

АРХИПОВ И. В., БУСАРГИН Д. А., ЛАЗАРЕВ А. Л., ЛАЗАРЕВ Г. А.
АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГНОЗНЫХ РАСЧЕТОВ КОНСТРУКЦИЙ
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА

Аннотация. В статье приводится обзор программ численного моделирования на базе метода конечных элементов. Представлен пример практического применения программы FreeCAD для предварительных вычислений с целью определения зон перенапряжения в клеewood композите и результаты испытаний образцов с градиентной структурой, запроектированной по результатам вычислений.

Ключевые слова: деревянные композиты, метод конечных элементов, FreeCAD, клеевой слой, дисперсное армирование.

ARKHIPOV I. V., BUSARGIN D. A., LAZAREV A. L., LAZAREV G. A.
THE RELEVANCE OF THE APPLICATION OF PREDICTIVE CALCULATIONS
OF STRUCTURES BASED ON NUMERICAL MODELING
OF THE COMPOSITE STRUCTURE

Abstract. The article provides an overview of numerical simulation programs based on the finite element method. An example of the practical application of the FreeCAD program for preliminary calculations in order to determine the overvoltage zones in a glue-wood composite and the results of testing samples with a gradient structure designed according to the results of the calculations are given.

Keywords: wood composites, finite element method, FreeCAD, adhesive layer, dispersed reinforcement.

Актуальность прогнозных исследований строительных конструкций не вызывает сомнений. Применение методик вычислений с помощью программных комплексов позволяет спрогнозировать напряженно-деформированное состояние элементов конструкций, акцентированно рассмотреть зоны повышенных концентрации напряжений. «Ручные» методы расчета конструкций не позволяют определиться с участками структуры материала, требующими повышенного внимания конструктора. Базовым методом конструирования структуры материала является метод конечных элементов.

Метод конечных элементов (МКЭ или FEM-в английской интерпретации) прочно вошел в практику инженерных расчетов при проектировании сложных систем, в том числе в прочностных расчетах элементов строительных конструкций с использованием методов строительной механики. Применение этого метода, реализуемого соответствующим программным обеспечением, существенно сокращает цикл проектирования строительных

конструкций, позволяя исключить большое число экспериментов и опытных проверок, необходимых при использовании классических расчетов на основе методов сопромата и строительной механики. Большое число программ в настоящее время оснащаются модулями расчёта на основе МКЭ.

До недавнего времени основной объем вычисления проводился с применением ПО ANSYS, другие CAD-системы со встроенным FEM-модулем значительно проигрывали лидеру. В настоящее время существует множество программ компьютерного инженерного анализа задач строительной механики, позволяющие проводить весь цикл вычислений – кроме уже названного ANSYS, это SolidWorks, Siemens NX, Creo Parametric, Компас 3D, T-Flex и др.).

Вышеуказанные программные продукты имеют большое число достоинств и позволяют реализовать множество задач. Однако у них есть один общий существенный недостаток – существенная стоимость лицензий. Для создания полноценного класса для серьёзного обучения возможностям конкретных программных продуктов и применения их в реальных условиях проектирования требуется значительный объем материальных затрат.

К счастью, есть альтернативные пути применения подобных программ в учебном процессе и проектировании – это свободно распространяемые программы со встроенным модулем МКЭ. В последние годы в развитии свободных систем автоматизированного проектирования (CAD, computer-aided design) наметилась тенденция на включение в рамках одной программы дополнительных модулей, позволяющих сократить количество пакетов, необходимых для проведения полного цикла исследования [1]. Например, CalculiX — открытый, свободный программный пакет, предназначенный для решения линейных и нелинейных трёхмерных задач механики твёрдого деформируемого тела и механики жидкости и газа с помощью метода конечных элементов.

Пакет CalculiX представляет собой набор консольных утилит, включающих препроцессор для подготовки исходных данных, МКЭ-решатель и постпроцессор для обработки результатов [2]. Есть возможность применения CalculiX как самостоятельного продукта, так и в качестве встроенного модуля других продуктов. Особенное место среди таких программ занимает FreeCAD, приобретающий в последнее время все большую популярность не только среди начинающих проектировщиков, но и в среде профессионалов.

