

Step Controls	
Number Of Steps	2,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	10,
Minimum Substeps	10,
Maximum Substeps	100,

Step Controls	
Number Of Steps	2,
Current Step Number	2,
Step End Time	2, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Carry Over Time Step	Off
Initial Substeps	100,
Minimum Substeps	100,
Maximum Substeps	4000,

Переходим в следующую вкладку «SolverControls», где меняем параметр «SolverType»на «Direct» (прямой метод решения). Также включаем возможность расчета при больших деформациях, изменяя параметр «LargeDeflection»на «On».


Переходим в следующую вкладку «NonlinearControls», где изменяем тип нелинейного решателя на несимметричный решатель Ньютона-Рафсона (в первом параметре выставляем «Unsymmetric»).

Далее каждого шага расчета отключаем все возможные типы отслеживания (контроля) сходимости решателя (переводя их в режим «Remove»или «Off»), за исключением отслеживания сходимости по перемещениям (для этого напротив «DisplacementConvergence»выставляем «On»). Значение погрешности сходимости в 0,5% в данной задаче является достаточным (в некоторых расчетных случаях используется значение ниже, допустим – 0,1 %):

Nonlinear Controls	
Newton-Raphson O...	Unsymmetric
Force Convergence	Remove
Moment Convergence	Remove
Displacement Conve...	On
--Value	Calculated by solver
--Tolerance	0,5%
--Minimum Reference	0, mm
Rotation Convergen...	Remove
Line Search	Off
Stabilization	Off

14. Создание шаблонов для вывода основных результатов расчета

Для получения результатов по внутренним параметрам НДС конструкции необходимо создать основные шаблоны результатов.

Для этого слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  **Solution (A6)**. При нажатии данного заголовка сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Solution*»:

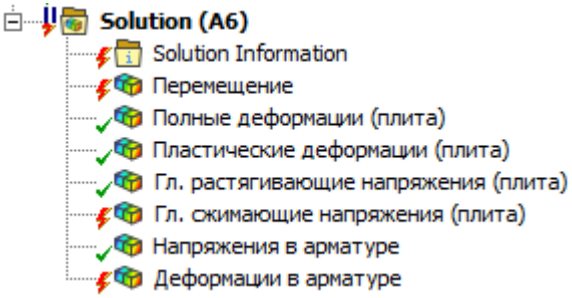

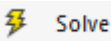
Раскрываем вкладку «*Deformation*» и выбираем «*Directional Deformation*». В нижнем меню «*Details of Directional Deformation*» во вкладке «*Definition*» в строке «*Orientation*» выбираем направление, соответствующее вертикальному прогибу балки (в данном случае глобальная ось Y).

Таким же образом выполняем следующие операции:

«*Solution*» > «*Strain*» > «*Equivalent Plastic Strain*»;
 «*Solution*» > «*Strain*» > «*Equivalent Total Strain*»;
 «*Solution*» > «*Stress*» > «*Maximum Principal Stress*»;
 «*Solution*» > «*Stress*» > «*Minimum Principal Stress*»;
 «*Solution*» > «*Stress*» > «*Equivalent (von-Mises) Stress*»;
 «*Solution*» > «*Strain*» > «*Equivalent Total Strain*».

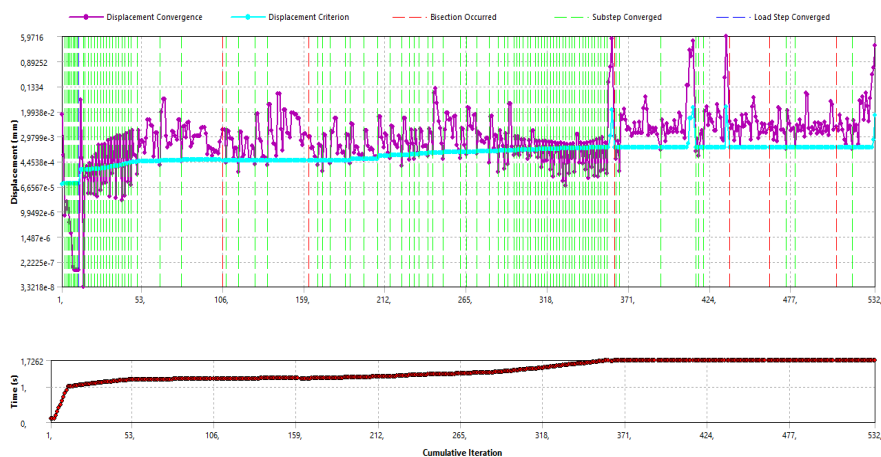
Для 1-4 шаблона результатов в нижнем меню во вкладке «*Scope*» в строке «*Scoping Method*» задаем параметр «*Named Selection*», а ниже в появившейся строке «*Named Selection*» выбираем ранее созданную именованную выборку – «*плита*».

Для 5-6 шаблона результатов в нижнем меню во вкладке «*Scope*» в строке «*Scoping Method*» задаем параметр «*Named Selection*», а ниже в появившейся строке «*Named Selection*» выбираем ранее созданную именованную выборку – «*rebar*».

	<p>Для удобства изменяем наименование шаблонов, используя правую кнопку мыши и в контекстном меню нажав на «<i>Rename</i>».</p> <p>После создания и переименования шаблонов результатов:</p> 
<p>15. Запуск задачи на расчет</p>	<p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» нажимаем правой кнопкой мыши на  Solution (A6).</p> <p>В открывшемся контекстном меню запускаем задачу на расчет, нажав на .</p>
<p>16. Отслеживание сходимости расчета в процессе решения задачи</p>	<p>Для отслеживания процесса сходимости нелинейного шагово-итерационного решателя во время выполнения расчета используется два основных инструмента:</p> <p>3. log-файл протокола расчета, обновляемый по ходу самого расчета:</p> <p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» во вкладке «<i>Solution</i>» необходимо нажать на «<i>SolutionInformation</i>» с параметром в строкенижном меню «<i>SolutionOutput</i>» - «<i>SolverOutput</i>» (сходимость на представленном, к примеру, подшаге («<i>Substep</i>») нагружения достигнута за 8 итераций):</p> <pre> DISP CONVERGENCE VALUE = 0.4747E-02 CRITERION= 0.4764E-03 EQUIL ITER 1 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.4747E-02 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.4482E-02 CRITERION= 0.4764E-03 EQUIL ITER 2 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 0.4482E-02 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.2594E-02 CRITERION= 0.4764E-03 EQUIL ITER 3 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.2594E-02 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.2478E-02 CRITERION= 0.4764E-03 EQUIL ITER 4 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 0.2478E-02 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.5655E-03 CRITERION= 0.4764E-03 EQUIL ITER 5 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 0.5655E-03 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.1229E-02 CRITERION= 0.4764E-03 EQUIL ITER 6 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 0.1229E-02 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.1210E-02 CRITERION= 0.4764E-03 EQUIL ITER 7 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.1210E-02 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.2021E-03 CRITERION= 0.4764E-03 <<< CONVERGED EQUIL ITER 8 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC = 0.2021E-03 >>> SOLUTION CONVERGED AFTER EQUILIBRIUM ITERATION 8 *** LOAD STEP 2 SUBSTEP 22 COMPLETED. CUM ITER = 116 *** TIME = 1.21000 TIME INC = 0.500000E-02 *** MAX PLASTIC STRAIN STEP = 0.1425E-03 CRITERION = 0.1500 *** AUTO STEP TIME: NEXT TIME INC = 0.50000E-02 UNCHANGED </pre>

4. Отслеживание сходимости итерационного решения в виде графика:

Слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*Solution*» необходимо нажать на «*Solution Information*» и изменить параметр в строкенижнего меню «*Solution Output*» на «*Displacement Convergence*» (отслеживание сходимости по перемещениям узлов):



Голубыми линиями и точками на графике показан критерий сходимости (0,5 %). Фиолетовыми точками, соединенных линиями, показана каждая итерация решения. Общее число итераций, выполненных в ходе расчета, показано на графике по оси снизу – в правом углу. Вертикальными зелеными пунктирными линиями отмечают итерации, на которых достигнута сходимость решателя для каждого подшага нагружения. Вертикальными красными пунктирными линиями отмечают подшаги, на которых не достигнута сходимость и для продолжения решения потребовалось дополнительно поделить приращение нагрузки на данном подшаге нагружения в 2 раза.

Ход решения в процентах от полной нагрузки также показывается в нижнем левом углу основного окна «*Mechanical*».

17. Анализ результатов расчета

После завершения процесса расчета (время выполнения расчета на компьютере с 6 физическими ядрами и 12 потоками составило 1h17min) переходим в режим анализа результатов во вкладку «*Solution*» древовидного меню «*Outline*».

При нажатии на заголовок вкладки «*Solution*» в нижнем правом списке «*TabularData*» необходимо опуститься вниз для определения разрушающей нагрузки на образец, составляющую долю от заданной полной нагрузки:

	Time [s]	Step	Substep
90	1,7218	2,	80,
91	1,7227	2,	81,
92	1,7241	2,	82,
93	1,7243	2,	83,
94	1,7246	2,	84,
95	1,7248	2,	85,
96	2,	2,	1.e+006

Как видно из таблицы, последним сошедшимся подшагом («*Substep*») нагружения, который соответствует разрушению конструкции, является подшаг № 95.

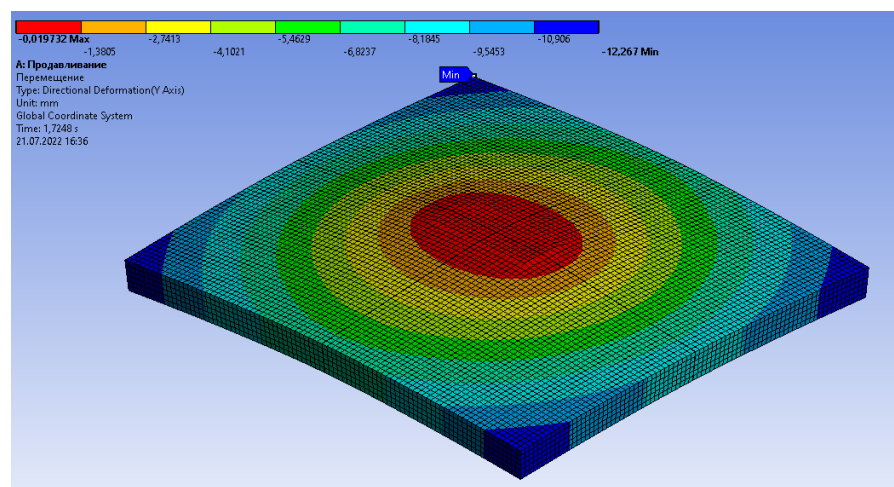
Так как нагружение образца задается по линейному закону, то предпоследнее значение в столбце «*Time (s)*» (за вычетом 1,0 – на первом шаге задается собственный вес конструкции) представляет собой несущую способность плит в долях от полной (ранее заданной в п. 11) нагрузки на образец:

$$F_{ult} = 4 \cdot 0,7248 \cdot P = 4 \cdot 0,7248 \cdot 100 = \mathbf{289,9 \text{ кН.}}$$

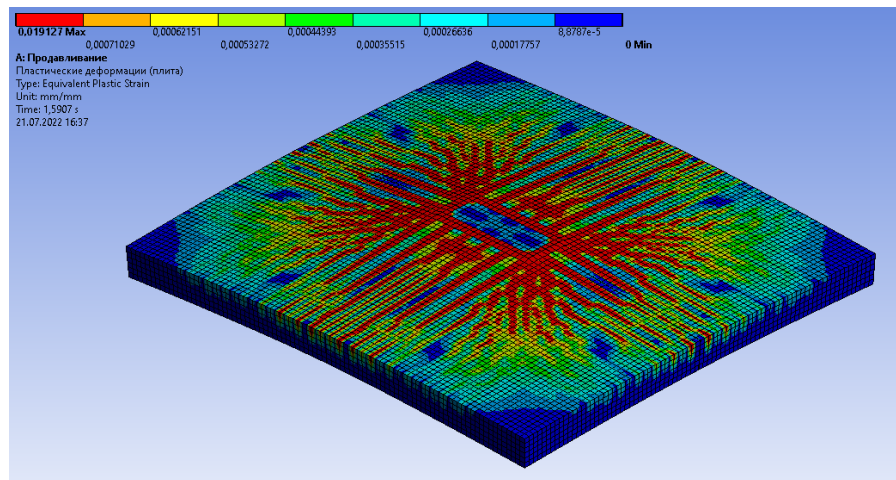
, здесь 4 – учитывает осесимметричность задачи (нагрузка в модели задана на 2 из 8 грузовые пластины)

Ниже приведем остальные основные результаты расчета:

