ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕСТКОГО СТЫКА СЛОИСТЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

М.А. Водяников, Г.Г. Кашеварова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, РОССИЯ

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы моделирования и решения контактных задач в программном комплексе ANSYS на примере расчета жесткого узла стыка клееной деревянной балки. Приведены сравнительные расчетные данные для неразрезной балки и балки со стыком в середине на клеенных углепластиковых нагелях. Описаны возможности применения контактных элементов между различными материалами, учитывающие нелинейность постановки задачи. Показаны изополя напряжений и перемещений в элементах. Проведен эксперимент по определению несущей способности стыка и определения характера разрушения конструкции. Сделаны выводы о возможности моделирования композитных материалов в среде программного комплекса ANSYS при проектировании реальных конструкций

Ключевые слова: ANSYS, углепластик, компьютерное моделирование, композитный материал, слоистый, контакт, древесина, расчетная модель, конечный элемент

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL MODELING OF RIGID JOINT OF LAYERED WOODEN STRUCTURES

Mikhail A. Vodiannikov, Galina G. Kashevarova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, RUSSIA

Abstract: The article deals with the problems of modeling and solving contact problems in the ANSYS software complex using the example of calculating the rigid joint of a glued wooden beam. Comparative calculation data for a continuous beam and a beam with a joint in the middle on pasted carbon fiber nails are given. The possibilities of using contact elements between different materials taking into account the nonlinearity of the formulation of the problem are described. The figures of stresses and displacements in the elements are shown. Experiments for determination of the bearing capacity of the joint and determine the nature of structural failure are provided. Conclusions are made about the possibility of modeling composite materials in the environment of the software complex ANSYS in the real structures design

Keywords: ANSYS, carbon fiber, computer modeling, composite material, layer, contact, wood, computer model, finite element analysis

1. ВВЕДЕНИЕ

Проектирование и расчет жестких стыков клееных деревянных конструкций является первоочередной задачей при создании большепролетных архитектурных форм из древесины. Решение такой задачи позволяет решить проблему изготовления и унификации, а главное – транспортировки крупногабаритных элементов на большие расстояния. Проблема равнопрочных стыков существует

также у железобетонных и стальных конструкций. Но для конструкций из цельной и клееной древесины она представляется наиболее сложной.

Одним из рациональных путей решения этой проблемы может служить использование методов математического моделирования с использованием ЭВМ и программных комплексов, учитывающих нелинейность при расчете контактных задач. Численное моделирование

позволяет внедрять инновационные материалы и конструктивные схемы, способы и методики расчета, а также снижать стоимость и сроки проектирования сложных конструкций. В статье выполнена расчетная оценка деформативности слоистой клееной деревянной балки и узла стыка на клеенных наклонных нагелях, выполненных из композитного материала - углепластика. Определен характер разрушения конструкции с учетом пластических деформаций с помощью численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций в программном комплексе ANSYS [1]. Данные полученные в результате численного моделирования подтверждены результатами натурного эксперимента.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Тело балки – клееная древесина второго сорта, клеиваемые нагели – углепластиковые стержни диаметром 5 мм, полученные

методом пултрузии; накладки по верху и низу балки – четырехнаправленный углепластик на матрице синтетического полимерного связующего.

Для анализа НДС создана конечно-элементная модель клееной деревянной конструкции (КДК) балки со стыком. Модель запроектирована и построена в программном комплексе AUTODESK AutoCAD® (рисунок 1) и экспортирована в программный комплекс ANSYS. На рисунке 2 показана конечно-элементная модель конструкции. Расчет проводился для изгибаемой балки (расчетная схема и граничные условия приведены на рис. 1) по двум вариантам:

- неразрезная (цельная) балка из клееной древесины (без стыка и накладок);
- балка со стыком на клеенных нагелях.

Расчетные модели дискретизированы конечными элементами (КЭ): SOLID185 (рисунок 3а), углепластиковые накладки SHELL281 (рисунок 3б), клеиваемые нагели BEAM188 (рисунок 3в) [2-4].

Рисунок 1. CAD-Модель балки со стыком на клеенных нагелях

Рисунок 2. Конечно-элементная модель балки со стыком на клеенных нагелях

Рисунок 3а. Геометрия КЭ твердого тела
SOLID 185.

Рисунок 3б. Геометрия КЭ пластины
SHELL 281.

Рисунок 3в. Геометрия КЭ стержневого эле-
мента BEAM 188.

