

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ВИТЫХ СТЕРЖНЯХ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Приведены результаты численных исследований напряженно-деформированного состояния соединений деревянных конструкций с применением нового типа витых стержней крестообразного поперечного сечения с помощью программного комплекса APM WinMachine. Изучено напряженно-деформированное состояние предложенных типов соединений при работе витых стержней на выдергивание. Проведено сравнение полученных результатов с данными экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** витые стержни, численные исследования, напряженно-деформированное состояние, расчетное усилие, методика расчета.

Условиями для создания и широкого внедрения в практику современного строительства новых эффективных конструктивных решений узлов деревянных конструкций служат: способность восприятия значительных расчетных усилий, низкая трудоемкость изготовления и стоимость, научно обоснованный инженерный расчет, отражающий действительную работу соединения в натуральных условиях. Для обеспечения таких условий должны быть применены новые формы связей, обладающие как повышенной несущей способностью, так и легкостью внедрения в массив древесины.

В результате комплексных исследований, проведенных на кафедре строительных конструкций ОГУ, был создан новый тип соединительного элемента в виде крупноразмерного витого стержня крестообразного поперечного сечения [1], выполненного из термически обработанной стали. Такие стержни можно внедрять в массив древесины без предварительной рассверловки отверстий при помощи тяжелого молотка, ударным методом электро- или пневмоинструментом, а также огнестрельным способом (рис. 1).

Применение нового типа соединительного элемента в узлах деревянных конструкций вызывает необходимость исследования напряженно-деформированного состояния, как самого соединительного стержня, так и массива древесины в зоне его забивки. Без таких исследований практическое применение исследуемых соединений невозможно, так как инженер-проектировщик должен иметь в своих руках четкую методику расчета и конструирования узлов деревянных конструкций на витых крестообразных стержнях, работающих на выдергивание.

Такая методика должна базироваться на объективном анализе прочности и жесткости предлагаемых соединений в зависимости от их фактических параметров.

Оценка напряженно-деформированного состояния соединения на стальных витых стержнях крестообразного поперечного сечения выполнена численными методами с привлечением современных средств автоматизированного проектирования, основанных на моделировании задачи в трехмерном пространстве с последующим расчетом методом конечных элементов. Принимая во внимание достаточно сложную форму, как самого стержня, так и ответного паза, сформированного путем забивки его в деревянный брус, для создания пространственной геометрии соединения использована система автоматизированного проектирования, предназначенная для создания 3D моделей – CAD система. Приведем наиболее значимые этапы выполненных исследований.



Рисунок 1. Монтажный пистолет ПЦ-84 с модернизированными насадками для огнестрельной забивки разработанных витых крестообразных стержней в массив древесины

В настоящей работе использовалась программа Компас 3D разработки группы компаний Аскон. Однако хотелось бы отметить, что нет принципиальной разницы, в каком графическом редакторе будет создаваться трехмерная модель, так как в последующем она будет передана в формат STEP. В дальнейшем посредством обменного формата геометрия передается в модуль APM Studio, входящий в состав программного комплекса APM WinMachine [2]. Модуль APM Studio предназначен для подготовки построенных моделей к прочностному и динамическому анализу, а также для выполнения расчетов и визуализации результатов этих расчетов.

В состав APM Studio входят инструменты геометрического моделирования, подготовки сборок к расчету, задания граничных условий и нагрузок, а также встроенные генераторы конечно-элементной сетки (как с постоянным, так и с переменным шагом). После получения конечно-элементной сетки, производится передача ее в модуль APM Structure3D. Модуль APM Structure3D является базовым расчетным ядром системы APM WinMachine.

Модуль APM Structure3D предназначен для комплексного анализа трехмерных конструкций произвольной формы. С его помощью можно методом конечных элементов выполнить прочностной расчет произвольно закрепленных моделей, включающих стержневые, тонкие пластинчатые и объемные твердотельные элементы конструкций, а также произвольные комбинации всех перечисленных выше элементов. Исходные упруго-деформационные характеристики элементов при этом могут быть линейными, а также геометрически и физически нелинейными.

В отличие от вариационно-разностного метода в методе конечных элементов существенную роль играют функции формы, точнее их интерполяционные свойства. В этом смысле метод конечных элементов близок к теории сплайн-функций, интенсивно разрабатываемых в последнее время. В этом плане изложенный подход численных исследований позволяет наиболее точно отразить особенности узловых сопряжений деревянных конструкций при помощи стальных витых стержней крестообразного поперечного сечения.