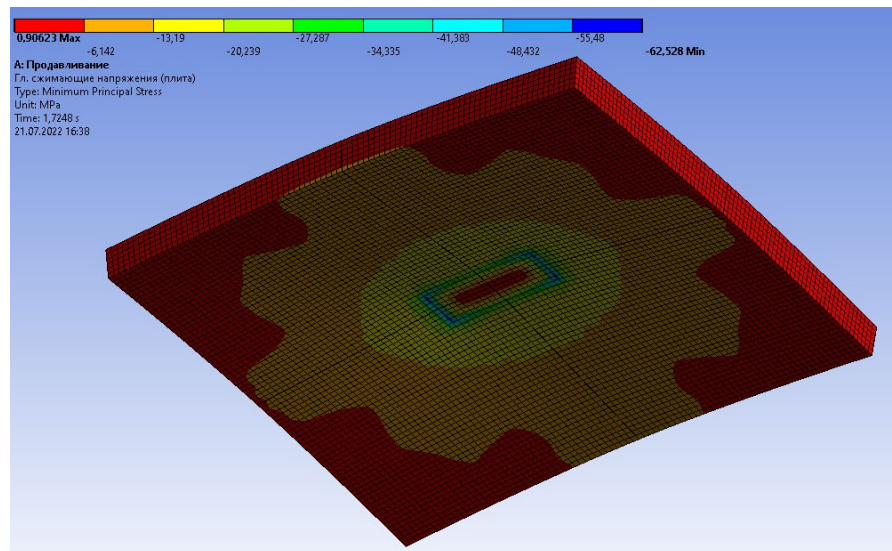
1. «*Solution*» > «*Прогиб плиты*» (при F_{ult}):



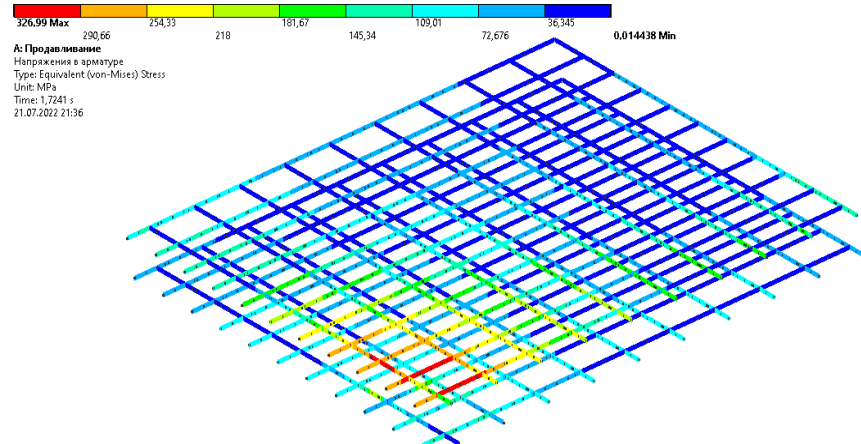
2. «Solution» > «Пластические деформации (плита)» (при F_{ult}):



3. «Solution» > «Главные сжимающие напряжения (плита)» (при F_{ult}):



4. «Solution» > «Напряжения в арматуре» (при F_{ult}):
(в арматуре не достигнута площадка текучести):



7.2. Сравнение результатов эксперимента и численного исследования

Согласно произведенному численному исследованию, предельная продавливающая сила, которая может быть воспринята монолитной плитой перекрытия в приопорной зоне, соответствует значению **289,9 кН**, что хорошо соответствует экспериментальному значению предельной несущей способности (см. табл. 72).

Погрешность в определении несущей способности опорной зоны монолитной плиты при продавливании (при разрушении по хрупкому сценарию) составляет: $\Delta = \frac{289,9 - 281,3}{281,3} \cdot 100\% = 3,06\%$.

Полученные результаты хорошо согласуются так же результатами теоретических исследований [33, 48, 83]

Ниже представлено сравнение полученных зависимостей «нагрузка-прогиб» для угловой точки плиты по результатам экспериментальных и численных исследований. Как видно, общий характер деформирования плиты под нагрузкой, полученный в ходе численного решения в ПК «ANSYS Workbench» достаточно точно описывает реальное деформирование конструкции в опытных условиях. Предельное значение прогиба при разрушении плиты, полученное в ходе численного исследования соответствует предельному прогибу в стадии разрушения опытного образца.

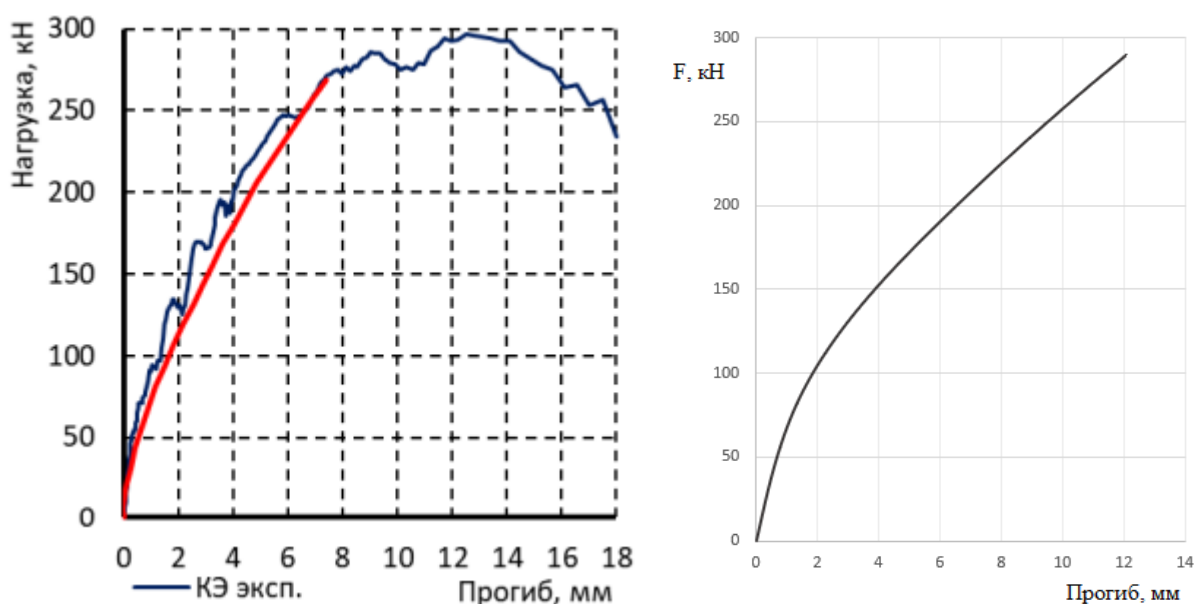


Рис. 7.3. Сравнение зависимости «нагрузка-прогиб плиты»

(слева – экспериментальная зависимость, справа – результаты расчета в ПК «ANSYS»)

Вывод: Несущая способность опорной зоны плиты перекрытия при продавливании колонной прямоугольного сечения (пилоном) в результате численного исследования вПК «ANSYSWorkbench» достаточно точно соответствует опытной несущей способности плиты при продавливании, определенной в ходе экспериментального исследования (разница в определении несущей способности составила порядка 3 %). Характер трещинообразования, а также характер деформирования плиты перекрытия в численной модели достаточно точно отражает характер трещинообразования и деформирования опытного образца плиты перекрытия в приопорной зоне.

8. Моделирование и расчет несущей способности монолитной железобетонной рамы

В данном примере целью численного исследования является определение несущей способности и особенностей напряженно-деформированного состояния железобетонной монолитной полурамы, состоящей из колонны и ригеля.

Геометрические параметры, механические свойства бетона и арматуры, а также условия нагружения монолитной рамы приняты в соответствии с экспериментально исследованной Г-образной рамы (РГ1- см. рис.7.1).[15]

Особенностью проведенного в [15] исследования является анализ возможности перераспределения внутренних усилий в раме за счет значительного деформирования только сжатого бетона колонны. Для этого в эксперименте до нагружения ригеля в середине пролета колонна центрально обжималась продольной силой с величиной, составляющей 0,85 от разрушающей (усилие обжатия колонны - 360 кН).

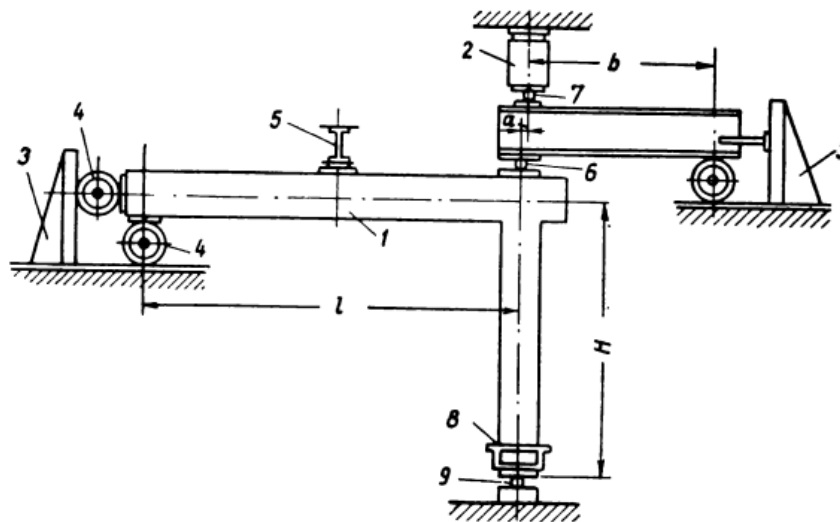


Рис.8.1 Геометрические параметры и условия нагружения исследуемого образца рамы
($L = 1,3$ м, $H = 1,0$ м, нагрузка к ригелю приложена на расстоянии 60 см от оси колонны)

Таблица 8.1. Данные по характеристикам бетона и арматуры рамы в эксперименте

№ рамы	Возраст бетона в днях	Прочность бетона в кг/см^2	Колонна в см			Ригель в см			Диаметр арматуры в мм	Площадь поперечного сечения стержня в см^2	Предел текучести в кг/см^2
			$h \times b$	a	a'	$h \times b$	a	a'			
РГ1	34	270	12×12	2	2	12×12	2,2	2	16 12	1,78 1,2	3600 3520

Армирование рамы выполнялось арматурными стержнями класса А300 (АII) из стали марки Ст.5. Колонна армировалась 4 угловыми стержнями диаметром 12 мм, ригель по всей длине армировался в нижней зоне двумя стержнями диаметром 16 мм, в верхней зоне двумя стержнями диаметром 12 мм.

Таблица 8.2. Опытные данные по разрушающим нагрузкам в процессе испытания рам

№ рам	$\bar{P}_{оп}$ в кГ	\bar{P}_T в кГ	$\frac{\bar{P}_{оп}}{\bar{P}_T}$	\bar{P}_y в кГ	$\frac{\bar{P}_{оп}}{\bar{P}_y}$	N_0 в т	$\bar{N}_ц$ в т	$\frac{N_0}{\bar{N}_ц}$
РГ1	3760	3750	1,003	2160	1,74	36,6	43,1	0,85
РГ2	4400	4175	1,054	2870	1,53	36,6	45,5	0,8
РГ3	4000	4020	0,995	2740	1,46	36,9	45,6	0,81
РГ4	4320	4230	1,021	2930	1,47	39,3	48,6	0,81
РГ5	4320	4130	1,046	2960	1,46	38,9	48,6	0,8

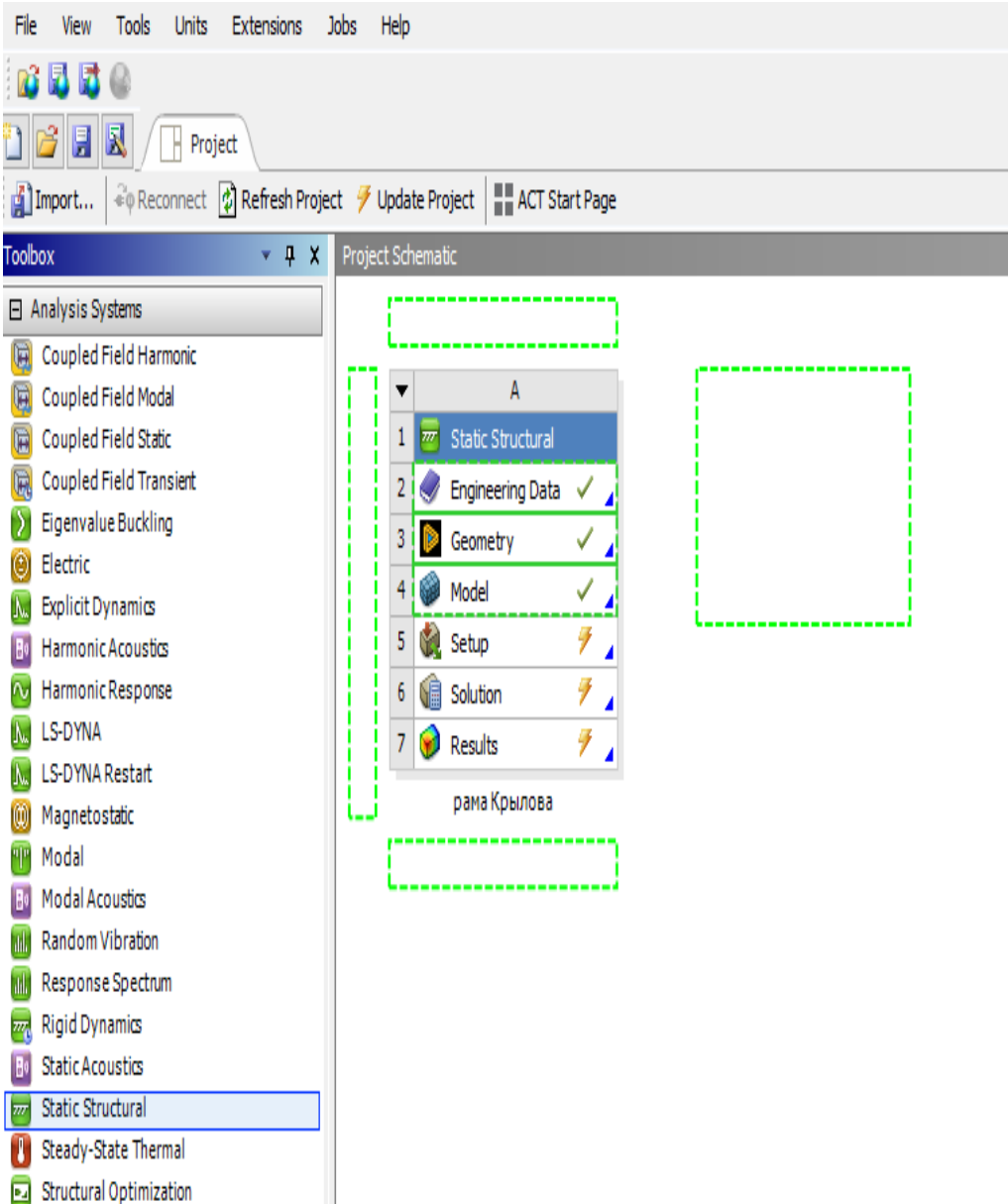
Обозначения: $\bar{P}_{оп}$ — опытная разрушающая нагрузка;
 \bar{P}_T — теоретическая разрушающая нагрузка по методу предельного равновесия;
 \bar{P}_y — разрушающая нагрузка по предельному опорному моменту из расчета однородной упругой системы;
 $\bar{N}_ц$ — предельная нагрузка, которую могла бы выдержать колонна при центральном сжатии;
 N_0 — первоначальная нагрузка на колонну.