Элемент SOLID185 используется для 3D моделирования твердых тел. Он определяется восемью узлами, имеющими три степени свободы каждый. Конечный элемент SOLID185 может обладать пластичностью, ползучестью и другими характеристиками. Конечный элемент SHELL281 применяется при анализе пластин с заданными пользователем характе-

ристиками. У элемента также восемь определяющих узлов с шестью степенями свободы каждого. Этот элемент может быть использован для моделирования слоистых конструкций (в т.ч. композитов). Линейный конечный элемент BEAM188 используется для 3D моделирования стержней с заданными характеристиками. Элемент имеет шесть степеней свободы в каждом узле.

При моделировании клеевого соединения в плоскостях соприкосновения «древесина-древесина» и «древесина-углепластик» в расчете учитывалась нелинейность, связанная с наличием сил трения по поверхностям контакта. Поэтому в модель введены специальные контактные конечные элементы. В таких задачах одна из поверхностей условно называется «контактной» поверхностью, а вторая – «целевой» поверхностью. Такие поверхности моделируются соответственно при помощи конечных элементов CONTA174 и TARGE170. Контактные и целевые конечные элементы, составляющие контактную пару, связаны между собой посредством общего набора характеристик.

Моделирование материалов осуществлялось посредством параметризации их физических свойств.

Древесина задана как ортотропный материал со следующими характеристиками:

- модуль упругости по оси x , $E_x = 1,1 \times 10^{10}$ (Па);
- модуль упругости по осям y и z , $E_y = E_z = 4,5 \times 10^8$ (Па);
- коэффициенты Пуассона $\nu_{xy} = 0,45$, $\nu_{yz} = \nu_{xz} = 0,018$;
- модуль сдвига $G_x = G_y = G_z = 6 \times 10^8$ (Па);
- критерий перехода древесины в пластическое состояние (Bilinear Kinematic) принят по временному сопротивлению изгибу 37,5 МПа (в соответствии с таблицей В.2 приложения В) [1].

Структура углепластиковых пластин как композитов полностью обуславливает их механические характеристики. Пластины заданы как трансверсально-изотропные материалы с

направлением слоев 0, 90, ± 45 градусов со следующими характеристиками [5]:

- предел прочности при разрыве $\sigma_b = 7,6 \times 10^5$ (Па);
- модуль упругости по осям x и y, $E_x = E_y = 87,2 \times 10^9$ (Па);
- модуль упругости по оси z, $E_z = 65,4 \times 10^9$ (Па);
- коэффициенты Пуассона $\nu_{xy} = \nu_{yx} = 0,268 = \nu_{xz} = 0,018$.

Для однонаправленных стержневых элементов установлены следующие величины [5]:

- предел прочности при разрыве $\sigma_b = 2,24 \times 10^6$ (Па);
- модуль упругости $E = 117 \times 10^9$ (Па);
- коэффициент Пуассона $\nu_{xy} = \nu_{yx} = 0,31$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Расчет в нелинейной постановке [6-10] производился пошаговым приложением нагрузки с шагом в 1 кН. По окончании расчета получены следующие результаты.

Разрушение образца в обоих случаях происходит в результате образования пластического шарнира в теле балки под опорной пяткой заделки в зоне максимального изгибающего момента.

Для образца из цельной древесины (рисунок 4а) пластические деформации возникают при нагрузке 3,4 кН, разрушение – при 10,0 кН.

Пластические деформации для образца с жестким стыком (рисунок 4б) возникают при нагрузке 3,6 кН, разрушение – при 11,6 кН.

В неразрезном образце из клееной древесины касательные напряжения в момент разрушения достигают 5,34 МПа (рисунок 5а), перемещения изгибаемого конца составляют 22,7 см (рисунок 6а).

В момент разрушения касательные напряжения контакта в клеевом соединении для образца с жестким стыком составляют 7,48 МПа (рисунок 5б). Максимальные перемещения изгибаемого конца балки равны при этом 27,7 см (рисунок 6б).

Максимальные усилия во вклеиваемых стержнях и накладках, образующих жесткий стык, составили 697 МПа. Изополя распределения напряжений приведены на рисунке 7.

Следует отметить, что картина распределения деформации и усилий в образцах из неразрезной балки имеет более равномерный характер, в то время как у балки с жестким стыком на вклеенных нагелях наблюдается более хаотичное распределение усилий и перемещений.

Рисунок 4. Разрушение образца с образованием пластического шарнира (деформированная схема): а) без стыка, б) со стыком.

Рисунок 5. Распределение касательных напряжений в зонах контакта: а) без стыка, б) со стыком.

Рисунок 6. Изополю суммарных перемещений в балке: а) без стыка, б) со стыком.