Для построения расчетных моделей, как винтового стержня, так и деревянного бруса достаточно двух формообразующих операций:

- выталкивание;
- кинематическая операция.

Первая процедура предназначена для создания замкнутых объемов правильной формы – цилиндр и параллелепипед, а вторая для создания винтовых поверхностей. Используя выше перечисленный функционал, были созданы отдельные модели витого стержня и деревянного бруса, а затем их сборка (рис. 2).

Заключительным этапом в работе с 3D графическим редактором является импорт модели в обменный формат STEP. Для подготовки геометрической модели к последующему конечно-элементному анализу использован модуль APM Studio.

Использованные граничные условия, в процессе построения сборочной модели в графическом пакете, не могут быть использованы при расчете, так как не имеют жесткостных характеристик по нормальным и касательным направлениям. Поэтому была применена процедура автоматического определения зон взаимодействия деталей друг с другом – контактных зон. В качестве типа контактного взаимодействия выбран жесткий контакт. Данный вид контакта соответствует наличию общих винтовых плоскостей стержня и дерева, а также закусыванию металлического стержня волокнами дерева. Определение жесткостных характеристик выполняется автоматически программой, исходя из жесткостных характеристик материалов элементов сборочной единицы. Предпоследним этапом постановки задачи является задание силовых факторов – данная процедура выполняется достаточно просто, путем указания поверхности и величины нагрузки.

Наиболее ответственным этапом при создании расчетной модели является назначение размера конечного элемента, на который будет произведено разбиение модели. Как показали итерационные расчеты, при неверном задании размера конечного элемента возможно получение погрешности вплоть до 50%. Для генерации конечно-элементной сетки модулем APM Studio использованы 4-х узловые элементы с 3-мя степенями свободы в каждом узле. Шаг сетки на стержне составит 1 мм (при данном размере тетраэдра получим не менее двух слоев солидов по сечению), на деревянном бруске 2 мм. Такие малые размеры необходимы для корректного взаимодействия древесины со стержнем (рис. 3).

После генерации сетки передаем ее в модуль APM Structure3D. В этом модуле задаем опоры, при этом расстояние между ними может варьироваться.

Присваиваем витому стержню и деревянному брусу необходимый тип материала и выполняем проверку твердотельных на отсутствие совпадающих элементов, а также элементов с нулевым объемом.

Заключительным этапом является создание различных вариантов силового воздействия путем последовательного увеличения ранее задан-

ной нагрузки в два раза в интервале от 900 до 9000 Н и проведение расчета (наиболее распространенные величины нагрузок на один стержень для рассматриваемого класса соединений).

При решении задачи по расчету на выдергивание двух или более стержней (при соблюдении симметрии соединения) наиболее эффективно в расчет вводить не всю расчетную схему и только ее половину. Рассечение модели необходимо произвести по срединной плоскости относительно стержней, и для обеспечения условий симметрии полученную плоскость рассече-

