

РАСЧЁТЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВ ВНАХЛЁСТ

В.И. Шабуневич
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Приведены результаты конечно-элементного расчёта модели образца заклёпочного соединения внахлест листов из металла при линейном статическом и гармоническом нагружении. Расчёт проведён с помощью комплекса PATRAN-NASTRAN. Сделано сравнение результатов статического расчёта с результатами экспериментальных измерений.

Ключевые слова: конечные элементы, образец соединения листов внахлест, собственные частоты, гармонический анализ.

Соединение листов внахлест широко применяется, например, в авиастроении для соединения листов обшивки фюзеляжей самолётов, при создании спутников для соединения элементов каркаса их рам и т. д. До появления современных расчётных комплексов (ANSYS, PATRAN-NASTRAN и др.) расчёт таких соединений листов представлял значительную трудность.

В ряде случаев напряжённое состояние пластины удавалось разбить на два слагаемых – безмоментное и, так называемый, краевой эффект [1]. Краевой эффект представляет собой смешанное (изгибное и безмоментное) напряжённое состояние, локализованное в небольшой области, примыкающей к той или иной линии в срединной поверхности пластины. Этой линией может быть край пластины (отсюда и появление термина); линия, на которой скачком изменяется радиус кривизны пластины или её толщина; линия присоединения подкрепляющего ребра; линия, совпадающая с местом изменения характера нагрузки, и т. п. Во всех указанных случаях быстрое затухание напряжений смешанного типа в направлении, ортогональном линии искажения, является отличительной особенностью тонких пластин. Быстрое затухание изгибных напряжений происходит и при удалении в любом направлении от точки приложения сосредоточенной силы или от малой площадки срединной поверхности, на которую действует распределённая нагрузка.

В работе [2] представлены результаты, полученные с помощью разработанной автором в ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского экспериментально-теоретической методики определения локального напряжённо-деформированного состояния (НДС) тонкостенных элементов конструкций. В качестве основного экспериментального метода при определении изгибных составляющих напряжений использовался метод голографической интерферометрии. Ранее для определения указанных напряжений применялся метод двухсторонней тензометрии. На участке нахлеста листов для

обеспечения двухсторонней наклейки тензорезисторов в образце приходилось делать продольные прорезы (рис. 1), что совершенно неприемлемо для натурных конструкций, например, самолётов. Голографическая интерферометрия позволила получать изгибные составляющие напряжений путём обработки интерферограмм нормальной компоненты перемещения одной поверхности соединяемых листов (рис. 2) без выполнения продольных прорезей. При этом величина получаемых (в центрах гиперболических фигур интерференционных полос) изгибных напряжений у первого по нагрузке ряда заклёпок в касательном к ним сечении (где обычно проходят усталостные трещины) для образцов соединений внахлест соизмерима с величиной номинальных растягивающих напряжений в листах образцов.

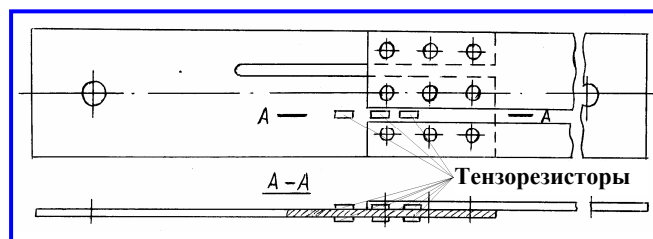


Рис. 1. Схема образца соединения листов внахлест с продольными прорезями для тензорезисторов

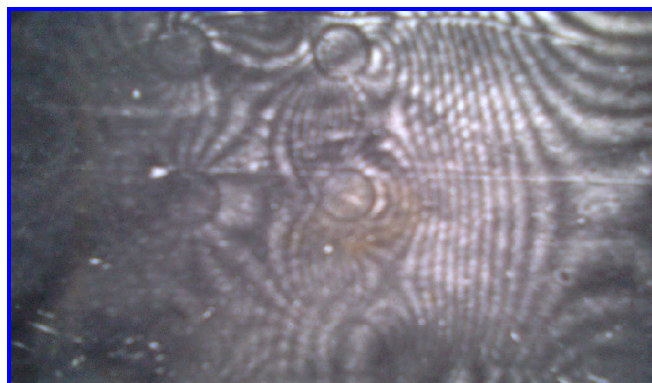


Рис. 2. Интерферограмма нормальной компоненты перемещения одной поверхности образца

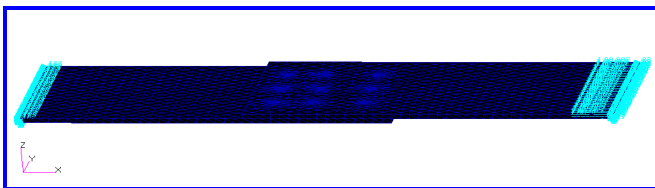


Рис. 3. КЭ модель образца

В данной работе приведены результаты статического, модального и гармонического анализов конечно-элементной (КЭ) модели образца соединения металлических листов внахлест с помощью заклёпок (диаметром 5 мм). Листы образца представляли собой пластины из алюминиевого сплава длиной 200 мм, шириной 80 мм и толщиной 3 мм. Расчёты пара-

метров НДС КЭ моделей образцов проводились с помощью применяемого в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» комплекса PATRAN-NASTRAN [3, 4]. Листы и заклёпки моделировались с помощью конечных элементов Tet10 типа Solid. Модуль упругости в расчёте принят равным $0,7 \cdot 10^{11}$ н/м², плотность материала вала и диска – 2800 кг/м³.