Можно было бы предположить, что свободно распространяемые программы дают менее точный результат. Однако многими проектировщиками и конструкторами данное предположение категорически опровергается – результаты аналогичных вычислений в лицензионных ПК ANSYS и Solidworks, а также выполненные с помощью CalculiX, ElmerFEM (солверы FreeCAD) сходились с высокой степенью. Хотя надо признать, что формирование

задания, построение и контроль результатов удобнее реализовывать в коммерческих программах.

Во FreeCAD по умолчанию используются те же элементы, что и в Solidworks Simulation – тетраэдры с промежуточными узлами. В ПК Компас есть бесплатная версия с менее точными элементами – тетраэдрами без промежуточных узлов, более чувствительными к качеству сетки.

Особенности CalculiX, которые могут рассматриваться как преимущества: наличие всех основных функций, присутствующих у платных аналогов; FreeCAD/CalculiX позволяет провести полный цикл исследования в рамках одной программы, а также параметризацию задачи на языке программирования Python; в качестве отдельной программы содержит пре/постпроцессор (создание геометрии и расчетной сетки по командному файлу, визуализация данных по файлу результатов расчетов); не требует навыков программирования; имеет быстрые итерационные методы с преобуславливанием [1].

И все же у данного комплекса есть и недостатки: непонятный интерфейс для пользователей других программ (интерфейс выглядит как меню программы из 2010 года, но все же остается интуитивно понятным для новичков); «сырость» продукта (FreeCAD все еще находится на стадии создания; части инструментария сразу после скачивания нет, поэтому приходится все дорабатывать патчами и модулями).

В данной работе FreeCAD использовался для изучения напряженно-деформированного состояния слоистого композита – деревянной изгибаемой балки, усиленной системой внешнего армирования (СВА) (рис. 1).

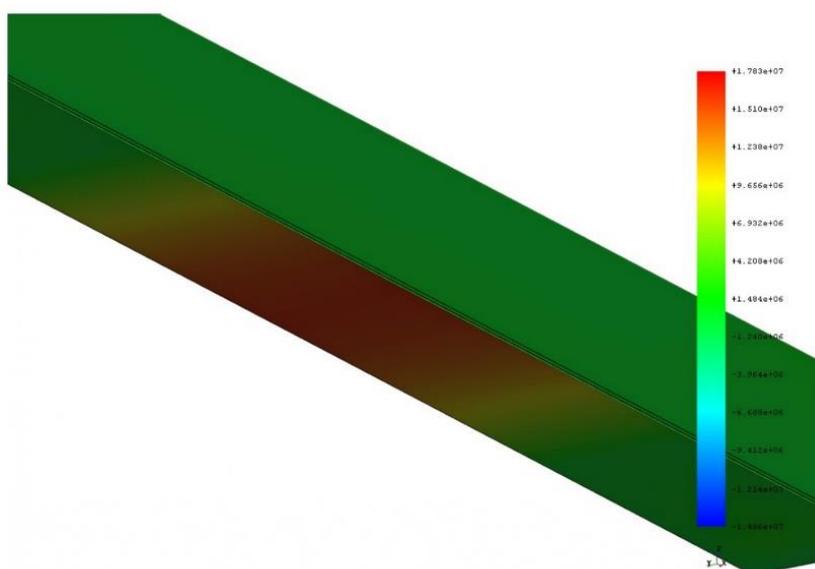


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние изгибаемого деревянного композита с системой внешнего армирования (углеродная лента FibArm, ПК FreeCAD).

Одним наиболее современных и прогрессивных методов усиления строительных конструкций является армирование с помощью систем внешнего армирования. Армирование деревянных конструкций возможно для решения ряда технологических задач:

- применение деревянных конструкций для сооружений с большими пролетами и нагрузками;
- изменение эксплуатационного режима и нагрузок на конструкции;
- устранение возникающих эксплуатационных дефектов;
- реконструкция сооружений с изменением конструктивных и расчетных схем элементов;
- использование при изготовлении сращенных элементов с применением более низких сортов древесины;
- выявление дефектов, возникающих при изготовлении клееных конструкций.