8.1. Алгоритм моделирования и расчета

Ниже приведен основной алгоритм моделирования и расчета Г-образной железобетонной монолитной рамы в ПК «ANSYSWorkbench2022R2» для определения её несущей способности с учетом перераспределения усилий в физически-нелинейной постановке.

Процесс моделирования геометрии в приведенном примере условно не показан, так как геометрия расчетной области может создаваться различными способами: импортом твердотельной модели из CAD и BIM-систем, а также путем непосредственного создания геометрии в «ANSYSWorkbench».

Нагружение численной модели выполняется в два этапа: на первом этапе к колонне прикладывается центральная сжимающая сила, на втором этапе нагрузка прикладывается к верхней грани ригеля на расстоянии 60 см от оси колонны.

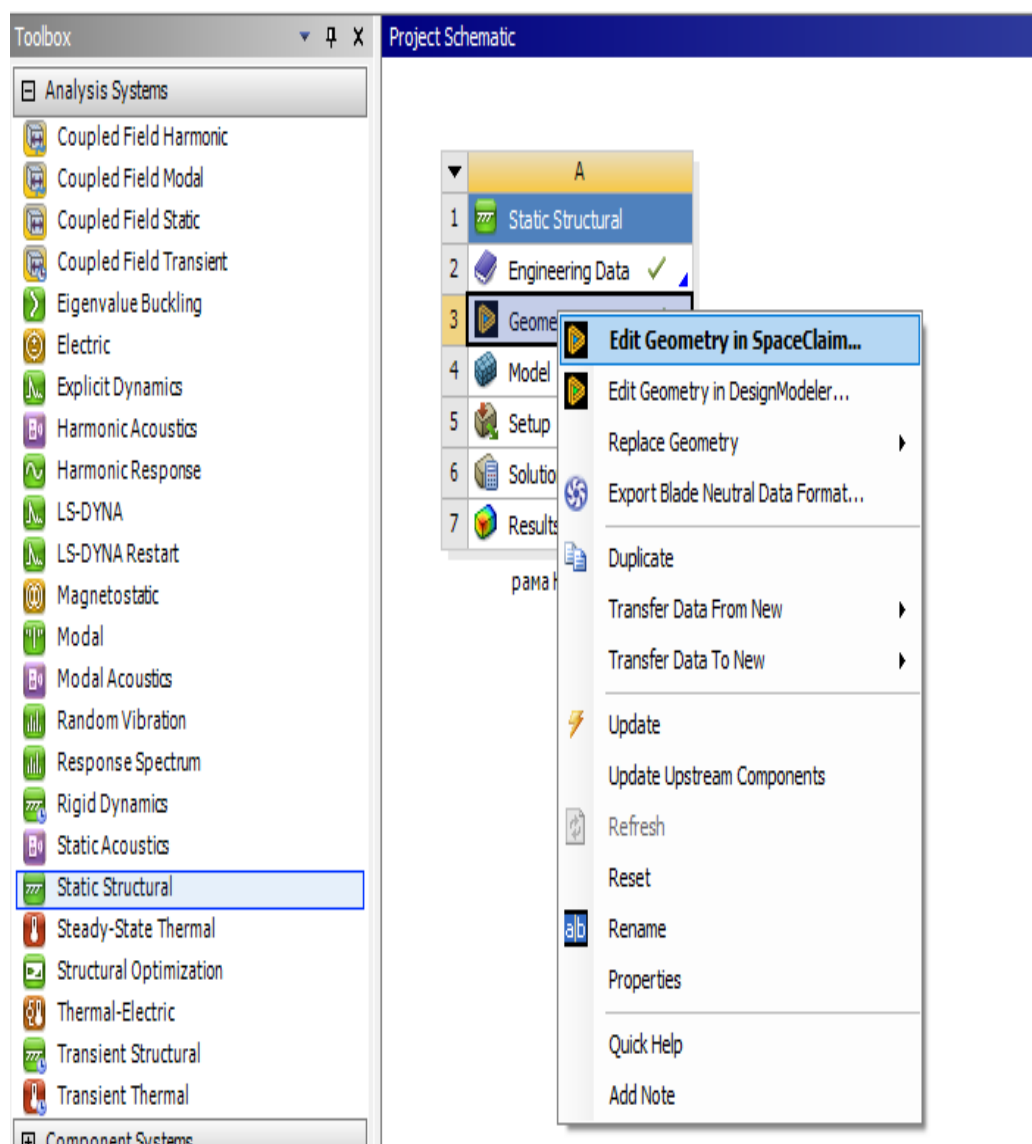
Описание действия	Алгоритм выполнения команд в интерфейсе ПК «ANSYSWorkbench»
<p>1. Создание расчетного файла и расчетного случая</p>	<p>При открытии программы «Workbench»слева в древовидном меню «Toolbox» в разделе «Analysis Systems»находим расчетный случай, соответствующий статической постановке задачи механики твердого тела - «StaticStructural».</p> <p>Двойнымщелчкомпо значку «StaticStructural» переносим расчетный случай (задачу) в правую основную область, отвечающую за связь между разными задачами в рамках единого файла - «ProjectSchematic».</p> <p>При необходимости изменяем наименование расчетной задачи с использованием правой кнопки мыши и выбором в контекстном меню кнопки «Rename».</p> 

2. Создание геометрии расчетной модели

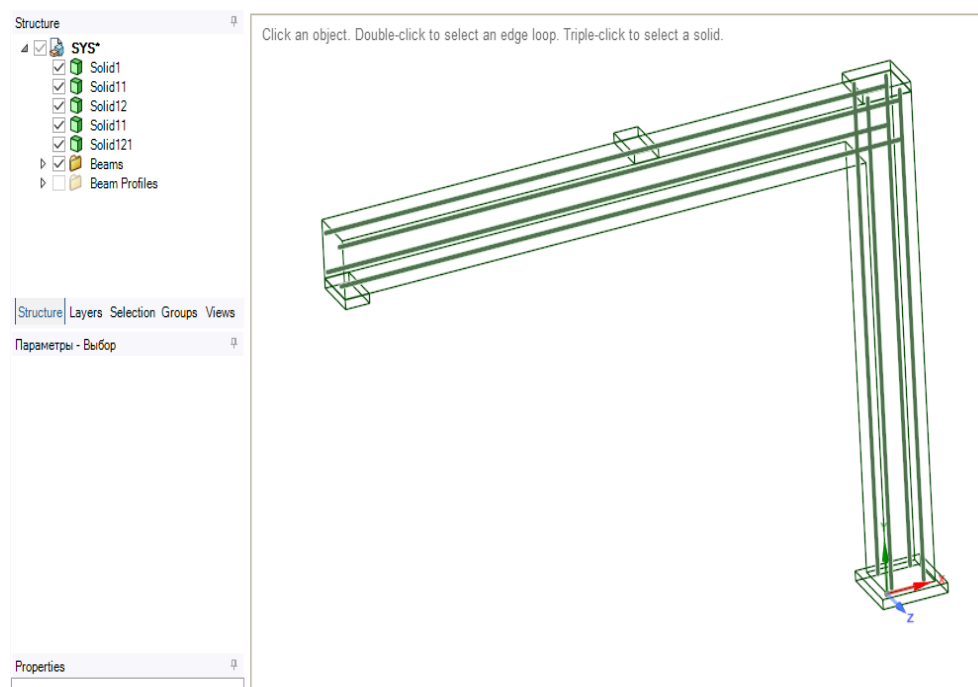
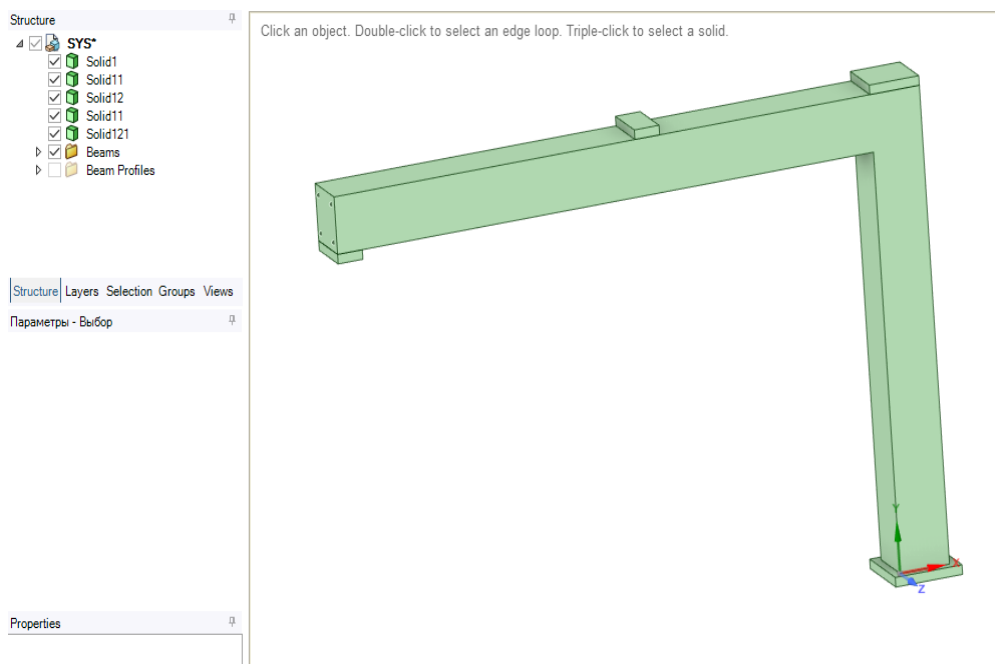
При нажатии правой кнопкой мыши по значку «3.Geometry» в основном окне Workbench(в ранее созданной расчетной задаче) в контекстном меню выбираем один из двух встроенных инструментов для создания геометрии модели: «SpaceClaim» или «DesignModeler». Рекомендуется использование более современного инструмента «SpaceClaim».

Примечание:

Создание геометрии производится различными способами, как встроенными инструментами Workbench, так и путем импорта файлов различных общепризнанных форматов для передачи и переноса геометрии(.ifc и т.п.). В данном пособии алгоритм задания геометрии расчетной схемы ввиду различных способов ее создания, не рассматривается.



