

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ С ГИБРИДНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Шалобыта Н.Н., Полонский М.Ч.

Введение. В последние годы развитие строительной науки и практики направленно на расширение круга применения композитной арматуры в строительных изделиях и конструкциях, что влечет за собой необходимость изучения НДС элементов с неметаллической арматурой и разработку новых методик их расчёта.

В силу ряда особенностей арматуры из полимерных композитов (в частности, низкие значения модуля упругости, сопоставимые с модулем упругости бетона; различия в значениях коэффициента температурного линейного расширения и коэффициента поперечных деформаций в продольном и поперечном направлениях; длительные деформации и т.д.) ее применение в изгибаемых элементах с полной заменой стальной арматуры ограничено. Однако, использование армирования из полимерных композитов совместно со стальной арматурой в бетонных конструкциях, способствует появлению возможности варьировать различные факторы, влияющих на нелинейную работу конструкции, в том числе с учетом перераспределение усилий, и на стадии проектирования создавать такие условия, учитывающие пластические свойства материала, при которых перераспределение усилий будет происходить в заданном направлении. Частичная замена стальной арматуры стеклопластиковыми стержнями является обоснованной не только техническими, но и экономическими соображениями, и если на стадии проектирования создать такие условия, чтобы перераспределение усилий происходило в заданном и необходимом нам направлении, то это позволит получить существенный технико-экономический эффект.

Сегодня, как известно, в связи с ощутимой стоимостью натурального эксперимента, существенно возрос спрос на применение различных программных комплексов перед постановкой научного эксперимента. На рынке САПР, существует определенный перечень программных комплексов, позволяющих производить научный анализ напряженно-деформированного состояния конструкции: MSC.Nastran, ANSYS, ABAQUS, Comsol, LS-DYNA, midasFEA, и др.

Аналитическая модель экспериментальной неразрезной балки

В настоящей статье предложены результаты численного исследования экспериментального образца железобетонной двухпролетной балки с комбинированным армированием. Целью моделирования является определение НДС неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием, у которых нижняя пролетная арматура выполнена из обычных стальных стержней, верхнее надпорное армирование – комбинированное из стальной и композитной арматуры.

Приведена расчетная модель базового образца двухпролетной неразрезной железобетонной балки общей длиной 5м, загруженной сосредоточенной силой в середине каждого пролета. Класс бетона балок С25/30, продольное армирование –

комбинация стальной и стеклопластиковой арматуры (таблица 1), поперечное армирование представлено в виде хомутов из арматурной стали класса S240 Ø8мм. Процесс набора прочности бетоном – естественный, без применения дополнительных мероприятий. Схема армирования и расчетная схема экспериментального образца приведены на рисунках 1 и 2, соответственно.

Таблица 1 - Характеристика опытного образца

Опытный образец	Продольное армирование		Размеры сечения b×h (мм)	Процент армирования $\rho_1 = A_s / b \cdot d, \%$	
	над опорой (верхнее)	в пролетах (нижнее)		Опора	Пролет
V1F14	1 Ø14 GFRP+ 2 Ø12 S500	2 Ø14 S500+ 1 Ø12 S500	160 x 300	0,792	0,877

Моделирование НДС балки выполнено с учетом объемного (трехосного) напряженного состояния. Железобетон, с точки зрения конечно-элементного моделирования, представляет собой сложный композитный материал. Правильно заданная его КЭ-модель, главным образом должна быть способна представлять, как упругие, так и пластические свойства бетона в железобетоне при сжатии и растяжении. При моделировании работы бетона на сжатие при попеременном нагружении и разгрузении образца необходимо учитывать наличие остаточных относительных деформаций, которые увеличиваются с ростом количества циклов нагружения. Моделирование правильного поведения бетона при растяжении, должно включать снижение напряжений (ниспадающую ветвь на диаграмме деформирования), модуль упругости, а также локальные эффекты сцепления. Также, при создании численной модели, необходимо учитывать существование различных методик моделирования арматуры в бетоне; влияние размера конечных элементов и определения жесткости бетона между трещинами на результаты расчета. Для учета вышеназванных особенностей железобетона в реальных конструкциях необходимо применение различных теорий деформирования и прочности бетона, а также калибровка моделей, основанных на данных теориях, при конечно-элементном расчете конструкций [1].

В качестве базового комплекса для численного анализа железобетонного элемента, армированного стальной и стеклопластиковой арматурой, был выбран пакет КЭ – анализа ABAQUS. Для решения поставленной задачи использовался явный решатель (Explicit solver: ABAQUS/ Explicit), позволяющий значительно увеличить скорость расчета при решении квазистатических задач методом прямого интегрирования. Основными преимуществами данного решателя и методики являются: эффективный метод анализа больших и сверхбольших задач (от 100 тыс. КЭ до десятков миллионов) с довольно малыми периодами собственных колебаний, а также с трудностями со сходимостью, в частности со сложными моделями пластичности, где нахождение точек сходимости при неявном интегрировании представляется довольно трудной задачей; используется теория больших деформаций (геометрическая нелинейность). Процедура решения задачи представляет собой итерационный процесс, использующий весьма малые приращения нагрузки (для рассматриваемых квазистатических задач) при безусловной сходимости каждой итерации [2].