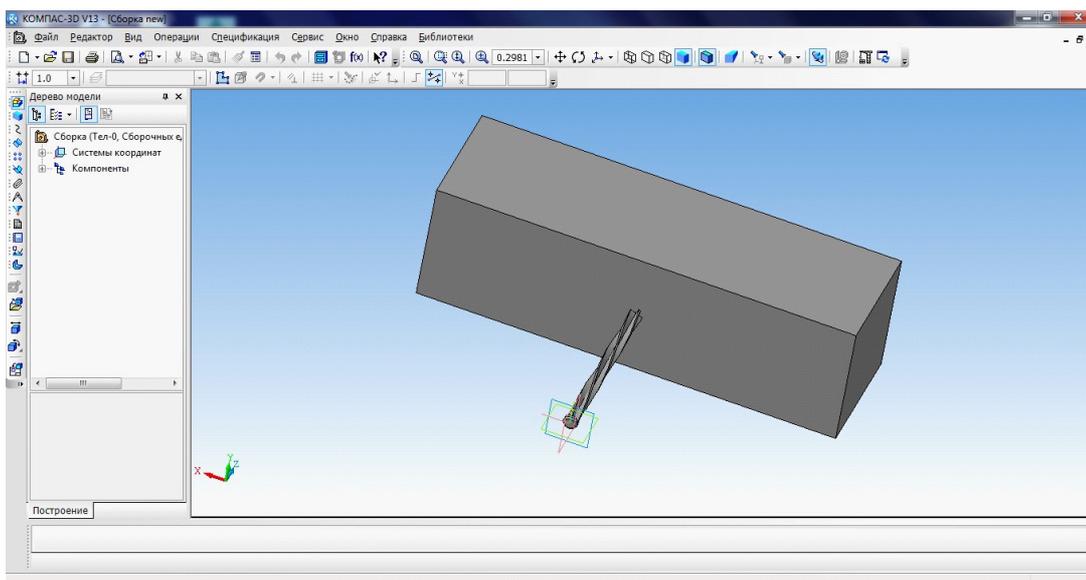


Рисунок 2. Сборочная модель соединения, выполненная в модуле Компас 3D

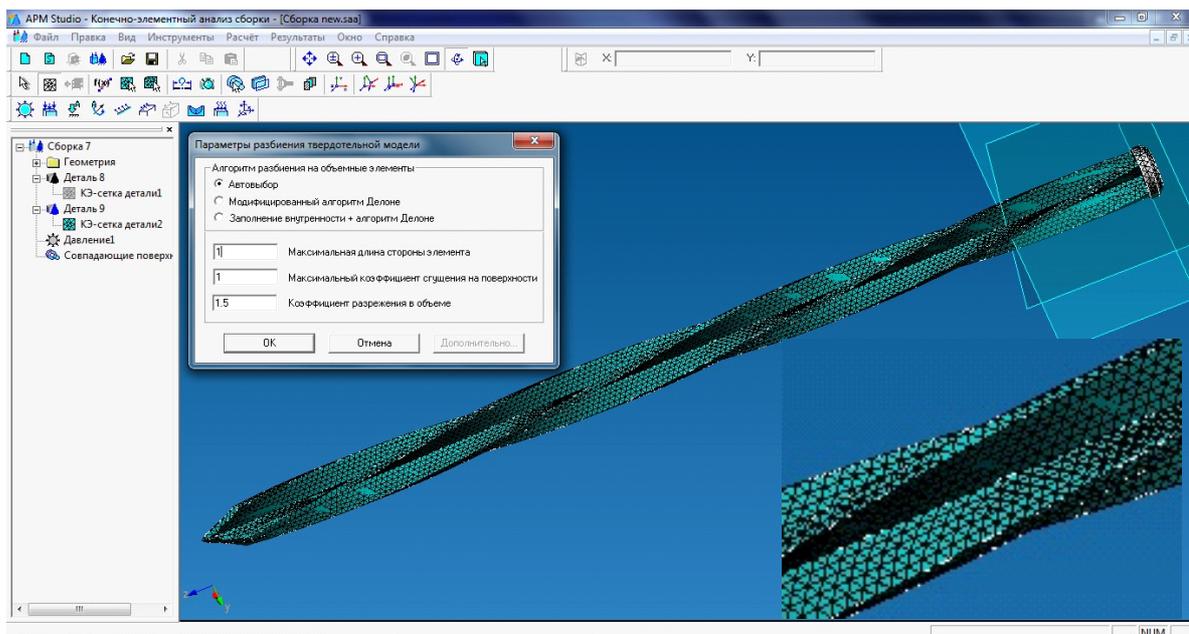


Рисунок 3. Разбиение витого стержня на конечные элементы

Таблица 1. Расчетные значения напряжений в стержне и брусе при расстоянии между опорами 800 мм

Величина нагрузки, Н	Максимальные напряжения в стержне, Н/мм <sup>2</sup>	Максимальные напряжения в брусе, Н/мм <sup>2</sup>
900	17,7	1,4
1800	35,4	2,8
3600	70,8	5,6
7200	141,6	11,2
9000	177,2	14,2

ния надо закрепить в направлении нормали, в нашем случае по направлению оси X.

После проведения расчета для схемы с расстоянием между опорами 800 мм были получены следующие результаты (таблица 1).

На рис. 4 представлены характерные карты распределения напряжений для нагрузки 9000 Н. Аналогичные результаты были получены для расстояний между опорами 400 мм и 1000 мм.