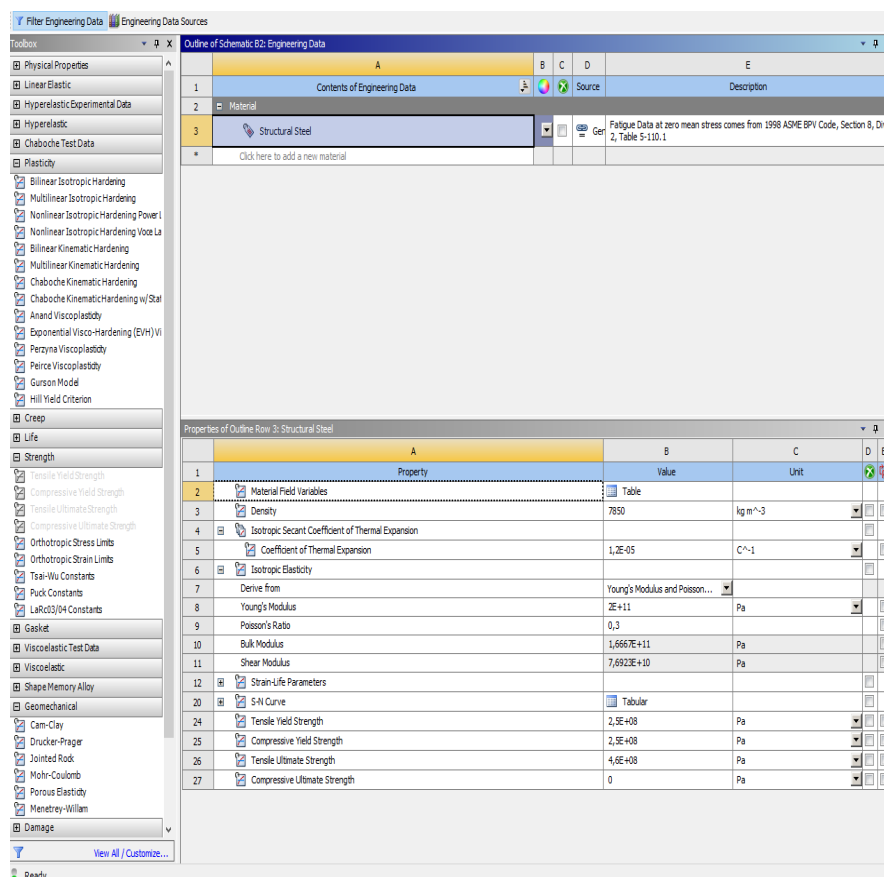
Если геометрия создана верно, напротив кнопки «3.Geometry» в окне задачи справа появляется ✓. После создания геометрии в окне «SpaceClaim»:



Здесь стоит отметить, что для арматуры в виде балочных элементов обязательно задается сечение с указанием радиуса или диаметра арматуры (задается параметр *BeamProfiles* в древовидном меню слева).

3. Добавление физически нелинейных моделей материалов бетона и арматуры

При нажатии двойным щелчком мыши по значку «2. *EngineeringData*» в основном окне Workbench(в ранее созданной расчетной задаче)попадаем в библиотеку используемых в данной задаче материалов.



Слева в древовидном меню «*Toolbox*» располагаются все доступные к применению математические модели описания для активного материала. В верхней центральной части расположен список используемых в данной задаче материалов. В нижней центральной части расположены физико-механические параметры для описания выбранного активного материала.

Заходим в полную библиотеку доступных материалов – «*EngineeringDataSources*». В верхнем центральном открывшемся меню находим и выбираем нажатием клавиши библиотеку «*GeneralNon-linearMaterials*». В меню ниже напротив материалов «*ConcreteNL*»и «*StructuralSteelNL*»в столбце «Add»нажимаем

После добавления данных выбранных материалов в расчетную задачу рядом с появляется значок .

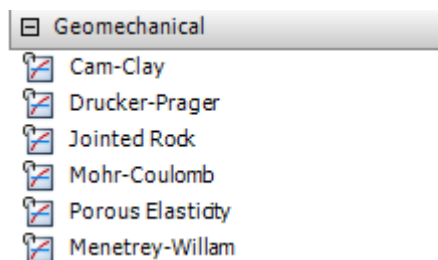
Закрываем полную библиотеку материалов повторным нажатием по радио-кнопке «*EngineeringDataSources*».

Engineering Data Sources			
A	B	C	D
Data Source		Location	Description
ANSYS GRANTA Materials Data for Simulation (Sample)			Sampling of ANSYS Granta material datasheets. Visit ANSYS GRANTA Materials Data for Simulation to learn about the full product with broader coverage of material data (e.g. linear, non-linear, temperature dependent, fatigue etc.) which includes more than 700 material datasheets.
General Materials			General use material samples for use in various analyses.
Additive Manufacturing Materials			Additive manufacturing material samples for use in additive manufacturing analyses.
Geomechanical Materials			General use material samples for use with geomechanical models.
Composite Materials			Material samples specific for composite structures.
General Non-linear Materials			General use material samples for use in non-linear analyses.
Explicit Materials			Material samples for use in an explicit analysis.
Hyperelastic Materials			Material stress-strain data samples for curve fitting.

Outline of General Non-linear Materials				
A	B	C	D	E
Contents of General Non-linear Materials	Add	Source		Description
Material				
Aluminum Alloy NL		Ger		General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
Concrete NL		Ger		
Copper Alloy NL		Ger		
Gasket Linear Unloading		Ger		
Gasket Non Linear Unloading		Ger		
Magnesium Alloy NL		Ger		
Stainless Steel NL		Ger		
Structural Steel NL		Ger		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
Titanium Alloy NL		Ger		

4. Задание численного описания материала бетона

Из основного списка применяемых в задаче материалов выбираем щелчком мыши материал «ConcreteNL». Слева в древовидном меню «Toolbox» выбираем и раскрываем раздел «Geomechanical»:



Далее двойным щелчком мыши добавляем модель «Menetrey-Willam» к описанию модели бетона:

Properties of Outline Row 3: Concrete NL			
A	B	C	D
Property	Value	Unit	
Material Field Variables	Table		
Density	2300	kg m ⁻³	
Isotropic Elasticity			
Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
Young's Modulus	3E+10	Pa	
Poisson's Ratio	0,18		
Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	
Menetrey-Willam			
Menetrey-Willam Base			
Uniaxial Compressive Strength		Pa	
Uniaxial Tensile Strength		Pa	
Biaxial Compressive Strength		Pa	
Dilatancy Angle		radian	

При нажатии на строку №10 в нижнем центральном окне, отвечающему за задание параметров материала, слева в древовидном меню «Toolbox» двойным щелчком мыши выбираем модель разупрочнения «Softening».

Далее строке № 17 «ActiveTable» меняем «Linear» на «Exponential».

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	3E+10	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,18		
8	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength		Pa	
13	Uniaxial Tensile Strength		Pa	
14	Biaxial Compressive Strength		Pa	
15	Dilatancy Angle		radian	
16	Softening			
17	Active Table	Exponential		
18	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength			
19	Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening			
20	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening			
21	Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening			
22	Residual Compressive Relative Stress			
23	Mode 1 Area Specific Fracture Energy		N m ⁻¹	
24	Residual Tensile Relative Stress			

Заполняем необходимые значения для математического описания модели бетона на основании п.2.1 раздела 2 данного пособия:

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2400	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poi...		
6	Young's Modulus	29000	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,2		
8	Bulk Modulus	1,6111E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2083E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength	21	MPa	
13	Uniaxial Tensile Strength	1,7	MPa	
14	Biaxial Compressive Strength	25,2	MPa	
15	Dilatancy Angle	3,3	degree	
16	Softening			
17	Active Table	Exponential		
18	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength	0,00184		
19	Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,00335		
20	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening	0,2		
21	Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,85		
22	Residual Compressive Relative Stress	0,2		
23	Mode 1 Area Specific Fracture Energy	182	N m ⁻¹	
24	Residual Tensile Relative Stress	0,01		



5. Задание численного описания материала арматуры

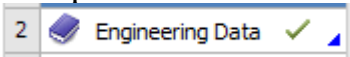
Из основного списка применяемых в задаче материалов выбираем щелчком мыши материал «*StructuralSteelNL*».

Properties of Outline Row 5: Structural Steel NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	2E+11	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
10	Bilinear Isotropic Hardening			
11	Yield Strength	2,5E+08	Pa	
12	Tangent Modulus	1,45E+09	Pa	

В нижнем окне заполняем необходимые значения для математического описания модели арматурной стали на основании п.2.2 раздела 2 данного пособия:

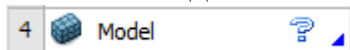
Properties of Outline Row 5: Structural Steel NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poi...		
6	Young's Modulus	2E+05	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
10	Bilinear Isotropic Hardening			
11	Yield Strength	355	MPa	
12	Tangent Modulus	1000	MPa	

Сохраняем введенные данные в библиотеку материалов задачи нажатием  в верхнем левом углу окна «Workbench». Закрываем окно библиотеки материалов нажатием крестика  **A2:Engineering Data**, возвращаясь в основное меню «Workbench».

В основном меню при примененных параметрах материалов напротив строки №2 в меню к расчетной задаче ставится галочка .

6. Задание материалов для созданной геометрии модели

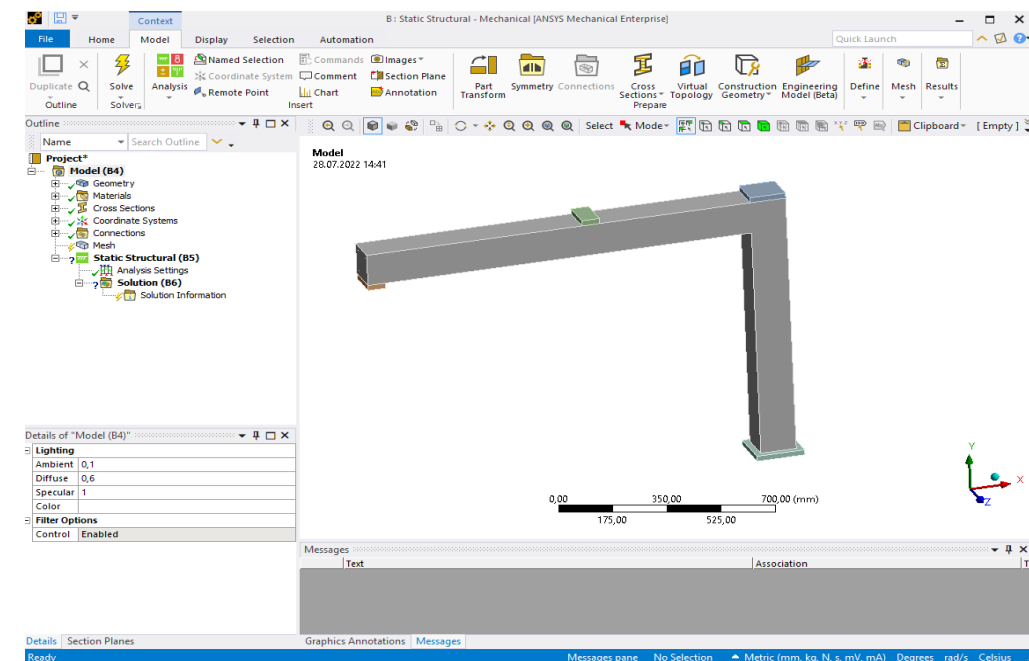
Выбираем двойным нажатием мыши в основном меню «Workbench» в окне расчетной задачи значок «Model»:




После некоторого времени, программа открывает дополнительное окно для дальнейшего моделирования текущей задачи – интерфейс для «Mechanical-APDL».

В древовидном меню слева («Outline») располагаются вкладки с основными параметрами модели, чуть ниже – поля для их подробного редактирования. В верхней части расположено ленточное меню с основными инструментами для работы с моделью.

В центральной части располагается сама расчетная модель с заранее заданной геометрией:



Слева в древовидном меню «*Outline*» раскрываем список во вкладке  *Geometry* .

Нажимая на каждый отдельный набор геометрии во вкладке «*Geometry*» справа в основном окне модели зеленым цветом выделяется выбранный набор геометрии.

Выбираем в списке «*Geometry*» солид (тело), моделирующее бетон рамы. Снизу слева в поле для редактирования параметров «*Detailsof«SYS/Solid»*» находим вкладку «*Material*» и в строке напротив «*Assignment*» выбираем ранее заданный материал «*ConcreteNL*». Удостоверяемся, что напротив следующей строки «*NonlinearEffects*» стоит значение «*Yes*».

Выбираем в списке «*Geometry*» солиды – грузовые и опорные пластины и задаем им через вкладку «*Material*» в строке напротив «*Assignment*» стандартный материал «*StructuralSteel*».

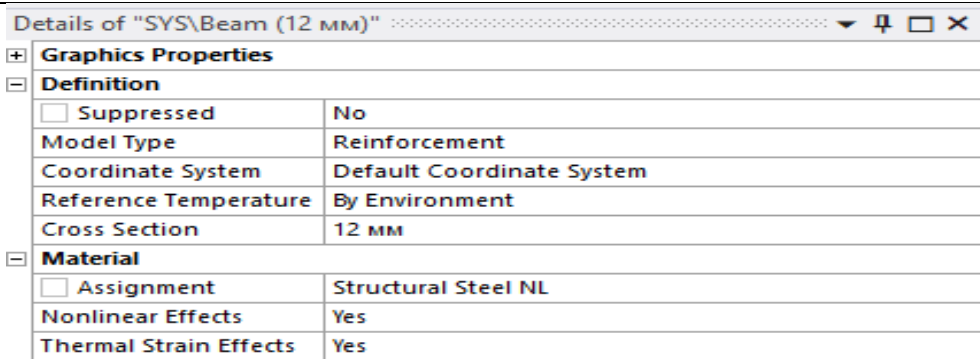
Выбираем в списке «*Geometry*» все балочные (линейные) элементы смоделированной ранее арматуры

Снизу слева в поле для редактирования параметров «*Detailsof«MultipleSelection»*» находим вкладку «*Material*» и в строке напротив «*Assignment*» выбираем ранее заданный материал «*StructuralSteelNL*». Удостоверяемся, что напротив следующей строки «*NonlinearEffects*» стоит значение «*Yes*».