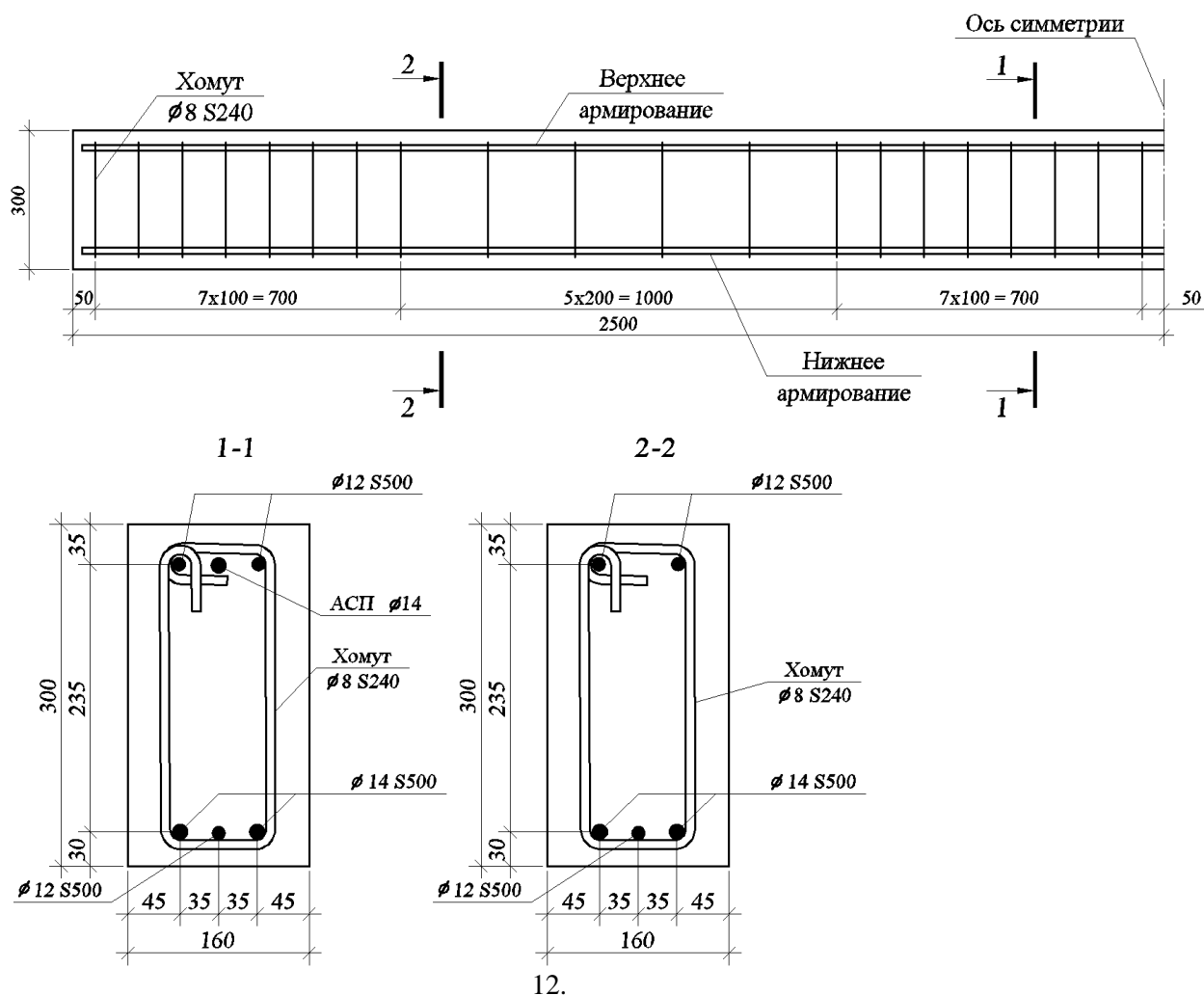


Рисунок 1– Схема армирования образца V1F14

Программное обеспечение ABAQUS (SIMULIA, 2008) позволяет моделировать повреждения в бетоне, используя следующие три модели развития трещин в железобетонных элементах: (1) модель размазанной трещины, (2) модель хрупкого трещинообразования, и (3) модель с разрушением (наиболее полная модель прочности).

