

УДК 624.012.45

МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ В ПК «ЛИРА-САПР»

МЕТОДИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ В ПК «ЛІРА-САПР»

COMPOSITE MATERIALS AND COMPOSITE STRUCTURES MODELING METHODS ON «LIRA-SAPR»

Барабаш М.С., д.т.н., проф., Гензерский Ю.В., к.т.н., Пикуль А.В., Башинская О.Ю., аспирантка (ООО «Ли́ра-САПР», Национальный авиационный университет, г. Киев)

Барабаш М.С., д.т.н., проф., Гензерский Ю.В., к.т.н., Пікуль А.В., Башинська О.Ю., аспірантка (ТОВ «Ліра-САПР», Національний авіаційний університет, м. Київ)

Barabash M., DS, Professor, Genzerskyi I., Ph.D., Pikul A., Bashynska O., post-graduate («LIRA SAPR» LTD, National Aviation University, Kyiv)

В статье рассмотрен процесс моделирования усиления конструкций композитными материалами в ПК «Ли́ра-САПР». Предложен алгоритм расчёта зданий при изменении проектной ситуации. Рассмотрен пример численного моделирования усиления рамной конструкции, с подбором и проверкой композитного материала.

У статті розглянуто процес моделювання підсилення конструкцій композитними матеріалами в ПК «ЛІРА-САПР». Запропоновано алгоритм розрахунку будівель при зміні проектно́ї ситуації. Наведено приклад чисельного моделювання підсилення рами, з підбором та перевіркою композитного матеріалу

This paper provides detailed suggestions for the process of modeling the structural reinforcement by composite materials on the software package "LIRA-SAPR". The article offers an algorithm for calculation the construction objects in case of the changing of design situation, taking into account the modeling of the composite structure reinforcement.

Ключевые слова:

Напряженно-деформированное состояние, композитные материалы, деформации, физическая нелинейность.

Напружено-деформований стан, композитні матеріали, деформація, фізична нелінійність.

Stress-strain state, composite material, strains, deformations, material nonlinearity, software "LIRA-SAPR".

Состояние вопроса и цель исследования. В процессе эксплуатации зданий и сооружений, в результате возникновения каких-либо запроектных ситуаций, аварий или при изменении конструктивной схемы здания, возникает необходимость усиления некоторых элементов конструкции. Поэтому вопрос о повышении несущей способности зданий и сооружений является очень актуальным. Одним из наиболее эффективных инновационных методов усиления железобетонных конструкции есть использование композитных материалов (ламинатов, а также других изделий на основе углеродного (или стеклянного) волокна).

Первым композитным материалом современного типа считается однонаправленный стеклопластик, созданный Бутовым А.К. в 30-х годах. В 60-х годах в Великобритании были разработаны углеродные волокна, что послужило толчком к развитию нового поколения композитных материалов, которые сейчас очень часто используются при проектировании и реконструкции зданий. В связи с постоянным увеличением интереса к композитным материалам и актуальностью его использования, за последнее время много работы было посвящено развитию этого вопроса: работы Гвоздева А.А., Клюева С.В., Курлапова Д.В., Хаютина Ю.Г., Чернявского В.Л. Развитию методик расчёта железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами посвящены работы Кузнецова В.Д., Вагина Н.И., Григорьева Я.В. и других. Много работ, посвященных рассматриваемой теме было создано и за рубежом, например, работы Belarbia A., Acunb B., David D., Grace N.F. и других.

Анализ существующих работ по рассматриваемой теме показал, что на сегодняшний день есть большое количество работ, посвященных экспериментальным исследованиям и анализу опытных данных по усилению железобетонных конструкций. Но процесс численного моделирования усиленной конструкции и анализ её напряженно-деформированного состояния остается в достаточной мере нерешенным.

Целью данной работы является математическое моделирование рамной конструкции методом конечных элементов (МКЭ), с учётом работы системы усиления конструкции композитными материалами. А также создание алгоритма компьютерного моделирования работы конструкции до и после усиления. Реализация поставленной задачи проводилась на основе программного комплекса «Лира-САПР» и электронного справочника инженера «ЭСПРИ».

Композитными называют материалы, которые состоят из двух или более компонентов или фаз. Непрерывную фазу называют матрицей, а компоненты – наполнителем или армирующей фазой. Роль армирующей фазы заключается в изменении свойств матрицы в необходимом направлении. Такие материалы

могут иметь полимерную, металлическую или керамическую матрицу. В зависимости от используемой матрицы будут отличаться механические свойства композитного материала. Полимерные матрицы характеризуются относительно невысокой прочностью и модулем упругости. Керамические матрицы обладают высокой прочностью и жесткостью, но их недостатком есть повышенная хрупкость. Металлические матрицы характеризуются промежуточными значениями прочности, модуля упругости и являются более пластичными, нежели керамические матрицы.