В поле для редактирования параметров «*Detailsof«MultipleSelection»*» находим вкладку «*Definition*» и в строке напротив «*ModelType*» заменяем стандартный тип элемента «*Beam*» на «*Reinforcement*».

Примечание:

При использовании версий ПК «*ANSYSWorkbench*» до 2021 R1, параметр «*Reinforcement*» в «*ModelType*» отсутствует. Для смены типа конечных элементов с балочного на армирующий в этом случае требуется вставка команды на внутри программном языке APDL.



Слева в древовидном меню «*Outline*» в открытой вкладке «*CrossSection*» проверяем наличие заранее заданного сечения арматурных стержней:

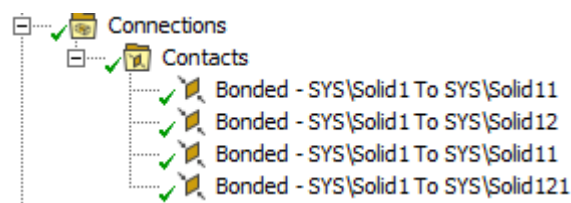


7. Задание контактов между грузовыми, опорными площадками и Г-образной рамой

Условия закрепления в задаче будут задаваться путем запрета перемещений по выбранным направлениям, поэтому контактные поверхности принимаем жесткого типа.


Слева в древовидном меню «*Outline*» в открытой вкладке «*Connections*»>«*Contacts*» выбираем все контактные поверхности и проверяем задание для них жесткого типа контакта «*Bonded*».

После создания всех контактных поверхностей во вкладке «*Connections*» древовидного меню слева:



8. Создание именованных наборов для бетона и арматуры Г-образной рамы

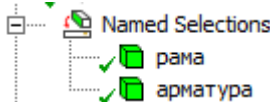
Для дальнейшего удобства анализа результатов расчета создадим две именованные выборки («*NamedSelections*») для бетона и арматуры Г-образной рамы.

Слева в древовидном меню «*Outline*» раскрываем список во вкладке  *Geometry*.

В списке находим солид (тело) рамы, нажимаем правой кнопкой мыши и в контекстном меню выбираем пункт «*CreateNamedSelection*», во всплывшем окне вводим наименование выборки (допустим «*рама*»).


В том же списке с геометрией находим все линейные элементы, моделирующие рабочую арматуру колонны и ригеля (для выбора всех элементов используем зажатую кнопку Shift), нажимаем правой кнопкой мыши на любом из выбранных элементов и в контекстном меню выбираем пункт «*CreateNamedSelection*», во всплывшем окне вводим наименование выборки (допустим «*арматура*»).

После создания именованных выборок в древовидном меню «*Outline*» появляется новая вкладка:



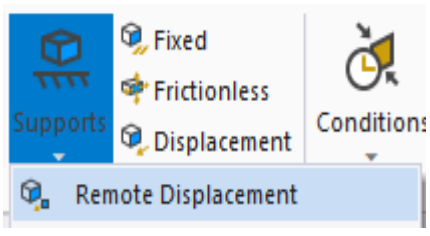
9. Задание граничных условий

В данной задаче за неподвижные шарнирные опоры принимаем опору под колонной, а также левую опору ригеля.

Для задания граничного условия слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  **Static Structural (A5)**.

При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Environment*».

В данной вкладке для задания закреплений расчетной области выбираем в разделе «*Structural*»-«*Supports*» два раза параметр – «*RemoteDisplacement*»:



Слева в древовидном меню «*Outline*» в вкладке «*StaticStructural*» появляется 2 параметра «*RemoteDisplacement*».


При нажатии на первый из них в нижнем меню «*Details of RemoteDisplacement*» необходимо нажать на строчку «*Geometry*», после чего в основном меню с геометрией модели необходимо выбрать боковую внутреннюю грань опорной пластины под ригелем, далее в той же строчке «*Geometry*» в древовидном меню необходимо нажать на радио-кнопку «*Apply*», подтвердив свой выбор. Далее в этом же меню необходимо запретить перемещения и повороты по всем направлениям, за исключением поворота в плоскости рамы (в нашем случае это глобальная ось Z):

Definition	
ID (Beta)	175
Type	Remote Displacement
<input type="checkbox"/> X Component	0, mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0, mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0, mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Rotation X	0, ° (ramped)
<input type="checkbox"/> Rotation Y	0, ° (ramped)
<input type="checkbox"/> Rotation Z	Free
Suppressed	No
Behavior	Deformable

Повторить те же самые операции необходимо и с ранее созданным ограничением перемещений - «*RemoteDisplacement 2*». При этом в качестве закрепляемой геометрии необходимо выбрать нижнюю поверхность опорной пластины под колонной.

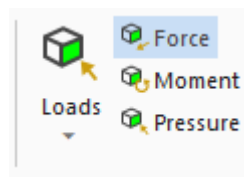
10. Задание условий нагружения конструкции

В качестве условия для нагружения конструкции используем два усилия, приложенных к двум грузовым пластинам (использование давления по нагружающей поверхности – «*Pressure*» не рекомендуется).

Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  **Static Structural (A5)**.

При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Environment*».


В данной вкладке для задания нагружения колонны обжимающей нагрузкой выбираем нажатием – «*Force*»:



После этого слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*StaticStructural*» появляется параметр «*Force*».

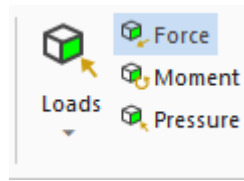
При нажатии на него в нижнем меню «*Detailsof «Force»*» необходимо нажать на строчку «*Geometry*», после чего в основном меню с геометрией модели необходимо выбрать верхнюю плоскость грузовой пластины над колонной, далее в той же строчке «*Geometry*» в древовидном меню необходимо нажать на радио-кнопку «*Apply*», подтвердив свой выбор.

Далее в том же меню «*Detailsof «Force»*» напротив строки «*Magnitude*» (или напротив выбранного направления) необходимо ввести значение приложенного усилия (в данной задаче значение обжимающего усилия составляет 360 000 Н (360 кН)).

Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  **Static Structural (A5)**.

При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Environment*».

В данной вкладке для задания нагружения ригеля выбираем нажатием – «*Force*»:

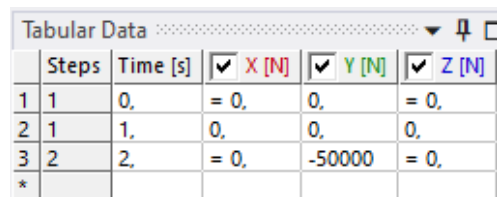


После этого слева в древовидном меню «*Outline*» в вкладке «*StaticStructural*» появляется параметр «*Force 2*».

При нажатии на него в нижнем меню «*Details of Force 2*» необходимо нажать на строчку «*Geometry*», после чего в основном меню с геометрией модели необходимо выбрать верхнюю плоскость грузовой пластины в пролете ригеля, далее в той же строчке «*Geometry*» в древовидном меню необходимо нажать на радио-кнопку «*Apply*», подтвердив свой выбор.

Далее в том же меню «*Details of Force 2*» напротив строки «*Magnitude*» (или напротив выбранного направления) необходимо ввести значение приложенного усилия (в данной задаче рекомендуется значение – 50 000 Н (50 кН)), которое вызывает изгиб ригеля.

Так как усилие прикладывается на втором шаге расчета, то необходимо вручную изменить условия нагружения конструкции по шагам в таблице справа «*Tabular Data*»:

A screenshot of the 'Tabular Data' window. It contains a table with columns for Steps, Time [s], X [N], Y [N], and Z [N]. The table has three rows of data and a final row with an asterisk.


	Steps	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> X [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Y [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Z [N]
1	1	0.	= 0.	0.	= 0.
2	1	1.	0.	0.	0.
3	2	2.	= 0.	-50000	= 0.
*					


(нагрузка в пролете ригеля приложена на втором шаге)

После задания численного значения силы в основном окне справа появляется стрелка с направлением приложения силы, а также выделяется цветом площадка приложения нагрузки.


При необходимости изменения направления нагрузки, необходимо изменить знак при указании значения силы на противоположный.


11. Задание настроек и создание сетки объемных конечных элементов

Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  Mesh .
При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Mesh*».
В данной вкладке нажимаем на значок «*Method*».

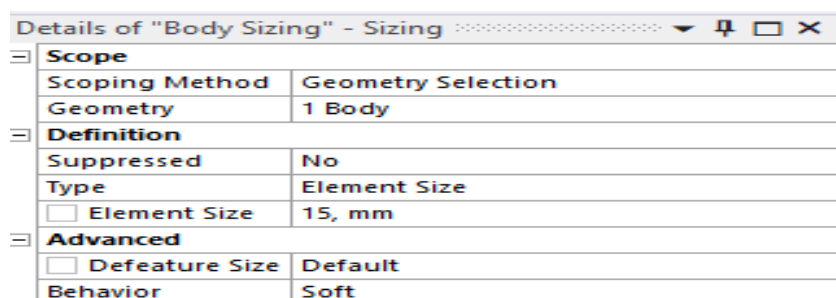
После этого слева в древовидном меню «*Outline*» в вкладке «*Mesh*» появляется параметр «*Automatic Method*». Нажимаем на него. В основном окне с геометрией модели выделяем все тела рамкой (при этом сверху должен быть выбран метод выделения - ). Слева в нижнем меню «*Details of Method*» подтверждаем выбор геометрии радио-кнопкой «*Apply*».

Далее в этом же меню во вкладке «*Definition*» в строчке «*Method*» меняем метод разбивки сетки КЭ на «*MultiZone*». В раскрывшихся настройках изменяем параметр «*Element Order*» на «*Quadratic*».

Слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  Mesh .
При нажатии данной кнопки сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Mesh*».
В данной вкладке нажимаем на значок «*Sizing*».
Данный параметр появляется во вкладке «*Mesh*» древовидного меню слева.


Нажав на параметр «*Body Sizing*» в нижнем меню «*Details of Body Sizing*» и далее на строку «*Geometry*» слева в основном окне выбираем тело ригеля, колонны, а также грузовые и опорные пластины, рамкой с включенной радиокнопкой , после чего подтверждаем выбор всех тел нажав на радио-кнопку «*Apply*».


В этом же меню во вкладке «*Definition*» задаем значение размера грани объемных конечных элементов в поле «*Element Size*» (в данной задаче наиболее оптимальное значение размера КЭ составляет 15 мм):



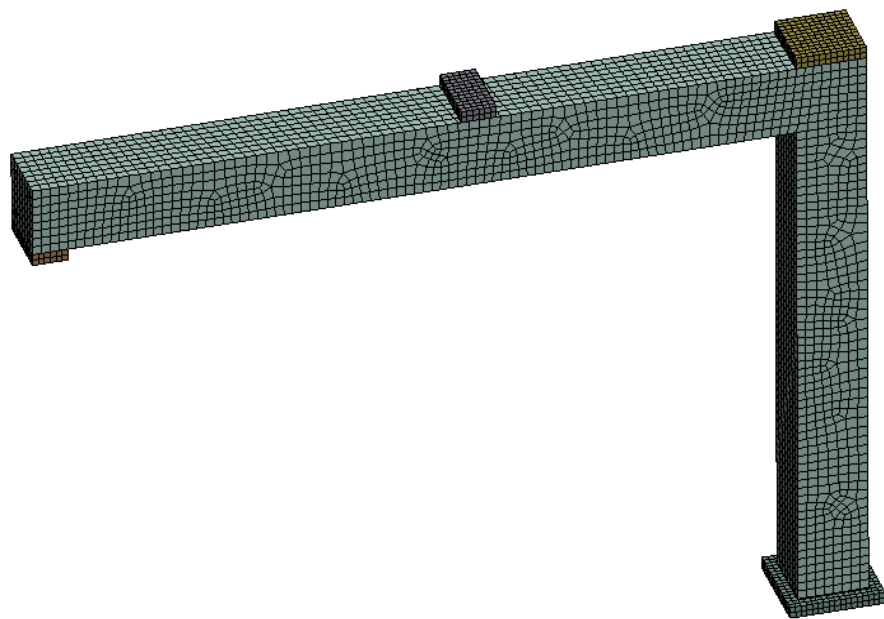
Примечание

Размер конечного элемента стоит задавать таким образом, чтобы по высоте сечения конструкция разбивалась не менее, чем на 8 конечных элементов (в нашем случае – 8 КЭ). При этом величину грани конечного элемента не стоит задавать меньше среднего размера заполнителя бетона.

Производим разбивку геометрии модели на конечные элементы, нажав правой кнопкой мыши на заголовок вкладки  Mesh и в контекстном меню выбрав действие - «Generate Mesh».

Общее число узлов и конечных элементов в задаче можно увидеть, нажав на заголовок вкладки  Mesh и в нижнем меню раскрыв самый нижний параметр «Statistics»:

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	51220
<input type="checkbox"/> Elements	10362



12. Задание настроек нелинейного решателя

Ниже приведен алгоритм основных настроек нелинейного решателя, однако, необходимо помнить, что данные настройки могут существенно изменяться в зависимости от типа рассматриваемой задачи.

Слева в древовидном меню «Outline» в вкладке «Static Structural» нажимаем на параметр, отвечающий за настройки решателя – «Analysis Settings».