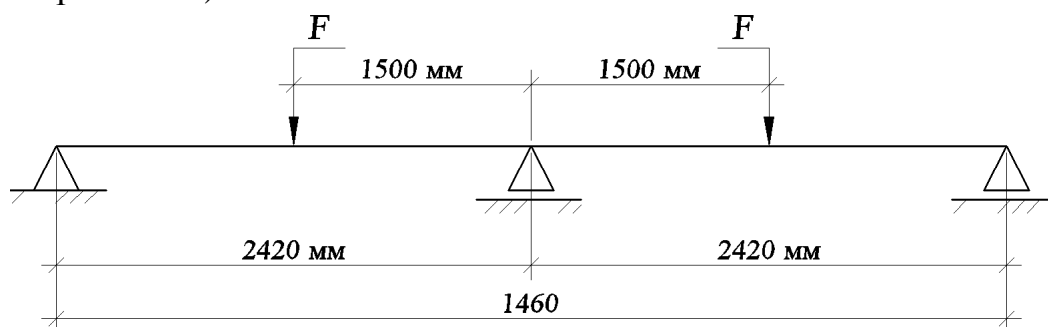


Рисунок 2– Расчетная схема опытного образца

В данной работе для моделирования работы бетона была использована модель с разрушением (concrete damage plasticity model - [3, 4, 5]). Данная модель пластичности учитывает образование и развитие трещин при растяжении, сжатии и срезе, а также теорию прочности бетона (теории прочности Гениева). Модель является континуальной, основанной на пластическом поведении и

учитывающей образование и накопление повреждений. Рассматривается два основных механизма разрушения - образование трещин в растянутом бетоне и раздавливание сжатого бетона. Подразумевается, что бетон работает в трех различных стадиях - стадии абсолютно упругой изотропной работы, стадии пластической работы и стадии постразрушения [2].

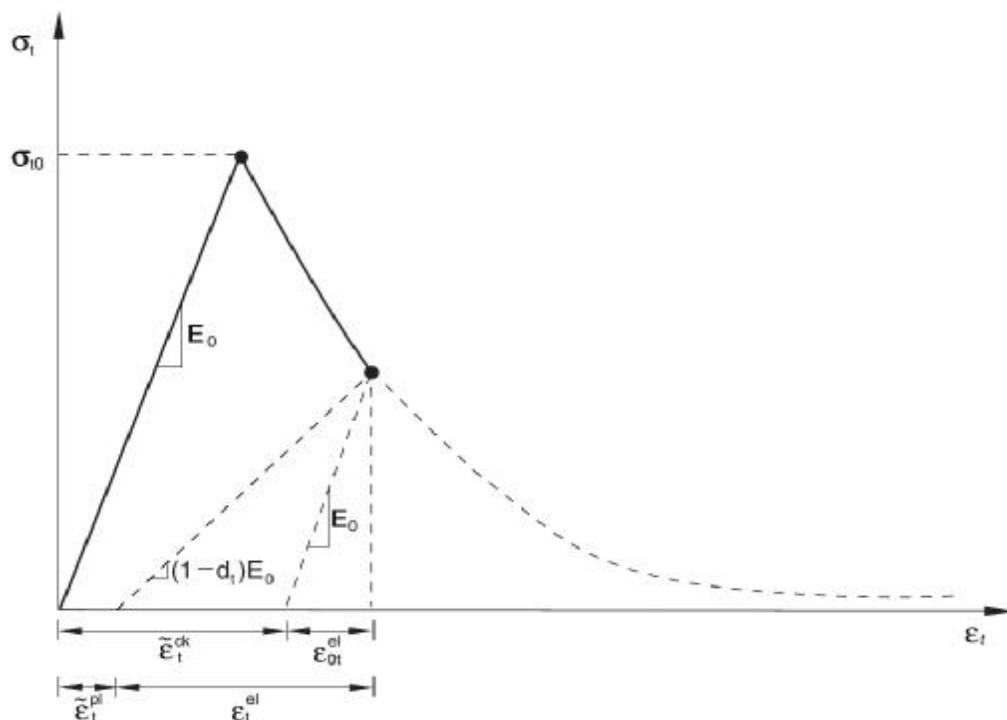


Рисунок 3– Указания для построения диаграммы деформирования при растяжении

Моделирование полной диаграммы деформирования бетона на растяжение, осуществлялось согласно инструкции [3] и диаграмме приведенной на рисунке 3. Для использования данной модели, необходимо ввести величину начального модуля упругости (E_0), напряжения растяжения (σ_t), значение деформаций соответствующих образованию трещин ($\tilde{\epsilon}_t^{ck}$) и величину параметра повреждения (d_t) для динамического изменения модуля упругости при разгрузке в зоне образования трещины.

Деформации трещинообразования ($\tilde{\epsilon}_t^{ck}$) вычислялись из общей деформации используя формулу (1):

$$\tilde{\epsilon}_t^{ck} = \epsilon_t - \epsilon_{ot}^{el} \quad (1)$$

где $\epsilon_{ot}^{el} = \sigma_t / E_0$, упругие деформации соответствующие материалу без повреждения, ϵ_t – полные деформации растяжения.

