

УДК 621.8076.50

А. М. Лось, ассистент (БГТУ)

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗАКЛЕПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН

В статье приведены классификация, достоинства, доказана целесообразность применения заклепочных соединений при проектировании и изготовлении лесной техники. Показана возможность применения средств конечно-элементного моделирования для конструирования и анализа напряженно-деформированного состояния заклепочных соединений, применяемых в лесном машиностроении. Рассмотрена компьютерная модель заклепочного соединения и проведены его исследования на прочность.

For manufacture forestry machine elements knots using riveted joints. Such joints can work in hard vibratory operating conditions as well as for bundling various details, which made from heterogeneous materials and welding in that case impossible. The researches results of static and dynamic riveted joint durability, which presented in article, was find by finite element analysis method. This method is possible to researches mode of deformation joined details and selection they optimum geometry. At the same time every concerned detail have permissible minimum margin of safety and full functionality.

Введение. Проектирование лесных машин и конструкций связано с выполнением значительного ряда расчетов и экспериментальных исследований опытных образцов, на которые затрачивается значительное количество времени. Основным назначением исследований, выполняемых с использованием систем конечно-элементного анализа, является получение оптимальных геометрических параметров проектируемых соединений при сохранении ими полного функционального назначения, низких материальных затратах на проектирование и изготовление, высокой надежности и небольших затратах времени на прочностные и другие расчеты.

Условия работы лесовозного транспорта и технологического оборудования имеют свои особенности и отличаются значительными вибрационными нагрузками, изменяющимися как по времени, так и по величине. Связано это с тем, что большую часть времени лесные машины работают на лесосеке, где имеется значительное количество пней, валежника и других неровностей, приводящих при их переезде к резкому увеличению нагрузок на детали и соединения в несколько раз. Для соединений деталей лесных машин, работающих именно в таких условиях, наиболее актуальным является применение заклепочных соединений, поскольку серьезными недостатками сварных и резьбовых соединений является их недостаточная надежность при работе в условиях значительных динамических нагрузок. Кроме того, заклепочные швы используют в соединениях деталей из легких металлических сплавов, а также при изготовлении конструкций из трудносвариваемых и разнородных материалов.

Метод конечных элементов как наиболее эффективный способ решения задач механики сплошной среды. Наиболее трудоемки-

ми расчетами при проектировании различных соединений деталей машин являются исследования их статической и динамической прочности. Наиболее мощным численным методом решения многих инженерных задач в настоящее время является метод конечных элементов, широко представленный в таких интегрированных системах, как NASTRAN, ANSYS, MARC, COSMOS и др. Программы такого типа предлагают широкий спектр возможностей конечно-элементного анализа, включая и комплексные нелинейные анализы переходных процессов.

Метод конечных элементов является самым эффективным численным методом решения широкого круга задач механики сплошной среды. Он реализуется на замене исследуемого твердотельного объекта совокупностью конечного числа дискретных элементов, связанных между собой в узлах. В этом случае схема создания математической модели следующая: исследуемый объект – идеализированный расчетная схема – система линейных алгебраических уравнений. Непосредственный переход к расчетной схеме дает возможность формулировать граничные условия, произвольно располагать узлы сетки элементов, сгущая ее в местах ожидаемого большого градиента искомых величин, применять метод для исследования областей, состоящих из фрагментов различной физической природы и т. д.

Данный метод с математической точки зрения тождественен методу Ритца [1] и обеспечивает непрерывность перемещений при использовании вариационных принципов построения матрицы жесткости, что позволяет связывать между собой усилия и перемещения узлов элементов. Тем не менее основное отличие метода конечных элементов состоит в кусочно-непрерывном определении полей, которое с достаточной простотой

позволяет рассматривать нерегулярные границы тела. Уравнения равновесия в таком случае образуют ленточную матрицу, для которой они легко решаются прямыми или итерационными методами. Это позволило реализовать такой метод в компьютерных пакетах программ, что привело к значительному снижению времени для получения многообразия решений, из которых несложно по определенным критериям выбрать наиболее оптимальный.

Понятие конечных элементов было впервые введено М. Тернером, Р. Клафом, Х. Мартином и Л. Топпом в 1956 г [2]. Это произошло вскоре после появления первых вычислительных машин, поскольку решение практических задач с помощью метода конечных элементов может быть осуществимо только при использовании быстродействующих машин.