Несущая способность образца с жестким стыком выше в связи с тем, что клеенные нагели образуют элемент усиления конструкции, препятствующий взаимному сме-

щению слоев древесины, и тем самым, снижающий послойную деформируемость модели. Усилия же, возникающие в накладках, стержнях и клеевых соединениях стыка, не превышают критических значений.

Рисунок 7. Изополя распределения напряжений в накладках и стержнях

4. НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Схема испытаний образцов соответствует расчетной схеме, приведенной на рис. 1. Испытания проводились до разрушения образца пошагово возрастающей нагрузкой на специально запроектированном стенде. Давление на свободный конец балки передавалось посредством гидравлического универсального домкрата ДУ50П250. Значение нагрузки снималось с электронного манометра, соединенного с масляной станцией посредством шлангов высокого давления. Значение разрушающей нагрузки принималось в момент, при котором наблюдался рост перемещений при падении давления на башмаке домкрата. Для замера перемещений применялись измерители часового типа ИЧ-10 и ИЧ-50, влажность образцов определялась влагомером МГ-4 и составила 8,4 %. Температурно-влажностный режим внутри помещения определен при помощи термогигрометра МГ-4В, температура внутри помещения 24,7⁰С, влажность 23,6 %. При испытании неразрезной балки в качестве контролируемых параметров приняты:

- перемещение свободного конца балки;
- усилие на манометре домкрата.

При испытании стыка на углепластиковых деталях разрезной балки в качестве контролируемых параметров также оценивалась ширина раскрытия зазора стыка с обеих сторон балки.

Стык смонтирован с применением синтетического клея на эпоксидном связующем. Накладки изготовлены из пластин двунаправленного углепластика толщиной 5 мм, стержни – из углепластиковой арматуры диаметра 5 мм производства ООО «НЦК», г. Москва.

Испытательный стенд, измерительное оборудование и балка со стыком с применением углепластиковых деталей приведены на рисунке 8.

Рисунок 8. Стенд и образец для испытания стыка балки.

При испытании неразрезной балки фактическая разрушающая нагрузка составила 12,3 кН, перемещение свободного конца - 22,17 см. Характер разрушения соответствует данным численной оценки работы балки, и вызван образованием пластического шарнира под подвижной опорой в середине пролета. Кроме того зафиксировано обмятие балки под неподвижной опорой, а также образование трещин шириной раскрытия до 3 мм в теле древесины в опорных частях балки и по растянутой (нижней) кромке. Разрушений, связанных с взаимным смещением слоев древесины, а также с нарушением целостности клеевых швов в ходе испытаний не зафиксировано.

При испытании стыка разрезной балки характер разрушений также соответствует расчетным значениям. Разрушающая нагрузка установлена на уровне 13,2 кН, перемещение свободного конца составило при этом 23,52 см. Сжатая (верхняя) кромка балки в месте стыка вплотную приблизилась к противоположной части балки. Максимальная ширина раскрытия нижней кромки в месте стыка отмечена при значении индикатора равном 3,7 мм, величина технологического зазора до начала испытаний 1 мм.

Разрушение разрезной балки произошло в результате образования пластического шарнира под подвижной опорой в середине пролета, аналогично образцу из цельной древесины. Кроме того, в момент разрушения отмечено образование трещин шириной раскрытия до 5 мм в теле древесины в нейтральной зоне стыка, что свидетельствует о возникновении касательных напряжений, связанных с механическим воздействием армирования на слой древесины. В опорных частях видны трещины шириной раскрытия до 3 мм, по растянутой кромке трещин не выявлено (в связи с включением накладок в совместную работу). Некоторое различие в расчетных и фактических усилиях и перемещениях связано с пороками древесины, а также использованием в

качестве прочностных характеристик унифицированных расчетных величин σ_b , установленных [1].

Следует отметить, что в обоих случаях после снятия нагрузки балки вернулись в исходное состояние.

ВЫВОДЫ

Моделирование слоистых композитных материалов, таких как древесина и углепластик в среде ANSYS, позволяет с высокой точностью оценивать напряженно-деформированное состояние сложных конструкций и узлов их стыка в условиях, близких к реальности [11, 12]. При задании контактных взаимодействий программа учитывает такие факторы, как наличие либо отсутствие контакта и сил трения, что делает задачу нелинейной.

Экспериментальная оценка данных, полученных путем численного анализа, подтверждает правильность принятых решений. Теоретические и фактические значения коррелируют между собой, разброс значений вызван несовершенством (пороками) структуры древесины, а также применением унифицированных характеристик примененных материалов. Оценка итоговых величин усилий и перемещений в элементах конструкции показывают адекватность выбранной расчетной модели и возможность её применения для расчета реальных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СП 16.13330.2011.** Актуализированная редакция СНиП II-23-81* «Стальные конструкции». – М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2011. – 173 с.
2. **Басов К.А.** ANSYS в примерах и задачах. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.
3. **Басов К.А.** Графический интерфейс комплекса ANSYS. – М.: КомпьютерПресс, 2006. – 248 с.