ABAQUS (SIMULIA, 2008) проверяет точность кривой повреждения, используя значения пластических деформаций $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ рассчитанных по формуле (2):

$$\tilde{\epsilon}_t^{pl} = \tilde{\epsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{1 - d_t} \cdot \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (2)$$

Отрицательные и/или уменьшающиеся значения пластических деформаций свидетельствуют о неверно заданной кривой повреждения, которая может привести к появлению сообщения об ошибке до начала выполнения анализа [6].

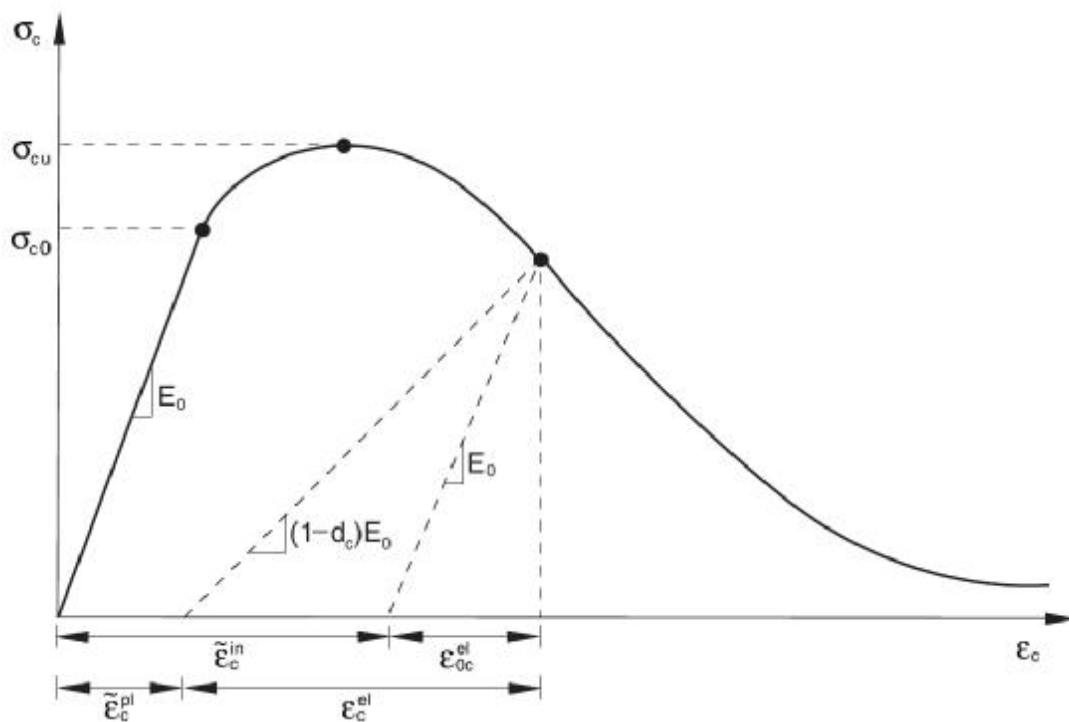


Рисунок 4 – Указания для построения диаграммы деформирования при сжатии

Для задания диаграммы деформирования бетона при сжатии, вводились напряжения сжатия (σ_c), значение неупругих деформаций соответствующих напряжениям ($\tilde{\varepsilon}_c^{in}$) и величину параметра повреждения (d_c) с неупругими деформациями в табличном виде. Таким образом, значения общих деформаций должны быть переведены в неупругие по формуле (3):

$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{oc}^{el} \quad (3)$$

где $\varepsilon_{oc}^{el} = \sigma_c / E_0$ – упругие деформации соответствующие материалу без повреждения, ε_c – полные деформации сжатия. Кроме того, пластические деформации должны быть рассчитаны по формуле (4):

$$\varepsilon_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{1-d_c} \cdot \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (4)$$

Предлагаемая [3], диаграмма деформирования бетона при сжатии с применением параметра повреждения d_c представлена на рисунке 4.

Наличие экспериментальных данных для конкретных классов бетона, позволяет верифицировать параметры моделей деформирования и прочности железобетона. С помощью данных моделей возможно с высокой степенью точности рассчитывать ж/б конструкции на широкий спектр статических и динамических нагрузок.

Для моделирования стальной арматуры была использована модель пластичности с двумя линейными участками - зоной упругой работы и площадкой текучести, принятой с незначительным упрочнением для обеспечения сходимости (стандартная идеализированная модель Прандтля) рисунок 5. Для стеклопластиковой арматуры – предполагается упругая работа материалов до предела прочности. Идеализированные диаграммы получены экспериментальным путем.