Композитные материалы на основе фибры (волокон), применяемые при ремонте и усилении строительных конструкций, изготавливаются из микроволокон, которые омоноличивают в полимере и тем самым соединяют их в единое целое. Наиболее распространённые типы волокон: арамидные, углеродные и стекловолокна. Физико-механические свойства композитных материалов определяется типом и количеством применяемых волокон.

Преимущественное использование композитных материалов при усилении конструкций обусловлено их физическими свойствами:

Стойкость к химическим воздействиям. Композитные материалы на основе углеродных и арамидных волокон хорошо сопротивляются химическим воздействиям, таким как щелочам, кислотам, хлоридам, сульфатам, нитратам и др.

Электропроводность. Стекловолокна и арамидные композитные материалы являются диэлектриками и могут быть использованы даже для защиты линий электропередач.

Спротивление ударным нагрузкам. Углеродные, арамидные и стекловолокна характеризуются высокой устойчивостью к ударным нагрузкам.

Высокая огнестойкость. Стекловолокна сохраняют прочностные характеристики при температуре эксплуатации до 1000 °С, углеродные волокнистые материалы могут эксплуатироваться при температуре до 275 °С.

Обеспечение несущей способности и устойчивости любой конструкции закладывается на основе компьютерного и численного анализа их напряженно-деформированного состояния.

Рассмотрим поэтапно процесс расчёта конструкции в ПК «Лири-САПР» с учётом повышения несущей способности её элементов.

В случае изменения проектной ситуации (увеличения нагрузки на объект, проявлении дефектов в каких-либо элементах конструкции, изменении назначения или перепланировке строительного объекта), в первую очередь, необходимо произвести статический расчет конструкции с учётом воздействия новых нагрузок. По результатам статического расчета необходимо подобрать необходимое армирование для железобетонных элементов.

После определения армирования необходимо произвести расчет конструкции с учётом физической нелинейности. В результате расчета необходимо определить элементы конструкции, в которых возникают трещины, следовательно, элементы, которые нуждаются в усилении.

На следующем этапе проектирования нужно подобрать параметры композитного материала, которым будут усиливать конструкцию. Несущую способность усиленного элемента можно проверить в ЭСПРИ. В результате проверки, в ЭСПРИ можно получить новую приведенную жесткость усиленного элемента.

После подбора композитного материала и проверки несущей способности усиленного элемента, в ПК «Ли́ра-СА́ПР» нужно задать новую жесткость конечным элементам расчётной схемы. Для этого в элементах, которые необходимо усилить, нужно изменить тип конечного элемента на физически-нелинейный универсальный пространственный стержневой КЭ №210. После задания новой жесткости (с учётом усиления конструкции композитными материалами) нужно произвести новый расчёт. В результате расчета можно увидеть, как изменится напряженно-деформированное состояние расчётной модели в целом и возникает ли необходимость в дополнительном усилении оставшихся элементов конструкции.

При желании, после перераспределения усилий в расчётной схеме, в ЭСПРИ можно произвести повторную проверку несущей способности усиленных элементов конструкции, уже с новыми полученными в ПК «Ли́ра-СА́ПР» усилиями в этих элементах.

Таким образом, процедуру расчета аналитической модели в ПК «Ли́ра – СА́ПР» и ЭСПРИ с учетом усиления можно отобразить в следующем виде алгоритма, что показано на рис.1.

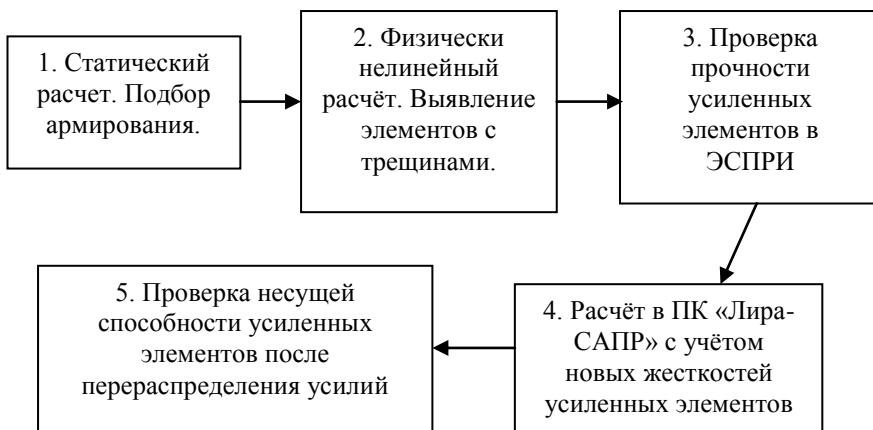


Рис. 1. Алгоритм расчёта усиления конструкции в ПК «Ли́ра-СА́ПР»