4. **Басов К.А.** ANSYS. Справочник пользователя. – М.: КомпьютерПресс, 2005. – 640 с.
5. **Скворцов Ю.В.** Моделирование композитных элементов конструкций и анализ их разрушения в CAE-системах. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т. им. С.П. Королева. – Электрон. – 2012 (CD-ROM).
6. **Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А.** Инженерный анализ в ANSYS WORKBENCH. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
7. **Лукьянова А.Н.** Моделирование контактной задачи с помощью программы ANSYS. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 52 с.
8. **Морозов Е.М.** ANSYS в руках инженера. – М.: ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
9. **Огордникова О.М.** Введение в компьютерный конструкционный анализ. – Екатеринбург: Уральск. гос. техн. ун-т, 2001. – 49 с.
10. **Шкловец А.О.** Конструкционный анализ методом конечных элементов в CAE-пакете Ansys Mechanical. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2012. – 53 с.
11. **Alawadhi E.M.** Finite Element Simulations Using ANSYS. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010, 408 p.
12. **Huei-Huang Lee.** Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 16. SDC Publ., 2015, 264 p.
3. **Basov K.A.** Graficheskij interfejs kompleksa ANSYS [Graphical Interface of ANSYS]. Moscow, Komp'juter-Press, 2006, 248 p.
4. **Basov K.A.** ANSYS. Spravochnik pol'zovatelja [ANSYS. User's Reference]. Moscow, Komp'juterPress, 2005, 640 p.
5. **Skvorcov Ju.V.** Modelirovanie kompozitnyh jelementov konstrukcij i analiz ih razrushenija v CAE-sistemah [Modelling of Composite Structural Members and Fracture Analysis in CAE Software Systems]. Samara, Samarskij gosudarstvennyj ajerokosmicheskij universitet im. S.P. Koroleva, Jelektron, 2012 (CD-ROM).
6. **Brujaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A.** Inzhenernyj analiz v ANSYS WORKBENCH [Engineering Analysis in ANSYS WORKBENCH]. Samara, Samarskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2010, 271 p.
7. **Luk'janova A.N.** Modelirovanie kontaktnoj zadachi s pomoshh'ju programmy ANSYS [Modelling of Contact Problems with the Use of ANSYS]. Samara, Samarskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2010, 52 p.
8. **Morozov E.M.** ANSYS v rukah inzhenera [ANSYS in the Hands of an Engineer]. Moscow, LENAND, 2010, 456 p.
9. **Ogordnikova O.M.** Vvedenie v komp'juternyj konstrukcionnyj analiz [Introduction to Computer Structural Analysis]. Ekaterinburg, Ural'skij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2001, 49 p.
10. **Shklovac A.O.** Konstrukcionnyj analiz metodom konechnyh jelementov v SAE-pakete Ansys Mechanical [Structural Analysis with the Use of Finite Element Method in ANSYS Mechanical]. Samara, Samarskij gosudarstvennyj ajerokosmicheskij universitet, 2012, 53 p.
11. **Alawadhi E.M.** Finite Element Simulations Using ANSYS. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010, 408 p.

REFERENCES

1. **SP 16.13330.2011.** Aktualizirovannaja redakcija SNiP II-23-81* "Stal'nye konstrukcii" [Steel Structures]. Moscow, TSNIISK im. V.A. Kucherenko, 2011, 173 p.
2. **Basov K.A.** ANSYS v primerah i zadachah [ANSYS in Samples and Problems]. Moscow, Komp'juterPress, 2002, 224 p.

12. **Huei-Huang Lee.** Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 16. SDC Publ., 2015, 264 p.

Водяников Михаил Алексеевич, аспирант кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет; 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29; тел. +7 (342) 2-198-361; e-mail: vodyannikov@mail.ru.

Кашеварова, Галина Геннадьевна, член-корреспондент РААСН, профессор, доктор технических наук, заведующая кафедрой «Строительные конструкции и вычислительная механика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет; 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29; тел. +7 (342) 2-198-361; e-mail: ggkash@mail.ru

Mikhail A. Vodiannikov, Ph.D. Student, Department of Building Constructions and Computational Mechanics, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospect, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: vodyannikov@mail.ru.

Galina G. Kashevarova, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Dr.Sc., Head of Department of Building Constructions and Computational Mechanics, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospect, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: e-mail: ggkash@mail.ru.