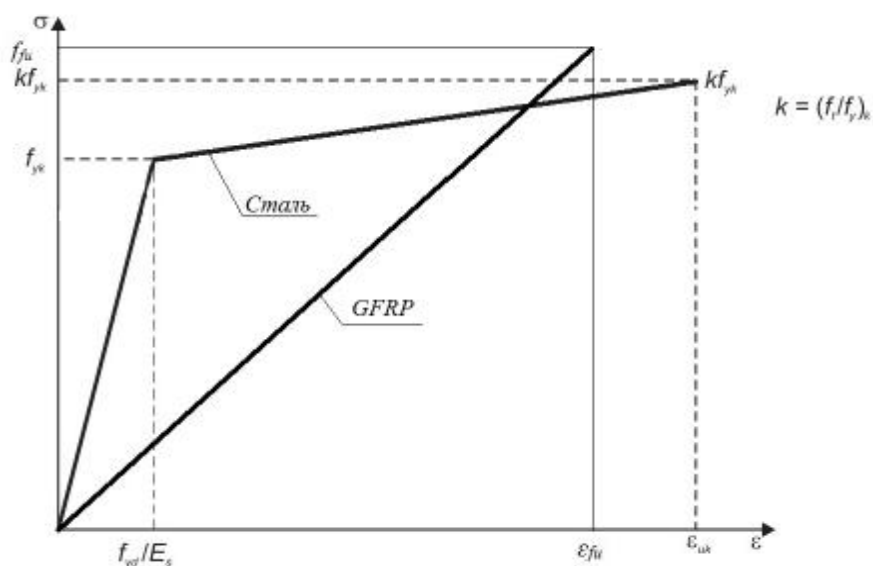


Рисунок 5 – Идеализированные диаграммы «напряжение — относительная деформация» для арматуры

При создании численной модели, в силу симметрии системы, моделировалась только половина балки. Моделирование бетона осуществлялось с помощью КЭС3D8(R) (brickmesh). Армирование, продольное и поперечное, было задано стержневыми КЭ типа В31. Арматура моделировалась с применением логики «встроенных элементов» (стержней), перемещения узлов которых с помощью уравнений связи автоматически определяются по перемещениям соответствующих узлов оболочечных элементов, представляющих собой бетон.

Моделирование опор осуществлялось упрощенным методом - запрет перемещений по линии условного контакта опорного катка, на одной из опор (крайней) - полный запрет перемещений, на другой – запрет вертикального смещения и перемещений из плоскости балки. Нагрузка прикладывалась эквивалентным давлением на площади грузораспределительной пластины с размерами 16x16 (см), моделирующей зону контакта силового домкрата с поверхностью балки. На рисунке 6 приведена численная модель экспериментального образца.

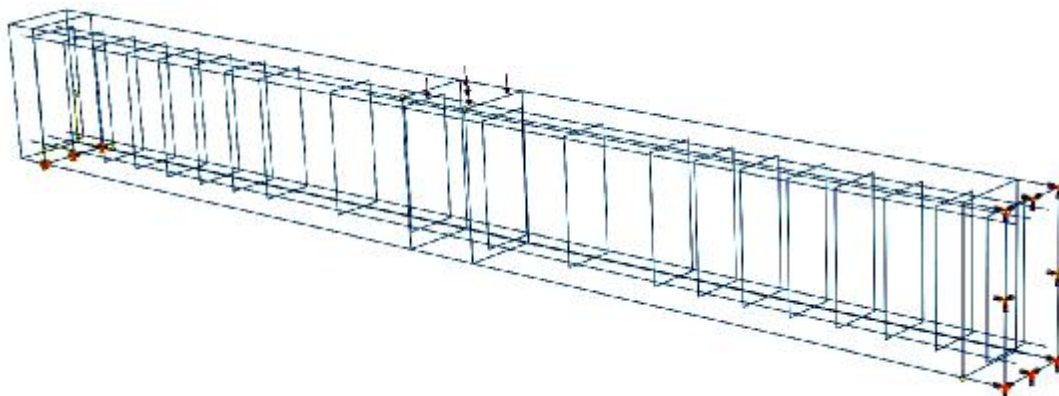


Рисунок 6 – Численная модель экспериментального образца

По результатам численного моделирования получены деформированные схемы балки и схемы расположения трещин при различных стадиях нагружения. Получены графики зависимости прогиба балок от нагрузки, напряжения в арматурных стержнях и график распределения напряжений по высоте сечения

балок. На рисунках 7 - 10 приведены графики зависимости прогиба балок от приложенных сосредоточенных сил, изополя нормальных напряжений и главных растягивающих деформаций, а так же картина трещинообразования перед разрушением. Следует отметить, что за прогиб балки принимается перемещение узла, расположенного в точке приложения сосредоточенных сил.