Рассмотрим процедуру расчета усиления конструкции в ПК «Ли́ра-СА́ПР» на примере расчётной модели рамы (рис. 2).

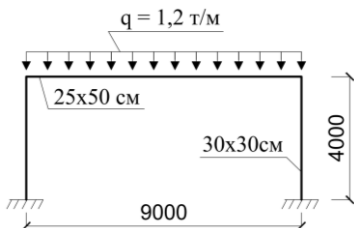


Рис. 2. Расчётная схема рамы.

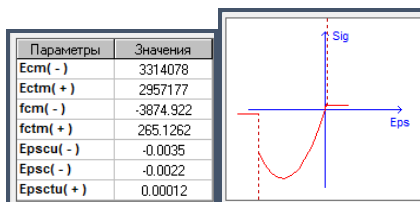


Рис. 3. Параметры нелинейного деформирования бетона

После статического расчета для рассматриваемой расчётной модели было подобрано соответствующее армирование.

После этого был произведен расчет с учетом физической нелинейности, в котором были заданы соответствующие параметры деформирования бетона и арматуры. Также были заданы параметры для расчёта деформации конструкции с учётом ползучести. Изменение коэффициента ползучести во времени было задано при помощи 44-го кусочно-линейного закона ползучести.

При этом коэффициент ползучести $\varphi(\tau)$ был рассчитан по формулам:

$$\varphi(\tau) = \varphi(t')f(t-t'), \quad (1)$$

$$\varphi(t') = C_0 + \sum_{k=1}^m \frac{A_k}{(t')^k}, \quad (2)$$

$$f(t-t') = \sum_{k=0}^m B_k e^{-\gamma_k(t-t')}, \quad (3)$$

где t – момент времени, для которого определяется деформация; t' – момент приложения элементарного приращения напряжения; B_k и γ_k – постоянные, подобранные надлежащим образом для принятого материала, при этом $B_0 = 1$, $\gamma_0 = 0$ и $\gamma_k > 0$.

Величина C_0 – это предельное значение меры ползучести; A_k – некоторый параметр, который зависит от свойств и условий старения для принятого материала.

После расчета с учётом физической нелинейности были получены схемы напряженно-деформированного состояния конструкции.

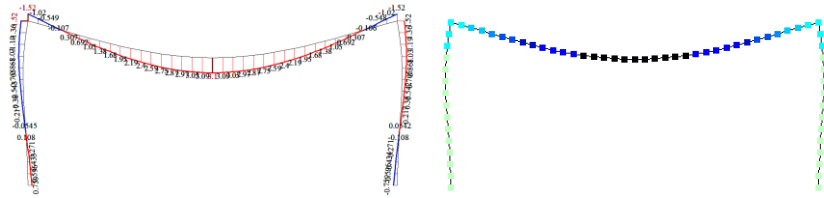


Рис.4. Схемы напряженно-деформированного состояния.

В результате расчета было определено, что на 3 стадии проявления деформаций ползучести в некоторых элементах схемы возникают трещины. На рис. 5 показаны диаграммы напряжений и деформаций в поперечных сечениях балки и колонн, до появления трещин и после.

Для усиления элементов рамы, в которых возникли трещины был подобран композитный материал марки Aslan 400 CFRP Laminate со следующими жесткостными характеристиками:

- толщина монослоя: 1,4 мм;
- модуль упругости, E : 131000 МПа;
- прочность материала на растяжение: 2400 МПа;
- деформация при разрыве: 0.0187 %.

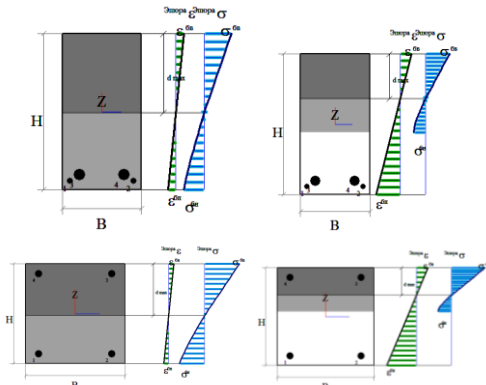


Рис. 5. Диаграммы напряжений и деформаций поперечных сечений схемы.