Номенклатура армирующих элементов для клееных деревянных конструкций достаточно обширна: вариант клеенной арматуры, который выполняют из металлических и полимерных стержней; листовая арматуры системы внешнего армирования и клеенная межслойная арматура из листовых элементов, холстов из волокон стекло- и углепластика [3]. Большепролетные клееные армированные конструкции, обладающие низким весом и значительной несущей способностью, применяют в самых различных областях строительства: зрелищно-спортивные, сельскохозяйственные и складские сооружения, конструкции пролетных строений мостов и эстакад, здания с химически опасными производствами. Такая разнообразная область применения диктует весьма высокие требования к их эксплуатационным свойствам. К наиболее перспективным материалам для армирования деревянных клееных конструкций относят арматуру из стекло- и углеволокна [4].

Интегрирование в клеевой слой высокомодульного волокна позволяет значительно повысить надежность работы композита. В традиционных клееных деревянных конструкциях по границе клеевого слоя, соединяющего слои древесины и арматуры, возникают неравномерные объемные деформации, поскольку в процессе эксплуатации возможны воздействия перепадов температуры и влажности, агрессивных сред, повторной кратковременной и длительной нагрузок и др.

С другой стороны, известно, что в слоистых композитах на границах слоев возникают значительные сдвиговые усилия. Кроме того, усилия, воздействующие на непрерывные связи соединительного слоя, работающие на сдвиг, передаются неравномерно. Перенапряженными являются крайние участки, где возникает опасность разрушения. Модель участка с зонами перенапряжения, полученная с помощью FreeCAD, представлена на рисунке 2.

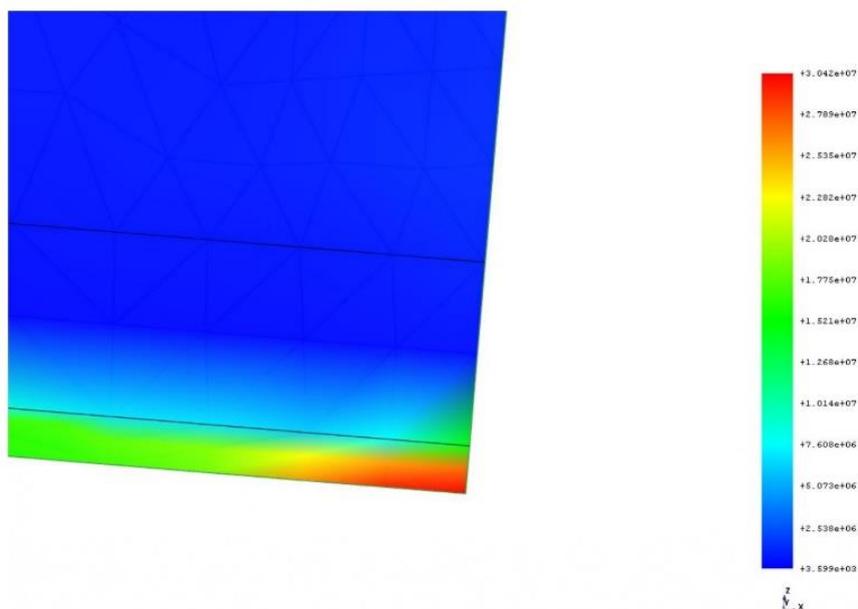


Рис. 2. Зона повышенных напряжений слоистого деревянного композита с СВА.

Устранить это обстоятельство можно путем усложнения конструкции соединения (геометрии и деформативных свойств связей). Одним из способов решения этой проблемы может быть направленное изменение характеристик клевого слоя за счет введения в его состав высокодисперсного наполнителя, например, углеродного волокна.