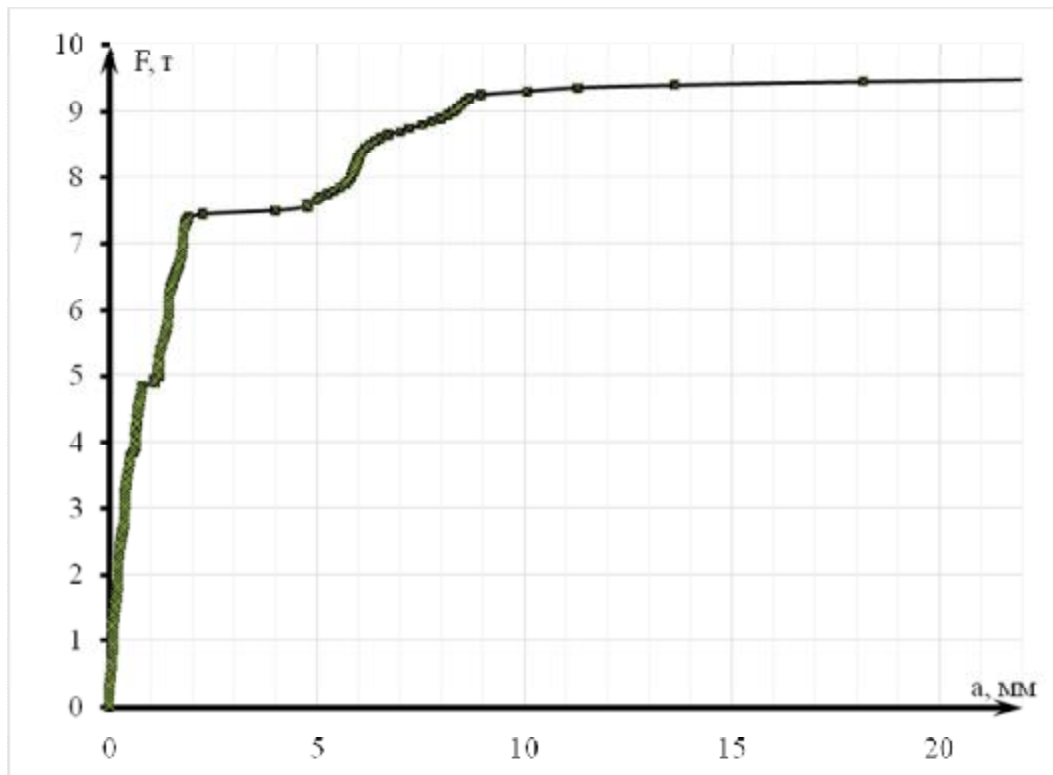


Рисунок 7 – Диаграмма зависимости «нагрузка – прогиб» в КЭ – комплексе ABAQUS

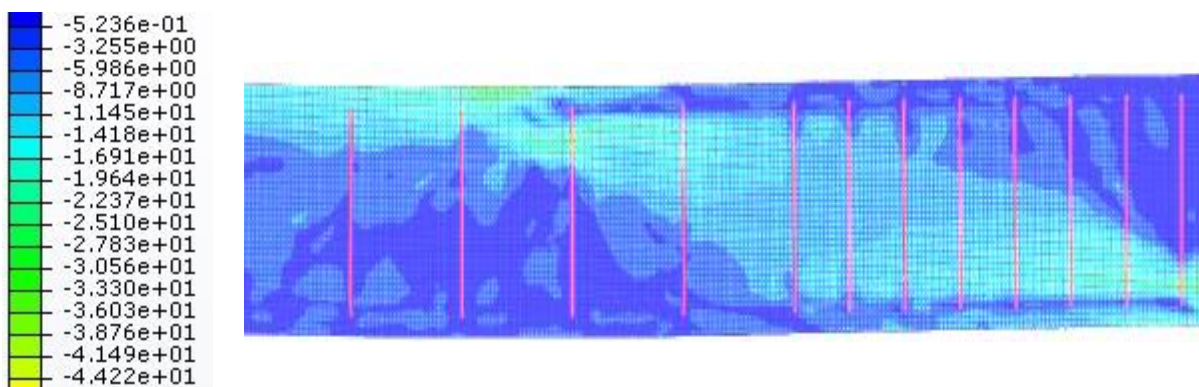


Рисунок 8 – Изополя нормальных напряжений по Мизесу (фрагмент балки)

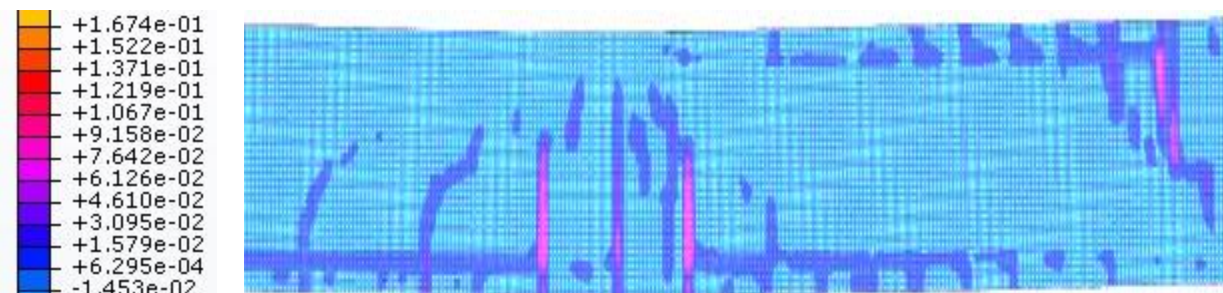


Рисунок 9 – Изополя главных растягивающих деформаций (фрагмент балки)