Оценивая теоретические данные с точки зрения прочности соединения на выдергивание можно сделать вывод, что полученные результаты численных исследований особенностей работы стальных витых стержней в соединениях деревянных конструкций имеют хорошую качественную сходимость с экспериментальными данными, приведенными в [3]. При этом, количественные показатели деформации стержней при их выдергивании, полученные при численных исследованиях, на 18-25% ниже экспериментальных величин. Данные расхождения могут быть объяснены тем фактом, что при внедрении стержня в массив происходит разрыв ее волокон, который, несомненно, снижает плотность контакта древесины и стержня. Однако, при создании расчетной модели это не возможно учесть.

Также подлежит дополнительному анализу тот факт, что при расчете соединений с применением двух и более стержней усилия между ними распределены равномерно. В реальных конструкциях (точность сборки, пороки древесины)

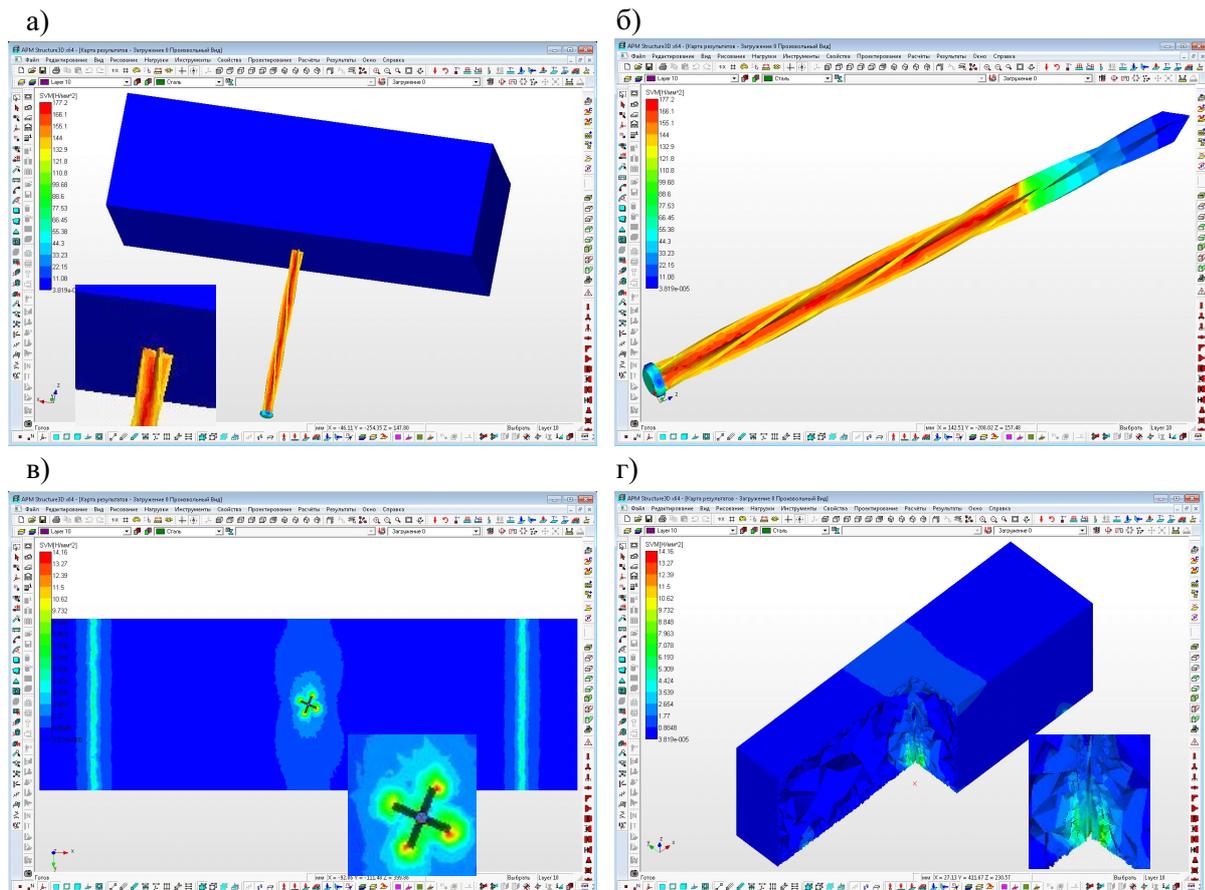


Рисунок 4. Характерные карты распределения напряжений для нагрузки 9000 Н: а – по стержню и брусу; б – по стержню; в – только по брусу (вид снизу); г – в брусе внутри паза

это практически невозможно и, соответственно этот вопрос требует дополнительного исследования, в том числе экспериментального.