Некоторые идеи метода, связанные со сведением континуальных систем к одномерным стержневым, известны давно, начало истории его относят к середине 50-х годов. Дальнейшее развитие метода конечных элементов отражено в работах зарубежных исследователей Дж. Аргириса, Е. Л. Вильсона, М. Р. Айронса, Р. У. Клафа и др. Значительный вклад в теорию метода конечных элементов внесли также А. В. Александров, В. А. Постнов, Л. А. Розин, А. М. Масленников, И. Я. Хархурим и др.

Типичная задача, решаемая в любой интегрированной системе прочностного анализа методом конечных элементов, выполняется по трем основным этапам: 1) построение геометрической модели соединения деталей и узлов; 2) установление нагрузок, механических характеристик материала изготовления деталей, граничных условий, а также получение решения; 3) обзор полученных результатов.

При построении модели выполняется моделирование функциональной схемы проектируемой конструкции заклепочного соединения и устанавливаются показатели надежности; вычерчивается плоская или трехмерная геометрическая модель значимых элементов (в зависимости от решаемой задачи) и устанавливаются их динамические и кинематические связи. После задания свойств материалов создается конечно-элементная модель, которая сможет наиболее адекватно описать геометрическую модель.

Важным шагом, значительно влияющим на эффективность расчета, является выбор типа применяемых конечных элементов. Наиболее простыми, при решении двумерной задачи, являются конечные элементы в виде треугольников с узлами, расположенными в вершинах. Эти элементы использовались в числе первых. Впоследствии было замечено, что при увеличении числа степеней свободы, связанных с элементом,

уменьшается общее число степеней свободы системы, необходимое для достижения заданной точности. При использовании более сложных элементов возрастает время вычисления матриц жесткости элементов и увеличивается ширина ленты матрицы системы уравнений равновесия, что ведет к росту времени счета.

На исследование сложных пространственных конечно-элементных моделей затрачивается значительное количество времени, при этом большая его часть тратится на создание конечно-элементной сетки. Все современные системы конечно-элементного анализа предусматривают автоматическую генерацию конечно-элементной сетки по твердотельной модели. Есть два основных метода создания конечно-элементной модели: путем сплошного моделирования и прямой генерации. Сплошное моделирование описывает геометрический вид модели, а программа в автоматическом режиме заполняет геометрическую модель узлами и элементами. При данном виде моделирования проектировщиком может контролироваться размер и форма создаваемых программой элементов. При прямой генерации «вручную» определяется расположение каждого узла, связь каждого элемента, доступно копирование существующих узлов и элементов, симметричное отражение и т. д. Наиболее полно во всех конечно-элементных системах автоматизирован процесс создания конечно-элементной сетки, состоящей из 4-узловых тетраэдров.

По созданной конечно-элементной сетке проводятся необходимые расчеты. В зависимости от условий нагружения и вычисляемых параметров выбирается тип анализа и задаются нагрузки. Современные программы предлагают статический, нестационарный, гармонический, модальный и спектральный анализы. Нагрузки, используемые в системах конечно-элементного анализа можно разбить на шесть категорий: ограничивающие условия (степень свободы), силы, поверхностные и объемные нагрузки, инерционные и сопряженные нагрузки.

После этого устанавливаются опции шага нагружения (количество шагов приращения, время окончания шага нагружения и выходные параметры) от одного шага нагружения к другому. От выполняемого типа анализа зависит решение – задавать опции шага нагружения или нет. Далее запускается программа решения.

После получения решения используются постпроцессоры для обзора результатов. Предусмотрена также возможность построения графиков зависимости расчетных данных от времени (или частоты), а также результаты расчета в табличном виде и другие возможности.

При необходимости внесения изменений в конструкцию для обеспечения требуемых

параметров прочности, жесткости, виброустойчивости и т. д. выполняется корректировка модели, после чего она повторно передается на расчет.

Применение заклепочных соединений при проектировании лесных машин. Заклепочное соединение является неразъемным. В большинстве случаев его применяют для соединения листов и фасонных прокатных профилей. Соединение образуется расклепыванием стержня заклепки, вставляемой в отверстие деталей.

Достоинства заклепочных соединений: высокая надежность соединения, удобство и надежность контроля качества шва, хорошая сопротивляемость вибрационным и ударным нагрузкам. Недостатки: большой расход материала, высокая стоимость изготовления, шум при клепке.

Заклепочные соединения выполняются при помощи заклепочных швов, которые в зависимости от предъявляемых требований делятся на три группы:

- прочные швы, предназначенные для получения соединений достаточной прочности и воспринимающие внешние нагрузки;
- плотные швы, предназначенные для получения соединений достаточной плотности, устраняющие возможность утечки жидкости, газа;
- прочноплотные швы, обеспечивающие в соединении достаточную прочность и плотность.