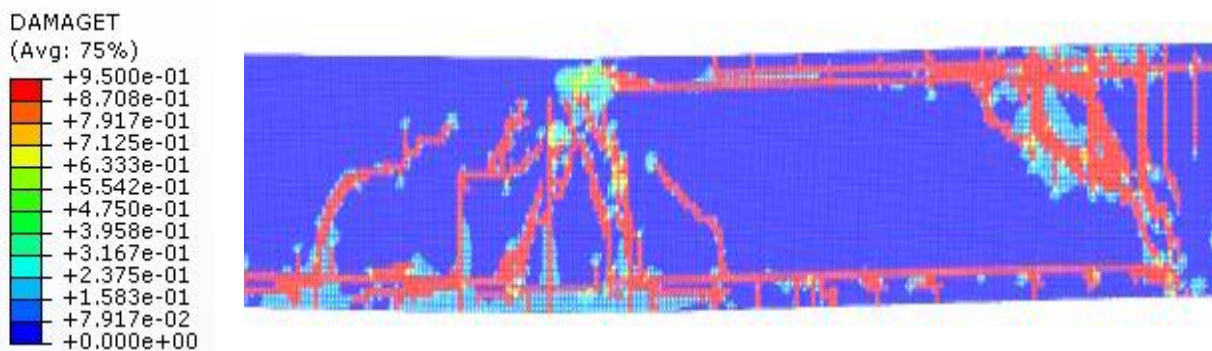


Рисунок 8 – Картина трещинообразования перед разрушением и изополя параметра повреждения при растяжении d_t

По результатам расчета численной модели в КЭ-комплексе ABAQUS анализируя диаграммы «нагрузка – прогиб» (рисунок 7) следует отметить, что после появления трещины в бетоне растянутой зоны в интервале нагрузок соответствующем от 15 до 50 кН происходит незначительное скачкообразное приращение общей деформативности образца, при этом сохраняется практически линейная зависимость «усилие-прогиб». Данное напряженное состояние сохраняется вплоть до нагрузки 70 кН, при которой происходит значительное увеличение прогиба. Прогибы нарастают с ускорением по криволинейной зависимости в интервале разрушающей нагрузок от 90 до 95 кН. Данное поведение балки с комбинированным армированием можно объяснить работой в сечениях с трещинами стержней GFRP-армирования совместно со стальными стержнями. При этом стальные стержни не позволяют развиваться значительным деформациям в GFRP-стержнях, которые в свою очередь воспринимают часть усилий в растянутой зоне. После достижения напряжениями в стальной арматуре значений соответствующих физическому пределу текучести происходит резкий прирост деформативности в образце который сдерживается только за счет работы GFRP-армирования (рисунок 11). Продольные напряжения в стальной арматуре (в верхней зоне, над опорой) в момент разрушения составили 478 МПа, в композитной – 137 МПа, деформации 0,187% и 0,246%, соответственно. При этом, экспериментальные значения в момент перед разрушением составили: средние деформации в надопорной арматуре 0,32%, в пролетной 0,29%.

Выводы. Решения, получаемые с использованием ABAQUS, получились достаточно схожими с результатами натурного эксперимента, что позволяет КЭ – комплекс ABAQUS применять при решении задач любой сложности и на всех стадиях проектирования, возведения и эксплуатации.

Отличия результирующих значений численной модели от реально полученных по эксперименту, заключаются в применении идеализированных диаграмм деформирования и упрощении отдельных немаловажных свойств, таких как сцепление арматуры. Применение билинейных диаграмм деформирования стальной арматуры способствовала обеспечению сходимости и тем самым увеличению скорости расчета.

Высокая степень точности результатов численного расчета обусловлена достоверным определением на основе экспериментальных данных параметров модели бетона «Concrete» программной системы ABAQUS. Хотелось бы отметить, что метод прямого интегрирования (Explicit solver: Abaqus / Explicit)

предназначенный для решения динамических задач, может быть эффективно использован для решения статических задач нелинейной механики при квази-статической постановке задачи, т.к. для решения задач в динамической постановке с помощью явных схем интегрирования (Implicit solver: Abaqus / Standard) нужно прикладывать нагрузки достаточно медленно для того, чтобы устранить инерционные эффекты.