В нижнем меню «Detailsof «AnalysisSettings» вкладке «StepControls» создаем два основных шага расчета («NumberofSteps» - 2), изменяем значение параметра «AutoTimeStepping» на «On» для каждого шага, далее заполняем раскрывшиеся настройки следующим образом:

Step Controls	
Number Of Steps	2,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	100,
Minimum Substeps	100,
Maximum Substeps	4000,

Step Controls	
Number Of Steps	2,
Current Step Number	2,
Step End Time	2, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Carry Over Time Step	Off
Initial Substeps	100,
Minimum Substeps	100,
Maximum Substeps	4000,

Переходим в следующую вкладку «SolverControls», где меняем параметр «SolverType» на «Direct» (прямой метод решения). Также включаем возможность расчета при больших деформациях, изменяя параметр «LargeDeflection» на «On».


Переходим в следующую вкладку «NonlinearControls», где изменяем тип нелинейного решателя на несимметричный решатель Ньютона-Рафсона (в первом параметре выставляем «Unsymmetric»).

Далее каждого шага расчета отключаем все возможные типы отслеживания (контроля) сходимости решателя (переводя их в режим «Remove» или «Off»), за исключением отслеживания сходимости по перемещениям (для этого напротив «DisplacementConvergence» выставляем «On»). Значение погрешности сходимости в 0,5% в данной задаче является достаточным (в некоторых расчетных случаях используется значение ниже, допустим – 0,1 %):

<input type="checkbox"/> Nonlinear Controls	
Newton-Raphson O...	Unsymmetric
Force Convergence	Remove
Moment Convergence	Remove
Displacement Conve...	On
--Value	Calculated by solver
--Tolerance	0,5%
--Minimum Reference	0, mm
Rotation Convergen...	Remove
Line Search	Off
Stabilization	Off

13. Создание шаблонов для вывода основных результатов расчета

Для получения результатов по внутренним параметрам НДС конструкции необходимо создать основные шаблоны результатов.

Для этого слева в древовидном меню «*Outline*» нажимаем на заголовок вкладки  **Solution (A6)**. При нажатии данной заголовка сверху в окне программы в ленточном меню открывается вкладка «*Solution*»:

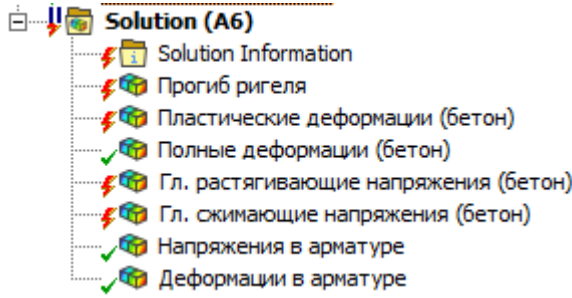

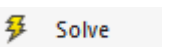
Раскрываем вкладку «*Deformation*» и выбираем «*Directional Deformation*». В нижнем меню «*Details of Directional Deformation*» во вкладке «*Definition*» в строке «*Orientation*» выбираем направление, соответствующее вертикальному прогибу ригеля (в данном случае глобальная ось Y).

Таким же образом выполняем следующие операции:

«*Solution*» > «*Strain*» > «*Equivalent Plastic Strain*»;
«*Solution*» > «*Strain*» > «*Equivalent Total Strain*»;
«*Solution*» > «*Stress*» > «*Maximum Principal Stress*»;
«*Solution*» > «*Stress*» > «*Minimum Principal Stress*»;
«*Solution*» > «*Stress*» > «*Equivalent (von-Mises) Stress*»;
«*Solution*» > «*Strain*» > «*Equivalent Total Strain*».

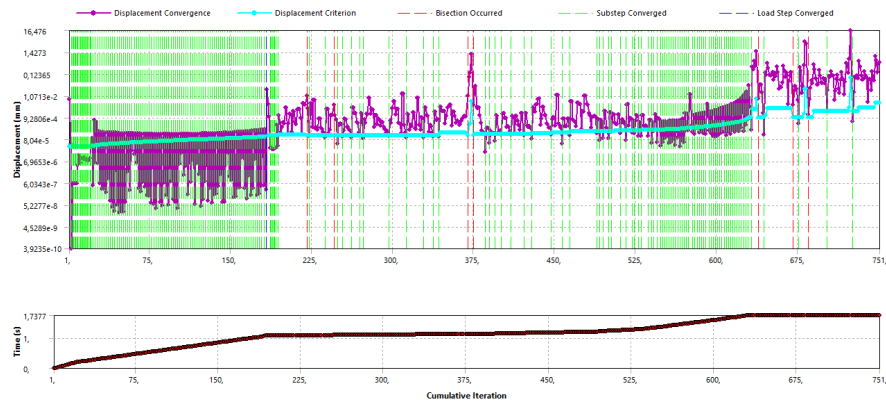
Для 1-4 шаблона результатов в нижнем меню во вкладке «*Scope*» в строке «*Scoping Method*» задаем параметр «*Named Selection*», а ниже в появившейся строке «*Named Selection*» выбираем ранее созданную именованную выборку – «*рама*».

Для 5-6 шаблона результатов в нижнем меню во вкладке «*Scope*» в строке «*Scoping Method*» задаем параметр «*Named Selection*», а ниже в появившейся строке «*Named Selection*» выбираем ранее созданную именованную выборку – «*арматура*».

	<p>Для удобства изменяем наименование шаблонов, используя правую кнопку мыши и в контекстном меню нажав на «<i>Rename</i>».</p> <p>После создания и переименования шаблонов результатов:</p> 
<p>14. Запуск задачи на расчет</p>	<p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» нажимаем правой кнопкой мыши на  Solution (A6).</p> <p>В открывшемся контекстном меню запускаем задачу на расчет, нажав на .</p>
<p>15. Отслеживание сходимости расчета в процессе решения задачи</p>	<p>Для отслеживания процесса сходимости нелинейного шагово-итерационного решателя во время выполнения расчета используется два основных инструмента:</p> <p>5. log-файл протокола расчета, обновляемый по ходу самого расчета:</p> <p>Слева в древовидном меню «<i>Outline</i>» во вкладке «<i>Solution</i>» необходимо нажать на «<i>SolutionInformation</i>» с параметром в строкенижном меню «<i>SolutionOutput</i>» - «<i>SolverOutput</i>» (сходимость на представленном, к примеру, подшаге («<i>Substep</i>») нагружения достигнута за битераций):</p> <pre> DISP CONVERGENCE VALUE = 0.3844E-02 CRITERION= 0.1003E-02 EQUIL ITER 1 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.3844E-02 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.1909E-01 CRITERION= 0.1003E-02 EQUIL ITER 2 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.1909E-01 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.3348E-01 CRITERION= 0.1003E-02 EQUIL ITER 3 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.3348E-01 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.2405E-01 CRITERION= 0.1003E-02 EQUIL ITER 4 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.2405E-01 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.6830E-02 CRITERION= 0.1003E-02 EQUIL ITER 5 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.6830E-02 DISP CONVERGENCE VALUE = 0.4841E-03 CRITERION= 0.1003E-02 <<< CONVERGED EQUIL ITER 6 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC = -0.4841E-03 >>> SOLUTION CONVERGED AFTER EQUILIBRIUM ITERATION 6 *** LOAD STEP 2 SUBSTEP 87 COMPLETED. CUM ITER = 676 *** TIME = 1.73296 TIME INC = 0.175000E-02 *** MAX PLASTIC STRAIN STEP = 0.1107E-02 CRITERION = 0.1500 *** AUTO STEP TIME: NEXT TIME INC = 0.17500E-02 UNCHANGED </pre>

6. Отслеживание сходимости итерационного решения в виде графика:

Слева в древовидном меню «*Outline*» во вкладке «*Solution*» необходимо нажать на «*Solution Information*» и изменить параметр в строке нижнего меню «*Solution Output*» на «*Displacement Convergence*» (отслеживание сходимости по перемещениям узлов):



Голубыми линиями и точками на графике показан критерий сходимости (0,5 %). Фиолетовыми точками, соединенных линиями, показана каждая итерация решения. Общее число итераций, выполненных в ходе расчета, показано на графике по оси снизу – в правом углу. Вертикальными зелеными пунктирными линиями отмечаются итерации, на которых достигнута сходимость решателя для каждого подшага нагружения. Вертикальными красными пунктирными линиями отмечаются подшаги, на которых не достигнута сходимость и для продолжения решения потребовалось дополнительно поделить приращение нагрузки на данном подшаге нагружения в 2 раза.

Ход решения в процентах от полной нагрузки также показывается в нижнем левом углу основного окна «*Mechanical*».

16. Анализ результатов расчета

После завершения процесса расчета (время выполнения расчета на компьютере с 6 физическими ядрами и 12 потоками составило 1 h52min) переходим в режим анализа результатов во вкладку «*Solution*» древовидного меню «*Outline*».

При нажатии на заголовок вкладки «*Solution*» в нижнем правом списке «*TabularData*» необходимо опуститься вниз для определения разрушающей нагрузки на образец, составляющую долю от заданной полной нагрузки:

	Time [s]	Step	Substep
185	1,7277	2,	85,
186	1,7312	2,	86,
187	1,733	2,	87,
188	1,7336	2,	88,
189	1,7338	2,	89,
190	2,	2,	1,e+006

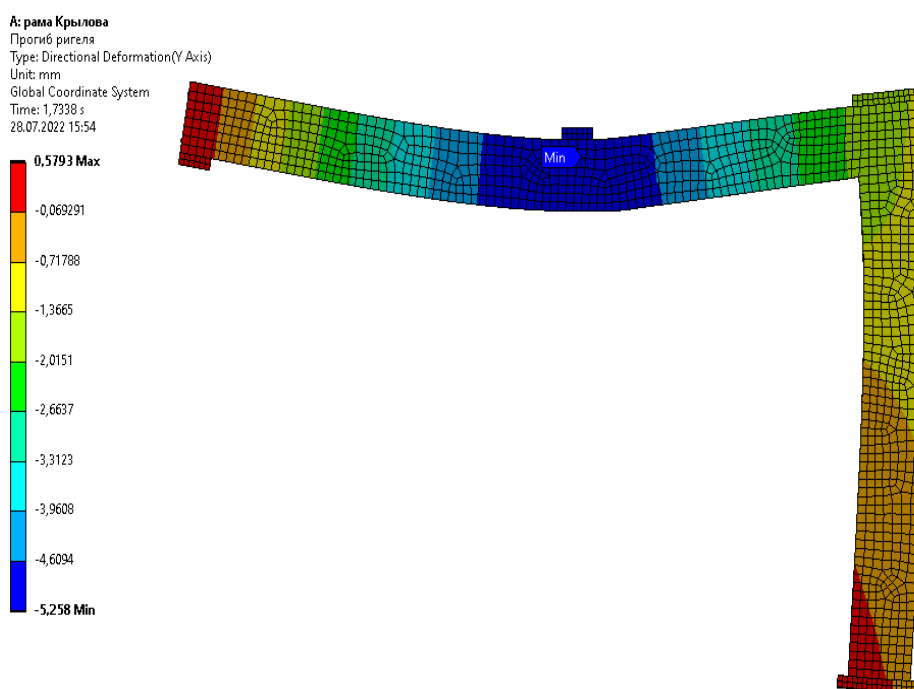
Как видно из таблицы, последним сошедшимся подшагом («*Substep*») нагружения, который соответствует разрушению конструкции, является подшаг № 189.