По конструкции заклепочные швы бывают: нахлесточные, стыковые с накладкой, стыковые с двумя накладками.

По количеству сечений заклепок, работающих на срез, заклепочные швы бывают односрезные и многосрезные. Тип заклепочного шва для каждой отдельной конструкции определяется ее назначением и расчетом шва на прочность.

Заклепки изготавливают из алюминиевых сплавов, сталей, латуни, титана. Стальные заклепки обычно изготавливают из углеродистых сталей Ст2, Ст3 и др., а в специальных конструкциях – из легированной стали. Во избежание химической коррозии заклепки ставят из того же материала, что и соединяемые детали. В пакетах с сочетанием листов из легких сплавов, а также в пакетах, имеющих детали из легких сплавов и сталей, применяют заклепки из алюминиевых сплавов.

В пакетах с сочетанием деталей из неметаллических материалов применяют заклепки из легкодеформируемых материалов АД1, АМц, АМг5. В случае применения для клепки деталей из стеклотекстолитовых материалов заклепок из Д19П или стали 15 для уменьшения деформации материала в зоне отверстий под замыкающие головки устанавливают шайбы из Д19-Т или стали 45. В пакетах, имеющих детали из титановых сплавов, нержавеющей и жаропрочных сталей, применяют заклепки из ста-

лей 20Г2, Х18Н9Т, 15 и 10. Для того чтобы по внешнему виду различать марку материала, из которого изготовлена заклепка, на головках заклепок ставят условные знаки в виде выпуклых или углубленных точек, крестиков и т. д.

Конечно-элементный анализ нагруженности заклепочного соединения. Исследования статической и динамической нагруженности выполнялись нами на примере двухсрезного предварительно напряженного заклепочного соединения, моделирующего соединение фрикционных накладок к тормозным колодкам лесных машин. Модель заклепочного соединения до приложения растягивающих напряжений в заклепке представлена на рис. 1, модель соединения с напряженной заклепкой – на рис. 2.

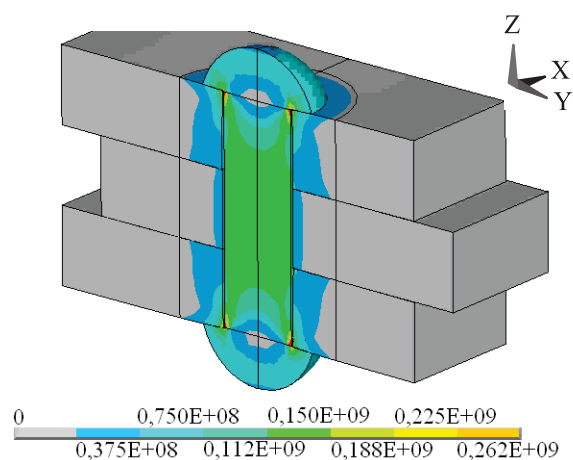


Рис. 1. Заклепочное соединение до момента возникновения напряжений в заклепке

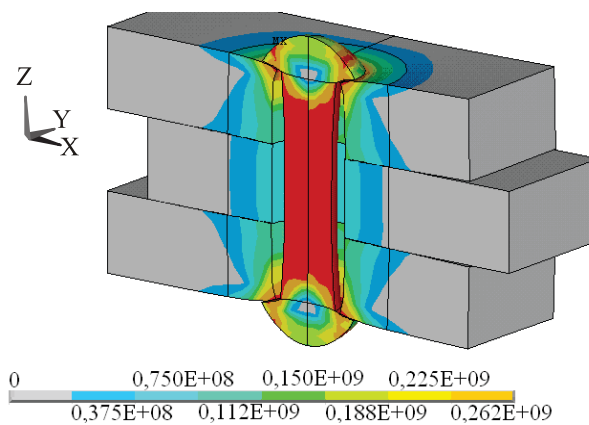


Рис. 2. Заклепочное соединение с напряженной заклепкой

На рис. 3 показаны эквивалентные напряжения в напряженном заклепочном соединении при приложении к пластинам продольной нагрузки 85 кН.

Заклепка в данном соединении имеет диаметр 10 мм. Максимальные напряжения здесь достигают $\sigma_{\max} = 340 \text{ Н/мм}^2$. Напряжения в пластинах здесь невелики и достигают значений 37,5–75 Н/мм^2 .