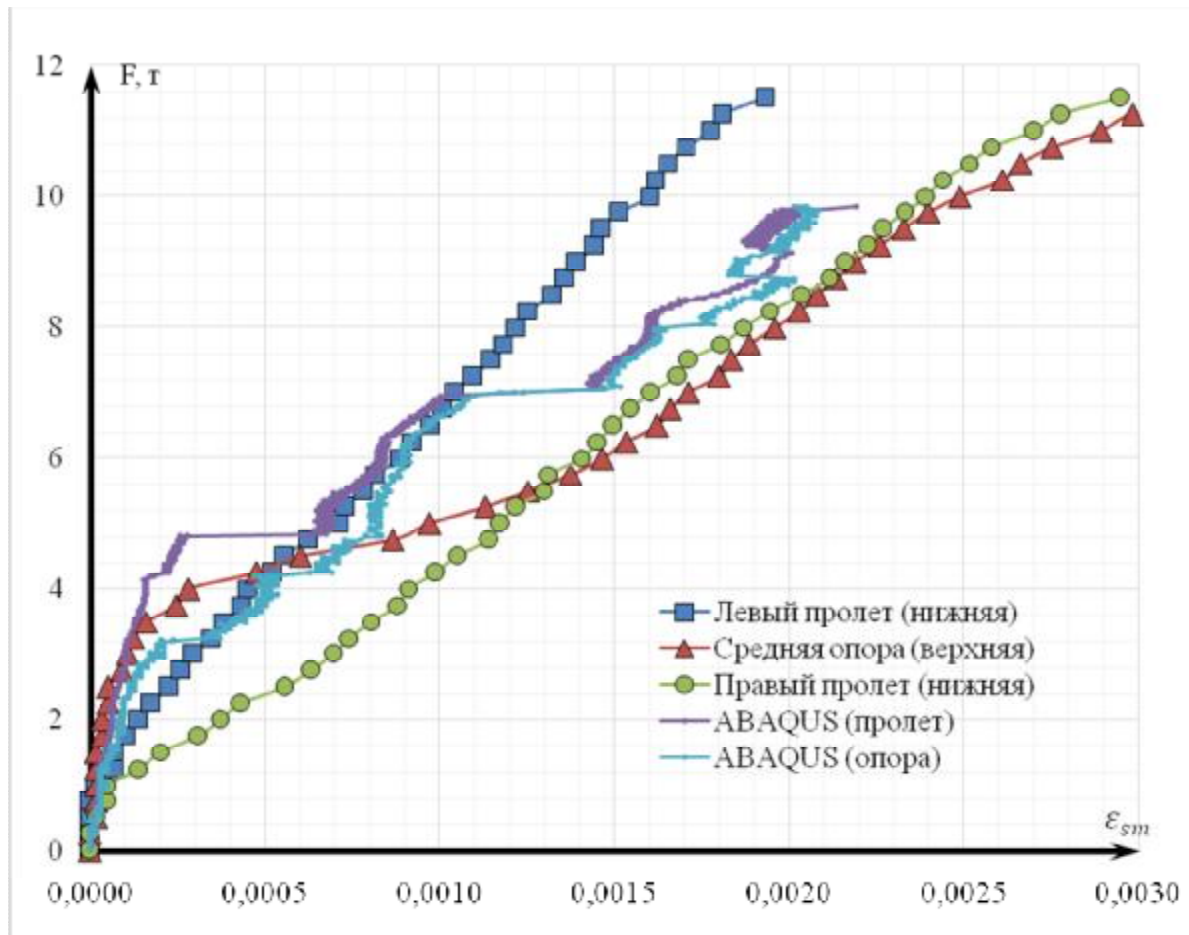


Рисунок 9 – Диаграмма «нагрузка – средние деформации в арматуре»

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лукин, А.В. Конечно-элементное моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций и элементов АЭС / А.В. Лукин, А.М. Лобачев [и др.]. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", 2013 г.
2. Силантьев, А. С. Сопротивление изгибу железобетонных элементов по наклонным сечениям с учетом влияния продольного армирования. – Москва, 2012 г.
3. Abaqus Documentation: Abaqus Analysis User's manual. Materials. Other plasticity models. Concrete.
4. Kenneth H Huebner, Donald L. Dewhirst, Douglas E. Smith, Ted G. Byrom. The finite element method for engineers, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & sons, inc, . 2001
5. Reddy, J.N.. Nonlinear finite element analysis. – Oxford University press,. 2004.
6. Abaqus Documentation: Abaqus/CAE User's Manual. Creating and analysing a model using the Abaqus/CAE modules. The Step Module. Configuring analysis procedures.
7. Голубятников А. Опыт использования программного комплекса ABAQUS для расчета строительных конструкций / А. Голубятников С. Рыжов. – [Цитировано: 11 02 2017 г.] http://tesis.com/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_bild_sapr0870.pdf.