Так как нагружение образца задается по линейному закону, то предпоследнее значение в столбце «*Time (s)*» (за вычетом 1,0 – на первом шаге задается обжатие колонны) представляет собой несущую способность ригеля и рамы в целом в долях от полной (ранее заданной в п. 11) нагрузки на образец:

$$F_{ult} = 0,7338 \cdot P = 0,7338 \cdot 50 = 36,69 \text{ кН.}$$

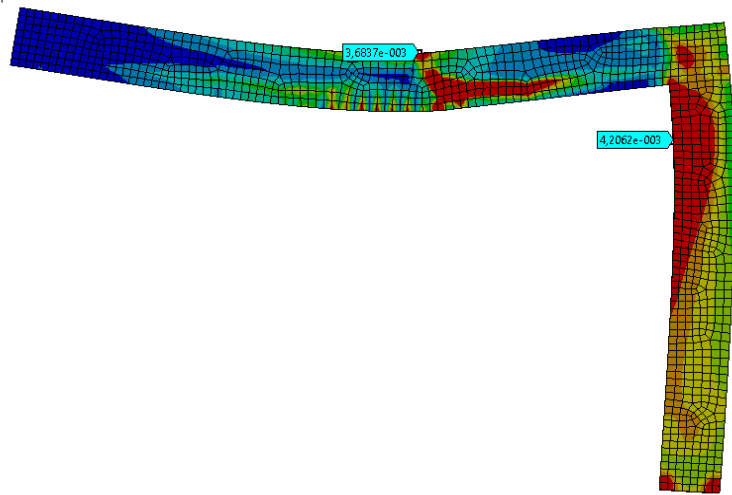
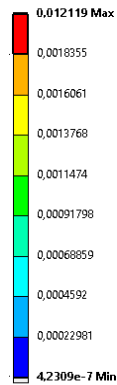
Ниже приведем остальные основные результаты расчета:

1. «*Solution*» > «*Прогиб ригеля*» (при F_{ult}):



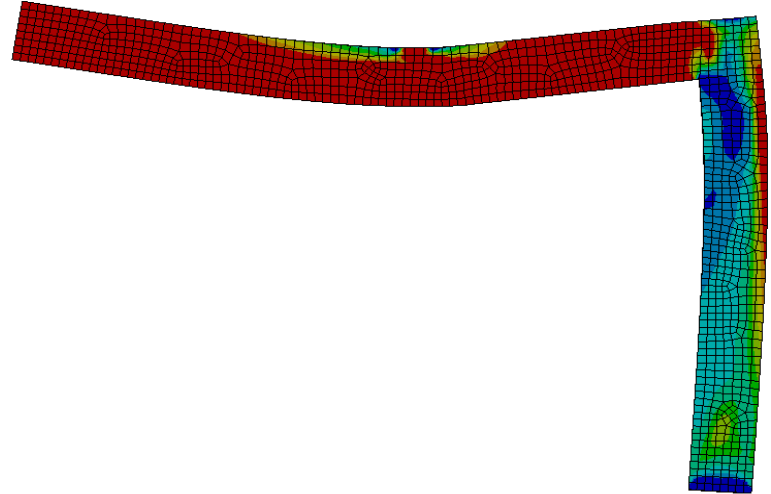
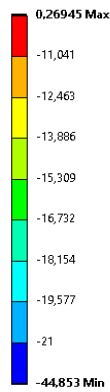
2. «Solution» > «Полные деформации (бетон рамы)» (при F_{ult}):

A: рама Крылова
 Полные деформации (бетон)
 Type: Equivalent Total Strain
 Unit: mm/mm
 Time: 1,7338 s
 28.07.2022 15:55



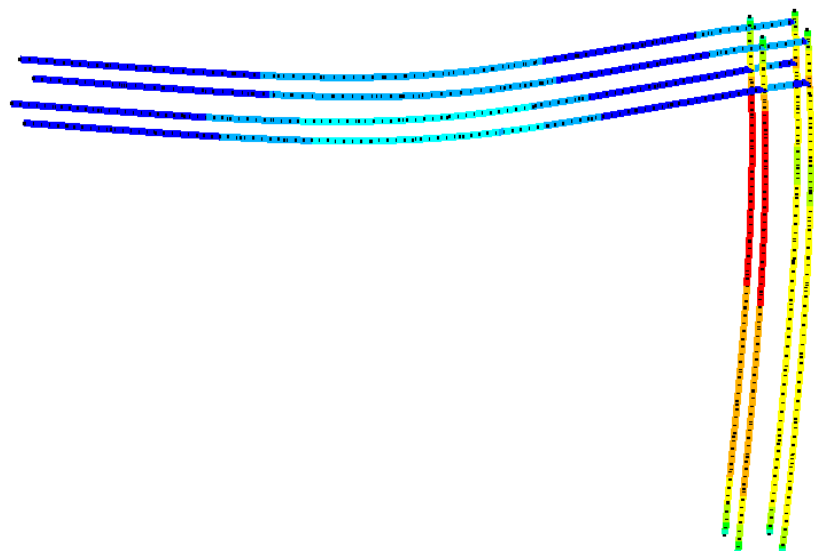
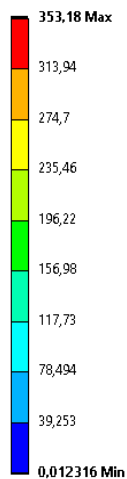
3. «Solution» > «Главные сжимающие напряжения (бетон рамы)» (при F_{ult}):

A: рама Крылова
 Гл. сжимающие напряжения (бетон)
 Type: Minimum Principal Stress
 Unit: MPa
 Time: 1,7338 s
 28.07.2022 15:56



4. «Solution» > «Напряжения в арматуре» (при F_{ult}):

A: рама Крылова
 Напряжения в арматуре
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1,4277 s
 28.07.2022 15:57



8.2. Сравнение результатов эксперимента и численного исследования

Согласно произведенному численному исследованию, предельная нагрузка, которая может быть воспринята ригелем монолитной Г-образной рамы в пролетной зоне, соответствует значению **36,69 кН**, что хорошо соответствует экспериментальному значению предельной несущей способности (см. табл. 7.2).

Погрешность в определении несущей способности Г-образной рамы, состоящей из ригеля и колонны, в сравнении с экспериментальными данными составляет:

$$\Delta = \frac{36,89 - 36,69}{36,89} \cdot 100\% = 0,54 \%$$

Разрушение рамы произошло от раздробления бетона в сжатой зоне ригеля под грузовой площадкой при значительном перераспределении усилий (изгибающих моментов) с опорной зоны Г-образной рамы в пролет ригеля. При этом особенностью данного примера является перераспределение усилий не за счет достижения надопорной арматуры ригеля предела текучести, а за счет значительного снижения жесткости сечения колонны в зоне под ригелем, а соответственно и снижения жесткости самого рамного узла.

Как отмечено в работе [15], замеренные в ходе эксперимента значения относительных деформаций на наиболее сжатой грани колонны под ригелем достигали значений $4 \cdot 10^{-3}$ мм/мм. В рамках численного исследования зафиксировано максимальное значение деформаций сжатия на наиболее сжатой грани колонны - $4,2 \cdot 10^{-3}$, что достаточно точно соответствует эксперименту.

В рамках численного исследования, как и авторами в рамках эксперимента, отмечена возможность значительного перераспределения усилий в раме за счет развития запредельных деформаций сжатого бетона в колонне под ригелем, причем развитие этих деформаций распространяется на достаточно большом участке по длине колонны.

Вывод: Несущая способность Г-образной рамы, определенная по результатам численного моделирования в ПК «ANSYSMechanical», достаточно точно соответствует несущей способности рамы, определенной в ходе экспериментального исследования (разница в определении несущей способности рамы составила менее 1%). Характер перераспределения усилий в Г-образной раме при численном расчете достаточно точно отражает характер работы опытного образца Г-образной рамы под нагрузкой с учетом дополнительного обжатия колонны.

Заключение

В данной работе были рассмотрены основные принципы и алгоритмы компьютерного моделирования наиболее используемых типов железобетонных конструкций в твердотельной объемной постановке задачи с учетом физической нелинейности и анизотропных свойств бетона. В качестве анализируемых конструкций выступили: изгибаемые балки (в том числе предварительно напряженные), колонны, рамы, стыки монолитных плит и колонн. В монографии не вошли численные исследования с применением программного комплекса «ANSYS» в среде «Workbench» сталежелезобетонных конструкций, а также исследования сцепления арматуры с бетоном. Эти результаты можно посмотреть в публикациях [35-37, 47, 72]

Также кратко рассмотрены основные теоретические основы и принципы современных теорий прочности и пластичности бетона и арматуры, которые используются при твердотельном численном моделировании железобетонных конструкций. Дополнительно даны рекомендации к верификации принятых моделей бетона при выполнении численных исследований.

Во всех рассмотренных примерах смоделированных, численно исследованных железобетонных конструкций (с применением программного комплекса «ANSYS» в среде «Workbench») выявлена достаточно точная сходимость получаемого решения в сравнении с результатами экспериментальных исследований.

Основная сложность при расчете твердотельных моделей железобетонных конструкций заключается в необходимости учета трещин в растянутой зоне, что значительно увеличивает временные затраты на калибровку нелинейного решателя, а также значительно повышает время выполнения расчетов, что в свою очередь требует увеличения вычислительных мощностей.

Дальнейшее развитие принципов и алгоритмов нелинейных расчетов твердотельных моделей железобетонных конструкций позволит уменьшить временные затраты на моделирование и расчет укрупненных несущих систем зданий и сооружений (объемных стыков, многопролетных рам, многопролетных плит перекрытий, целых каркасных систем), что в свою очередь позволит значительно повысить точность получаемых результатов в сравнении с результатами расчетов стержневых или плоских конечно-элементных моделей.

Литература

1. Антаков И.А. Прочность, трещиностойкость и деформативность по нормальному сечению бетонных изгибаемых элементов, армированных полимерной композитной арматурой. Дисс. ... канд.техн.н. Казань, 2022. -200с.
2. Берг О.Я. К вопросу о прочности и пластичности бетона // Доклады Академии наук СССР – 1950. - Т. 70 - № 4.
3. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона – М. Госстройиздат, 1962. – 96 с.
4. Бударин А.М. Деформационно-прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением / А.М. Бударин, Г.И. Ремпель, А.А. Камзолкин, В.Н. Алехин // Вестник МГСУ. – 2023. – Т.18 – № 4 – С. 517-532.
5. Галяутдинов З.Ш. Влияние конструктивных параметров узла сопряжения плиты и колонны на прочность железобетонных плит при продавливании. Дисс. ... канд.техн.н. Самара, 2022. – 210с
6. Гениев Г.А.Теория пластичности бетона и железобетона / Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. – М:Стройиздат, 1974. – 316 с.
7. Залесов, А.С. Расчет деформаций железобетонных конструкций по новым нормативным документам / А.С. Залесов, Т.А. Мухамедиев, Е.А.Чистяков // Бетон и железобетон. – 2002. – № 6. – С. 12-16.
8. Залесов А.С., Мирсяяпов И.Т./ Расчет изгибаемых элементов на выносливость с учетом аналитических диаграмм деформирования бетона и арматуры //Бетон и железобетон. 1993. № 4. С. 22-24.
9. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона - М:Стройиздат, 1996. – 416 с.
10. Карпенко Н.И., Т.А. Мухамедиев. Совершенствование методов расчёта статически неопределимых железобетонных конструкций: Сборник научных трудов / Госстрой СССР - М.: Ордена Трудового Красного знамени научно-исследовательский институт бетона и железобетона Госстроя СССР, 1987 - С. 4-24.

11. Кириллов А.П., Мирсяяпов И.Т./ Влияние виброползучести на выносливость железобетонных конструкций// Бетон и железобетон. 1986. №1. С.45-47.
12. Кириллов А.П. Выносливость наклонного сечения железобетонных изгибаемых элементов/ А.П. Кириллов, Ил.Т.Мирсяяпов// Бетон и железобетон. - М., 1988, № 7. – С. 36-38.
13. Клованич С. Ф., Безушко Д. И. Численный эксперимент по исследованию деформационных теорий пластичности бетона [Текст] // Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры. 2006. Вып. 22. с. 122–130.
14. Корсун В.И. Современные критерии прочности для бетонов при объемных напряженных состояниях / В.И. Корсун, С.Н. Карпенко, С.Ю. Макаренко, А.В. Недорезов // Строительство и реконструкция. 2021. - № 5 – С. 16-30.
15. Кузьмичев А.Е. Исследование влияния пластических деформаций сжатого бетона на перераспределение усилий в железобетонных рамах. Труды НИИЖБ, вып. 17. «Исследования по теории железобетона» - Госстройиздат, 1960.
16. Лазовский Д.Н. Расчетная модель напряженно-деформированного состояния статически неопределимых железобетонных конструкций / Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов, Е.Д. Лазовский, А.И. Гиль // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2022. – № 14. – С. 29–44.
17. Лейтес Е. С. К уточнению одного из условий прочности бетона [Текст] // 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. 37–40.
18. Методическое пособие «Бетонные и железобетонные конструкции. Нелинейные расчеты при проектировании», М.: Минстрой России – М.:ФАУ ФЦС, 2017
19. Мирсяяпов Ил-т.Т. Разработка научных основ теории выносливости железобетонных конструкций при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил. Дисс. ... д-р техн.н. Москва, 2017.

20. Мирсаяпов Ил.Т. Выявление зон концентрации напряжений в железобетонных конструкциях методом тепловизионного контроля /Ил.Т.Мирсаяпов//«Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». - М. 2007, №6. -С. 16-18.
21. Мирсаяпов Ил.Т. Способ выявления зон концентрации в строительных конструкциях/ Ил.Т.Мирсаяпов// Патент на изобретение № 2315271. -М. 2008. - 14с.
22. Мирсаяпов Ил.Т. Зоны концентрации напряжений в зоне действия поперечных сил железобетонных балок при циклическом нагружении / Ил.Т.Мирсаяпов// Известия КГАСУ. -Казань. 2008, № 1. - С. 83-88.
23. Мирсаяпов Ил.Т. Физические модели усталостного сопротивления железобетонных изгибаемых элементов действию поперечных сил/ Ил.Т.Мирсаяпов// Известия ВУЗов: «Строительство». – Новосибирск. 2006, №8. - С. 4-13.
24. Мирсаяпов Ил.Т. Физические модели усталостного сопротивления железобетонных изгибаемых элементов действию поперечных сил/ Ил.Т.Мирсаяпов// Известия Известия КГАСУ. 2006. №1(5) С. 82-86.
25. Мирсаяпов Ил.Т. Обеспечение безопасности железобетонных балок по наклонному сечению при многократно повторяющихся нагрузках/ Ил.Т.Мирсаяпов// Жилищное строительство. – Москва. 2016, №1. – С. 23-27.
26. МирсаяповИл.Т. Предел выносливости анкеровки арматуры/ Ил.Т.Мирсаяпов// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – Москва. 2016, №1. – С. 37-42.
27. МирсаяповИл.Т. Напряженно-деформированное состояние в заделке арматуры при многократно повторяющихся нагрузках/ Ил.Т.Мирсаяпов// Вестник МГСУ. – Москва. 2016, №5. – С. 28-36.
28. МирсаяповИл.Т. К расчету железобетонных конструкций на выносливость/ Ил.Т.Мирсаяпов, А.Г.Тамразян // Промышленное и гражданское строительство– Москва. 2016, №11. – С. 70-74.