Коэффициент условий работы принимался равным единице.

После подбора композитного материала для усиления, в ЭСПРИ была произведена проверка несущей способности усиленного элемента рамы.

Для усиленных элементов, которые работают на сжатие, проверка несущей способности осуществляется по формулам:

- при усилении внешним армированием в продольном направлении:

$$Ne \leq R_b bx(h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_s '(h_0 - a') + R_f A_f a, \quad (4)$$

- при усилении внешним армированием в поперечном направлении:

$$Ne \leq R_{b3} bx(h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_s '(h_0 - a'). \quad (5)$$

Для элементов, что работают на изгиб, проверка осуществляется по продольному изгибающему моменту:

– для прямоугольного сечения:

$$M \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_s' (h_0 - a') + R_f A_f a, \quad (6)$$

– для таврового сечения, если граница проходит в ребре:

$$M \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_b (b_f' - b) h_f' (h_0 - 0,5h_f') + R_{sc} A_s' (h_0 - a') + R_f A_f a$$

После подбора материала для усиления, и проверки усиленных элементов конструкции, была получена приведенная жесткость усиленных элементов. Для расчёта компьютерной модели с учетом новых жесткостей, КЭ №10 мы заменили на КЭ №210, которым присвоили новые приведенные жесткостные характеристики.

Одним из самых распространенных классических вариантов повышения несущей способности конструкции есть увеличение её жесткости, путём установки металлической обоймы. Рассмотрим пример расчета усиления колонн данной рамной конструкции при помощи устройства металлических обойм. Для этого нужно вместо подбора композитных материалов подобрать размеры металлических уголков (или пластинок), которыми необходимо усилить элементы конструкции. Проверку усиленных элементов можно также осуществить в программе «ЭСПРИ». Для этого в подпрограмме «Проверка сечений сталебетонных колонн» (раздел Железобетонные конструкции) необходимо выбрать проверку сталебетонного сечения с металлическими уголками и задать параметры уголков таки образом, чтобы они моделировали металлическую обойму вокруг колонны.

Проверку композитных сечений можно осуществлять по предельным состояниям и деформационной модели, а также по двухлинейной и трёхлинейной диаграммам деформирования, рис. 6.

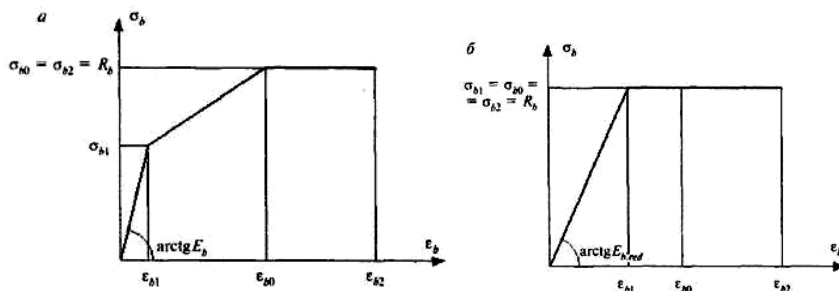


Рис. 6. Диаграммы деформирования сталебетонных элементов.

Сравнение напряженно-деформированного состояния рамы на различных стадиях проектирования с учетом усиления показано в табл.1.

Сравнение усилий и перемещений рамы при различных постановках задачи

	Линейно-упругий расчет		Физическая нелинейность		С учетом усиления	
	Перемещение Z , мм	Усилия M_y, T^*M	Перемещение Z , мм	Усилия M_y, T^*M	Перемещение Z , мм	Усилия M_y, T^*M
Колонна	0	$\pm 1,65$	-0,1	$\pm 1,89$	0	$\pm 2,06$
Балка	-2,8	2,96	-7,6	2,7	-7,3	2,26

Также, в программе «ЭСПРИ» можно производить расчет и других сечений сталебетонных конструкций, пример которых показан на рис. 7.