Растягивающие напряжения в стержне уменьшаются по мере удаления от точки приложения нагрузки, при этом их падении происходит наиболее интенсивно на длине более  $20d$ , что хорошо согласовывается с экспериментальными графиками, также приведенными в [3]. Данный факт подтверждает целесообразность внедрения стального витого стержня крестообразного поперечного сечения в массив древесины с точки зрения оптимизации проектируемого соединения на глубину не более  $20d$ .

Работа двух и более стержней в одном соединении в целом по результатам численных

расчетов не влияет на напряженно-деформированное состояние деревянного элемента, однако шаг их расстановки обязательно должен нормироваться с точки зрения предотвращения возможного раскалывания древесины в направлении как вдоль, так и поперек волокон. С другой стороны, численные исследования подтвердили обоснованность геометрических размеров деревянных призм, принятых для экспериментальных образцов.

Стоит также отметить, что сам витой стержень при всех рассмотренных вариантах нагружений испытывает напряжения существенно ниже, нежели расчетное сопротивление стали.

22.05.2012

**Список литературы:**

1. Патент РФ на изобретение №2353830. МПК F16B 13/00. Соединение деревянных элементов строительных конструкций / Дмитриев П.А., Шведов В.Н., Столповский Г.А., Украинченко Д.А. // Оpubл. 27.04.2009, Бюл.12. – 6 с.
2. Программный комплекс CAD/CAE Системы APM VinMachine. Лицензионное соглашение № 24201 от 05.07.2011. ID 1782231818. 1 электрон. опт. диск (DVD – ROM).
3. Дмитриев П.А., Жаданов В.И., Столповский Г.А. Соединения элементов деревянных конструкций на стальных винтовых крестообразных стержнях, работающих на выдергивание // Известия ВУЗов. Строительство. 2010. № 4. С. 133-137.

Сведения об авторе:

**Жаданов Виктор Иванович**, профессор кафедры строительные конструкции Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, доцент, e-mail: organ-2003@bk.ru

**Аркаев Максим Александрович**, аспирант кафедры строительные конструкции Оренбургского государственного университета, e-mail: arkaevrus@mail.ru

**Лисов Сергей Вячеславович**, аспирант кафедры строительные конструкции Оренбургского государственного университета, e-mail: lisoff@bk.ru

**Столповский Георгий Александрович**, преподаватель кафедры строительные конструкции Оренбургского государственного университета, e-mail: stolpovskij@mail.ru  
460018, г. Оренбург, пр. Победы 13, ауд. 2127, тел.: (3532)91-21-23

**UDC 624.011.1/.2**

**Zhadanov V.I., Arkaev M.A., Lisov S.V., Stolpovsky G.A.**

Orenburg state university, e-mail: organ-2003@bk.ru

**ESTIMATION OF THE INTENSE-DEFORMED CONDITION OF CONNECTIONS OF WOODEN DESIGNS ON TWISTED CORES BY MEANS OF NUMERICAL METHODS**

We represented results of numerical researches of the intense-deformed condition of connections of wooden designs with application of new type of twisted cores with cross-shaped section with the help of program APM WinMachine. We studied the intense-deformed condition of these connections with twisted cores working to a wrest. Comparison of the received results with the data of experimental researches is spent.

Key words: twisted cores, the numerical researches, the intense-deformed condition, settlement effort, a design procedure.

**Bibliography:**

1. Russian Federation Patent on the invention №2353830. IPC F16B 13/00. Wooden junction of building constructions / Dmitriev P.A., Shvedov V.N., Stolpovskiy G.A., Ukrainchenko D.A. // Publ. 27.04.2009. Bull.12 – 6 pages.
2. Program complex CAD/CAE of System APM VinMachine. The license agreement №24201 from 07.05.2011. ID 1782231818. 1 electronic optical disk (DVD – ROM).
3. Dmitriev P.A., Zhadanov V.I., Stolpovsky G.A. Connections of elements of wooden designs on the steel screw crosswise cores working on wrest// High School's Izvestiya. Building. 2010. №4. 133-137 pages.