29. Мирсаяпов Ил.Т. Основы повышения эффективности применения высокопрочных бетонов в конструкциях промышленных зданий при действии поперечных сил/ Ил.Т.Мирсаяпов, А.Г.Тамразян//Бюллетень строительной техники– Москва. 2017, №1. – С. 52-57.
30. Мирсаяпов Ил.Т. К разработке научных основ теории выносливости железобетонных конструкций / Ил.Т.Мирсаяпов, А.Г.Тамразян // Промышленное и гражданское строительство– Москва. 2017, №1. – С. 50-56.
31. Мирсаяпов Илшат Т., Ахметзянов Д.Р. Применение шага колонн 18 м в железобетонных каркасах и оценка эффективности применения высокопрочного бетона в каркасах одноэтажных промышленных зданий с различной сеткой колонн // Известия КГАСУ. 2019. №3(49) С.112-120.
32. Мирсаяпов Ил.Т., Ахметзянов Д.Р. Оценка эффективности применения высокопрочного бетона в стропильных конструкциях одноэтажных промышленных зданий // Известия КГАСУ. 2019. №2(48) С.150-158.
33. Мирсаяпов Илшат Т., Никитин Г.П., Симаков В.Д. Применение высокопрочного бетона класса В80 для несущей системы 18-ти этажного жилого дома в комплексе «Салават Купере» // Известия КГАСУ. 2018. №3(45) С.191-199.
34. Мирсаяпов Ил.Т. Техничко-экономическая оценка влияния повышения прочности и выносливости бетона за счет применения высокопрочного бетона на расход материалов в железобетонных каркасах по серии 1.020-1/83/ Ил.Т.Мирсаяпов, А.И.Фаттахова // Известия КГАСУ. Казань.2017, №4.
35. Илшат Т. Мирсаяпов, И.М.Гиматдинов Исследование напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне // Известия КГАСУ 2022 №3(61) с.56-66, DOI:10.52409/20731523_2022_3_56, EDN: FDMELF.
36. Мирсаяпов Илшат Т., Валиев А.Т. Исследование напряженнодеформированного состояния сталежелезобетонных балок нового типа железнодорожных мостов// Известия КГАСУ. 2023. № 1 (63), с. 31-42, DOI: 10.52409/20731523_2023_1_31, EDN: ECDUWC
37. Мирсаяпов Илшат Т., Гиматдинов И.М. Исследование сталежелезобетонной балки с частичной заделкой двутаврового сечения в бетоне на основе

диаграммного метода расчета // Известия КГАСУ 2023 №2(64) с.6-16, DOI: 10.52409/20731523_2023_2_6, EDN: ZVRIMO.

38. Мирсаяпов Ил.Т. Классификация железобетонных изгибаемых элементов, воспринимающих поперечные силы при многократно повторяющихся нагрузках / Ил.Т.Мирсаяпов// Известия КГАСУ. -Казань. 2006, № 2. - С. 59-62.

39. Мирсаяпов Ил.Т. Усталостное разрушение железобетонных изгибаемых элементов в зоне действия поперечных сил при больших пролетах среза и рекомендации по оценке их выносливости/ Ил.Т.Мирсаяпов// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». - М. 2005, №2. С. 46-49.

40. Мирсаяпов Ил.Т. Расчет выносливости наклонных сечений железобетонных балок при больших пролетах среза на основе модели усталостного разрушения/ Ил.Т.Мирсаяпов// Известия ВУЗов: «Строительство». – Новосибирск. 2005, №7. - С. 10-16.

41. Мирсаяпов Ил.Т. Модели усталостного разрушения железобетонных изгибаемых элементов в зоне действия поперечных сил /Ил.Т.Мирсаяпов//Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - М. 2006, №1. - С. 20-27.

42. Мирсаяпов Ил.Т. Модель усталостного разрушения железобетонных изгибаемых элементов с большим пролетом среза в зоне совместного действия изгибаемых моментов и поперечных сил/ Ил.Т.Мирсаяпов// Бетон и железобетон. – М. -2006, № 2.- С. 28-30.

43. Мирсаяпов Ил.Т. Усталостное сопротивление изгибаемых элементов действию поперечных сил при средних пролетах среза/ Ил.Т.Мирсаяпов// Бетон и железобетон. – М., 2006, № 3- С. 23-25.

44. Мирсаяпов Ил.Т. Усталостное сопротивление изгибаемых элементов действию поперечных сил при малых пролетах среза/ Ил.Т.Мирсаяпов// Бетон и железобетон. – М., 2008, № 1- С. 27-30.

45. Ил.Т. Мирсаяпов, И.А. Антаков, А.Б. Антаков К расчету прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой// Вестник МГСУ Том 16. Выпуск 4. 2021, С.413.

46. И.Т. Мирсаяпов, И.А. Антаков, А.Б. Антаков. К расчету ширины раскрытия трещин изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой// Вестник МГСУ Том 15. Выпуск 12, 2020, С.1663.
47. Мирсаяпов Илшат Т., Минзянов Р.И. Перемещение арматуры периодического профиля в заделке при статическом нагружении // Известия КГАСУ. 2022. № 4 (62), с.18-29 DOI: 10.52409/20731523_2022_4_18, EDN: TOADUE
48. Мирсаяпов Илшат Т., Никитин Г.П., Ханбеков М.Ф. Усиление зон продавливания плиты перекрытия при несоосности вертикальных несущих элементов по высоте здания // Известия КГАСУ. 2022. № 4(62), с.30-39
49. Ил.Т. Мирсаяпов, В.Д. Симаков, Г.П. Никитин/ Расчет и конструирование усиления железобетонных конструкций, ослабленных огневым воздействием// Учебное пособие. Казань, 2022, 81 с.
50. Семенов А.С. Вычислительные методы в теории пластичности - СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2008. – 210 с.
51. Силантьев А.С. Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям с учетом влияния продольного армирования. Дисс. ... канд.техн.н. Москва, 2012.
52. Симаков В.Д. Трещиностойкость оголовков железобетонных колонн при вертикальном нагружении. Дисс. ... канд.техн.н. Казань, 2017
53. СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», М.: Госстрой России – М.: ГУП НИИЖБ, 2004.
54. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», М.: Минстрой России – М.: АО НИЦ «Строительство» - НИИЖБ им. А.А.Гвоздева, 2019.
55. Трёкин Д.Н. Расчет нелинейного деформирования и трещиностойкости железобетонных изгибаемых элементов. Дисс. ... канд.техн.н. Москва, 2020.
56. Фиалко С.Ю. Применение метода конечных элементов к анализу прочности и несущей способности тонкостенных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности. – М.:Издательство СКАД СОФТ, Издательский дом АСВ, 2018 – 192 с.

57. Филоненко-Бородич М.М. Об условиях прочности материалов, обладающих различным сопротивлением растяжению и сжатию // Инж. сборник. - 1954 - № 19 – С. 36-48.
58. Шевченко А.В. Метод итераций для расчета железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели / А.В. Шевченко, А. А. Давидюк, Н.Н. Баглаев // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. - № 3 – С. 13-18.
59. Яшин А. В. Критерии прочности и деформирования бетона при простом нагружении для различных видов напряженного состояния [Текст] // Расчет и конструирование железобетонных конструкций: сборник научных трудов / Под ред. А. А. Гвоздева. М.: НИИЖБ, 1977. - С. 48–57.
60. Al-Noury S.I., Chen W.F. Behavior and Design of Reinforced and Composite Concrete Sections // Journal of the Structural Division, 1982. Vol. 108. Issue 6. pp. 1266-1284.
61. Bažant Z.P., Oh B.H. Crack band theory for fracture of concrete // Materials and Structures (RILEM), 16, 1983, pp. 155-177.
62. Bažant Z.P. Microplane Model M 4 for Concrete. I: Formulation with Work-Conjugate Deviatoric Stress // Journal of Engineering Mechanics, 126 (9), 2000, p. 944.
63. Bentz E.C. Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, ON, Canada, 2000.
64. Červenka J., Papanikolaou V.K. Three dimensional combined fracture-plastic material model for concrete // International Journal of Plasticity. 2008. Vol.24. Issue 12. pp. 2192-2220.
65. Chen W.F., Saleeb A.F. Constitutive equations for engineering materials // Volume 2: Plasticity and Modeling. Amsterdam: Elsevier, 1994, p. 1129.
66. Drucker D.C, Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Q Appl Math 10, 1952, pp. 157–165.
67. Etse G., William K. Fracture energy formulation for inelastic behavior of plain concrete // Journal of Engineering Mechanics. 1994. Vol. 120. Issue 9. pp. 1983–2011.

68. Fossum A.F., Fredrich J.T. Cap plasticity models and compactive and dilatant pre-failure deformation // 4th North American Rock Mechanics Symposium (July 31 – August 3, 2000) Seattle, Washington. pp. 1169–1176.
69. Grassl P., Jirásek M. Damage-plastic model for concrete failure // International Journal of Solids and Structures. 2006. Vol. 43. Pp. 7166–7196.
70. Jang B.L., Dafalias J.F., Herrmann I.R. A bounding surface plasticity model for concrete // Journal of Engineering Mechanics. 1985. Vol. 111. Issue 3. pp. 359–380.
71. IlshatMirsayapov and George Apkhadze /Modified trilinear stress-strain diagram of concrete designed for calculation of beams with fiberglass rebar// STCCE-2020 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020, 517, Vol. 890, 012079.
72. IlshatMirsayapov and Rustam Minzianov/ Rebar movement in seals under static loading//STCCE-2020 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020, 517, Vol. 890, 012073.
73. IlshatMirsayapov, Igor Antakov and Aleksey Antakov / Improving methods of strength design of normal sections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars// STCCE-2020 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020, 517, Vol. 890, 012057.
74. IlshatMirsayapov, Samat Yakupov and Majd Hassoun/ About concrete and reinforced concrete corrosion //STCCE-2020 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020, 517, Vol. 890, 012061.
75. Lubliner J., J. Oliver, S. Oller, and E. Oñate. A Plastic-Damage Model for Concrete // International Journal of Solids and Structures, vol. 25, 1989, pp. 299–329.
76. Menetrey P.H., Willam K.J. Triaxial failure criterion for concrete and its generalization. ACI Structural Journal. 1995. 92. pp. 311–318.
77. Menetrey P., Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures, Ph.D. Thesis, EPFL Lausanne, 1994.
78. Mirsayapov Il.T. Detection of Stress Concentration Regions in Cyclic Loading by the Heat Monitoring Method/ Il.T. Mirsayapov//ISSN 0025-6544, Mechanics of Solids. C Allerton Press, Inc., 2010 – New York: Springer Link, 2010, Vol 45, №1. – pp. 133-139.

79. Mirsayapov Il.T. A study of stress concentration zones under cyclic loading by thermal imaging method/ Il.T. Mirsayapov//Strength of Materials. – New York: Springer New York, 2009, Vol 41, Number 3. – pp. 339-344.
80. Mirsayapov I., Khorkov E., Minzianov R. /Research of the stress-strain state of a reinforced concrete beamless floor // 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE – 2021). France, 2021, Vol. 3031.
81. MirsayapovIlshat. Endurance of reinforced concrete beams with small shear spans// © Springer Nature Switzerland AG 2020 B. Anatolijs et al. (eds.), Proceedings of EECE 2019, Lecture Notes in Civil Engineering – pp. 763-775.
82. Mirsayapov, I., Antakov, I., Antakov, A. /Experimental and Theoretical Analysis of Crack Resistance and Deformability of Concrete Beams Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars// Lecture Notes in Civil Engineering, 2023, 291, pp. 381–404.
83. MirsayapovIlshat and Nikitin Georgy and KhanbekovMidkhat/ Strength of reinforced concrete flat slabs for punching// STCCE-2020 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020, 517, Vol. 890, 012076.
84. Rots J.G., Blaauwendraad J. Crack models for concrete: discrete or smeared? Fixed, multidirectional or rotating? // Heron. 1989. 34(1). Pp. 1-59.
85. Willam K.J. and Warnke E. P. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete // Proceedings of IABSE, Structural Engineering Report 19. Section III, 1975, pp. 1-30.

Мирсаяпов Илшат Талгатович
Апхалзе Георгий Теазотович
Симаков Василий Дмитриевич

**Нелинейные расчеты твердотельных моделей железобетонных
конструкций в ПК «ANSYS»**
МОНОГРАФИЯ

Научный редактор Ил.Т.Мирсаяпов
редактор Л.З.Ханафиева

Издательство
Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Подп. в печать 09.11.2023
Заказ № 150
Тираж 500 экз.

Печать ризографическая
Бумага офсетная №1

Формат 60×84/16
Усл. печ. л. 13
Уч.-изд. л. 13

Отпечатано в полиграфическом секторе
Издательства КГАСУ
420043, Казань, Зелёная,1