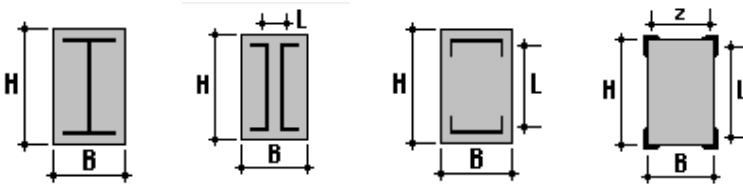


Рис. 7. Типы поперечных сечений сталебетонных конструкций для расчета в ЭСПРИ

Вывод. Использование композитных материалов для усиления конструкций позволяет значительно продлить сроки эксплуатации зданий и сооружений, предотвратить или устранить аварийную ситуацию, исправить ошибки строительства или проектирования, а главное – обеспечить надежную эксплуатацию и долговечность конструкции.

Использование композитных материалов (ламинатов и изделий из углеродного или стеклянного волокна) позволяет значительно повысить несущую способность зданий и сооружений. Математические модели расчетных схем с учётом усиления могут быть реализованы в ПК «Лири-САПР».

В работе был предложен метод моделирования усиления конструкции композитными материалами, а также рассмотрен вариант моделирования усиления конструкции металлической обоймой. Получены величины напряженно-деформированного состояния элементов расчетной модели.

Результатом исследования является сравнительный анализ моделирования конструкции и напряженно-деформированного состояния при физически нелинейной постановке задачи и с учётом усиления конструкции композитными материалами.

Результаты данной работы могут быть использованы для более широкого применения систем повышения несущей способности зданий и сооружений.

1. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция. СНиП 52-01-2003. – М. : ФАУ«ФЦС», 2012. – С. 155. **2.** Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами / В. Л. Чернявский, Ю. Г. Хаютин. – М. : ООО «Интераква», НИИЖБ, 2006. – 48 с. **3.** Шилин А.А. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами / А.А. Шилин, В.А. Пшеничный, Д.М. Каргузов. – М. : ОАО «Издательство Стройиздат», 2007. – 184с. **4.** Бокарев С.А. Нелинейный анализ железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных композитными материалами / С.А. Бокарев, Д.Н. Смердов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – Томск : ТГАСУ, 2010. – Вып. 46. – С. 113 – 125. **5.** Болгов А. Н. Особенности методики расчета колонн, усиленных композитными материалами / А. Н. Болгов, С. И. Иванов // Бетон и железобетон. – М. : Ладыя, 2012. – Вып. 81. – С. 14 –17. **6.** Ватин Н. Н. Усиление железобетонных конструкций с использованием композиционных материалов на основе углеродных волокон и постнапрягаемых стержней / Н. Н. Ватин, А. А. Дьячкова // Бетон и железобетон. – М. : Ладыя, 2009. – Вып. 74. – С. 20 – 21. **7.** Ключев С. В. Внешнее армирование изгибаемых фибробетонных изделий углеволокном / С. В. Ключев, Ю. В. Гурьянов // Инженерно-строительный журнал. – Санкт-Петербург : СПбПУ, 2013. – Вып. 36. – С. 21 – 26. **8.** Курлапов Д. В. Усиление железобетонных конструкций с применением полимерных композитов / Д. В. Курлапов // Инженерно-строительный журнал. – Санкт-Петербург : СПбПУ, 2009. – Вып. 28. С. 22 – 24. **9.** Хаютин Ю.Г. Применение углепластиков для усиления строительных конструкций / Ю.Г. Хаютин, В.Л. Чернявский, Е.З. Аксельрод // Бетон и железобетон. – М. : Ладыя, 2001. – Вып. 63 – С. 17 – 20. **10.** Чернявский В. Д. Применение углепластиков для усиления железобетонных конструкций промышленных зданий / В. Д. Чернявский, Е. З. Аксельрод // Промышленное и гражданское строительство. – М. : ПГС, 2004. – № 3. – С. 37 – 38. **11.** Шевцов Д. А. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами / Д. А. Шевцов, А. А. Гвоздева // Промышленное гражданское строительство. – М. : ПГС, 2014. № 8. – С. 61 – 64. **12.** Belarbia A., Acunb B. FRP Systems in Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures // Procedia Engineering. 2013. № 57. P. 2–8. **13.** David E., Djelal C. Repair and strengthening of reinforced concrete beams using composite 7th Int. conf. on Struct // Faults and Repair, Vol.2, 1997. P.169–173. **14.** Ehasani M. R. Design recommendation for bond of GFRP rebar to concrete // Journal of Structural Engineering. 1996. № 3(102). P. 125- 130. **15.** Grace N. F. Strengthening of concrete beams using innovative ductile fiber — fiber reinforced polymer fabric // ACI Structural Journal. № 5(99). 2002. P.692–700. 17.