В работе [5] было предложено характер изменения свойств клевого шва выполнять, основываясь на зависимостях, получаемых исходя из решения дифференциального уравнения:

$$\begin{aligned}
 (\sigma_y - \nu\sigma_x) \frac{\partial^2 a^2}{\partial x^2} - 2(1 + \nu)\tau_{xy} \frac{\partial^2 a}{\partial x \partial y} + (\sigma_x - \nu\sigma_y) \frac{\partial^2 a^2}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial(\sigma_x - \sigma_y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial a}{\partial x} + \\
 + 2 \frac{\partial(\sigma_x - \sigma_y)}{\partial y} \cdot \frac{\partial a}{\partial y} + a \nabla^2 (\sigma_x - \sigma_y) = 0,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где a – коэффициент деформации (коэффициент податливости), который является функцией координат и представляет собой величину, обратную модулю упругости $E = E(x, y)$.

Задавая желаемый характер распределения напряжений в объеме композита, можно получить закон распределения модуля упругости E по сечению образца. В наших экспериментах в качестве материалов для изготовления образцов использовались [6]: эпоксидная смола ЭД-20, активный разбавитель Этал-1, нетоксичный отвердитель аминного типа Этал-45М, который рекомендован к применению при изготовлении антикоррозионных покрытий, стеклопластиковых изделий методом контактного формования; однонаправленные ленты и высокодисперсный наполнитель на основе волокна FibArm. Степень наполнения клеевой композиции изменялась по длине композита с учетом зависимостей, полученных по результатам вычислений, и согласно схемам, построенным с помощью программного комплекса FreeCAD. Результаты испытаний приведены в таблице.

Результаты испытаний

№	Прочность при изгибе, МПа	Среднее по серии, МПа	Характер разрушения	Изменение характеристик прослойки
KI-1	330,75	309,79	Разрушение по нормальному сечению в середине пролета после отрыва арматуры, начало отрыва на торце образца	Один слой углеродной ленты с однородным по длине клеевым слоем
KI-2	316,05			
KI-3	330,75			
KI-4	301,35			
KI-5	278,48			
KI-6	301,35			
KV-5	291,1	361,99	В середине пролета по нормальному сечению, с разрывом арматуры	Функционально направленное изменение свойств прослойки
KV-6	429,2			
KV-7	312,38			
KV-8	330,75			
KV-9	257,25			
KV-10	451,25			

Проведенные исследования наглядно показали, каким образом прогнозные вычисления, выполненные программным комплексом с встроенным решателем по методу конечных элементов, позволяют определить зоны акцентированного воздействия на композит с целью ее оптимизации и получения оптимальной структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Насибуллаев И. Ш. Применение свободных программ FreeFem++/Gmsh и FreeCAD/CalculiX для моделирования статических задач упругости // Многофазные системы. – 2020. – № 3-4. – С. 183–198.
2. Притыкин Д. Изучаем сопромат с CalculiX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/423359/> (дата обращения 05.03.2023).
3. Евстигнеева В. М., Куприяшкина Л. И., Лазарев А. Л. Деревянные слоистые элементы с неоднородно-слоистой структурой [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2020. – № 3. – Режим доступа: <https://journal.mrsu.ru/arts/derevyannye-sloistye-elementy-s-neodnorodno-sloistoj-strukturoj> (дата обращения 05.03.2023).
4. Лазарев А. Л. Создание градиентных покрытий с применением элементов внешнего армирования из углеволокна // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. – С. 68–71.
5. Какурин И. Р., Лазарев А. Л., Шорин М. А. Создание градиентных покрытий с комплексом свойств, обеспечивающих стойкость к эксплуатационным воздействиям [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2015. – № 13. – Режим

доступа: <https://journal.mrsu.ru/arts/sozdanie-gradientnyx-pokrytij-s-kompleksom-svoystv-obespechivayushhix-stojkost-k-ekspluatacionnym-vozdjestviyam> (дата обращения 05.03.2023).

6. Лазарев А. Л., Полторацкий Д. М., Тянкин И. А. Практическая реализация методов проектирования внешнего армирования деревянных элементов на основе функционально-градиентных композиционных материалов [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2018. – № 9. – Режим доступа: <https://journal.mrsu.ru/arts/prakticheskaya-realizaciya-metodov-proektirovaniya-vneshnego-armirovaniya-derevyannyx-elementov-na-osnove-funkcionalno-gradientnyx-kompozicionnyx-materialov> (дата обращения 05.03.2023).