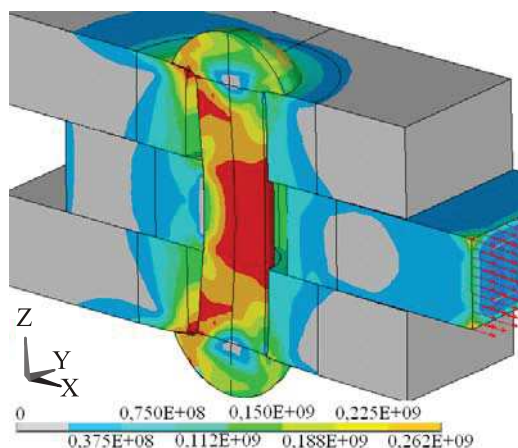


Рис. 3. Эквивалентные напряжения в заклепочном соединении при приложении к пластинам продольной силы 85 кН

Продольные растягивающие (сжимающие) напряжения в исследуемом соединении при приложении к пластинам нагрузки, достигающей через 1,725 с значения 100 кН, отражены на эшпоре, представленной на рис. 4.

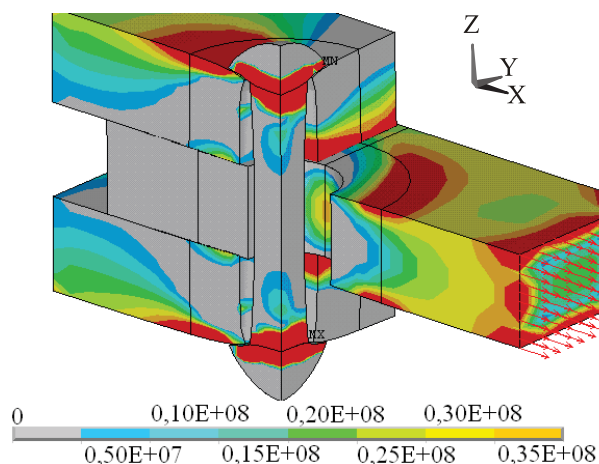


Рис. 4. Продольные растягивающие напряжения в заклепочном соединении при приложении к пластинам продольной силы 100 кН

На рис. 5 показаны растягивающие напряжения в заклепочном соединении при приложении динамически изменяющейся нагрузки к пластинам с максимальным значением 115 кН. Наибольшие напряжения здесь достигают $\sigma_{\max} = 581 \text{ Н/мм}^2$. Максимальный прогиб тела заклепки достигает величины 277 мкм.

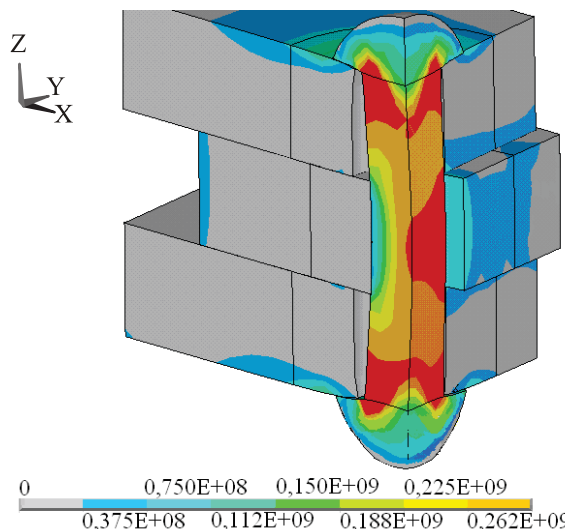


Рис. 5. Растягивающие напряжения в заклепочном соединении при приложении к пластинам продольной силы 115 кН

Заключение. Результаты проведенных исследований показывают, что напряжения в соединении достаточно высоки, поэтому следует увеличить диаметр заклепок или использовать для их изготовления высокопрочные материалы.

Применение метода конечных элементов позволяет проводить исследования нагруженности элементов заклепочных соединений при воздействии на них статических и динамических нагрузок, температуры, давления и т. п. Правильно заданные свойства материала изготовления и условия нагружения гарантируют высокую точность расчетов и сходимость их с натурными исследованиями. Применение средств конечно-элементного анализа в совокупности с высокопроизводительной компьютерной техникой позволяет значительно снизить сроки проектирования.

Литература

1. Метод конечных элементов в статике сооружений / Я. Шмельтер [и др.]; пер. с пол. М. В. Предтеченского; под ред. В. Н. Сидорова. – М.: Стройиздат, 1986. – 220 с.
2. Морозов, Е. М. Метод конечных элементов в механике разрушения / Е. М. Морозов, Г. П. Никишков. – М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1980. – 256 с.

Поступила 01.04.2010