КЭ модель включает 21 419 элементов и 38 902 узла. Вид КЭ модели представлен на рис. 3.

На рис. 4 показаны результаты модального анализа модели образца – первые собственные частоты и формы колебаний.

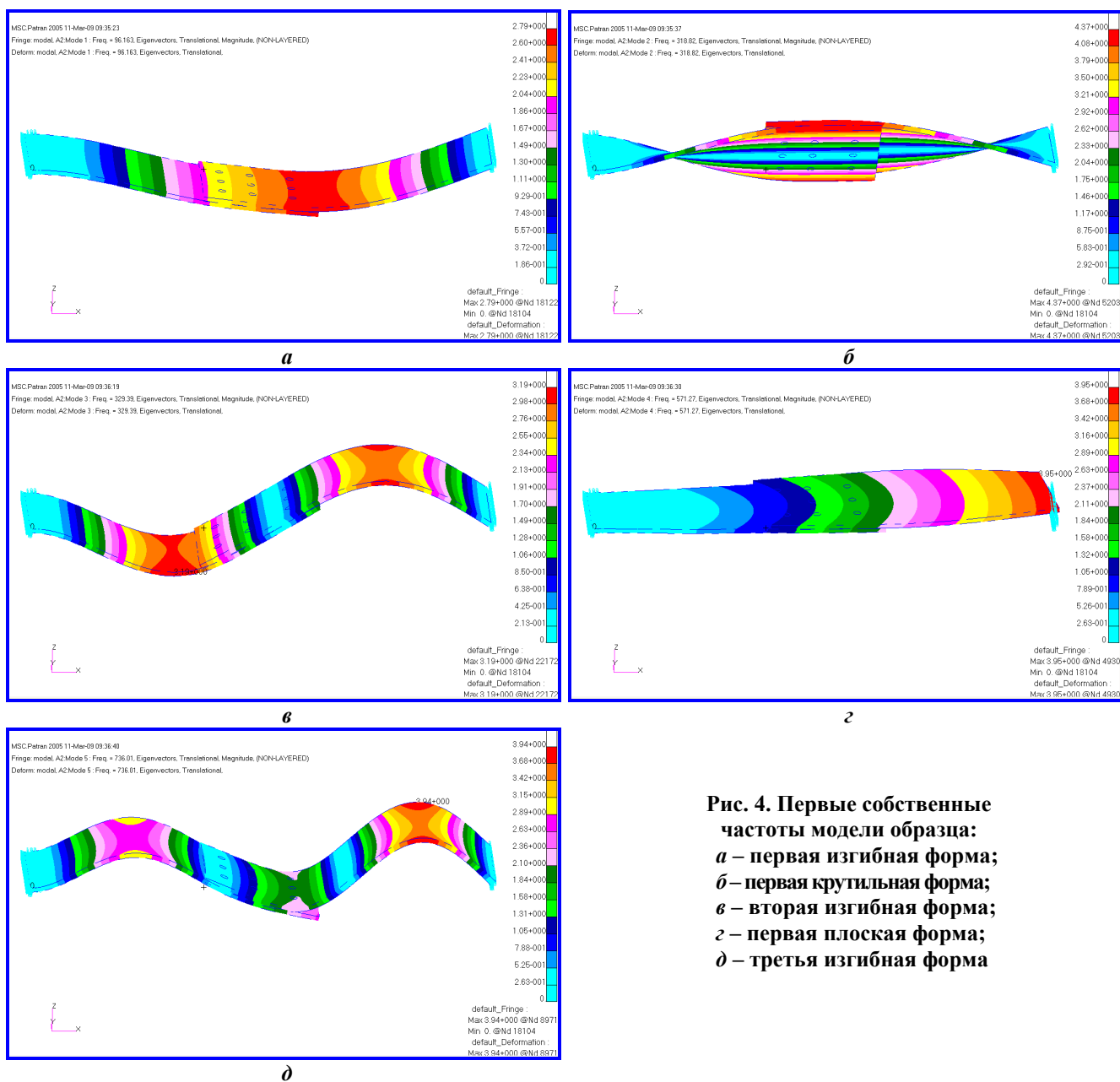


Рис. 4. Первые собственные частоты модели образца:
а – первая изгибная форма;
б – первая крутильная форма;
в – вторая изгибная форма;
г – первая плоская форма;
д – третья изгибная форма

На рис. 5 приведены результаты линейного упругого статического расчёта модели образца в виде распределения эквивалентных напряжений по критерию Мизеса. В качестве нагружения один край модели смещался по оси X на 1 мм, при этом другой край модели был заделан. Напряжения отображены на деформированной форме модели.

На рис. 5 показана величина полученных напряжений Мизеса в местах, соответствующих центрам гипербол на интерферограммах (см. рис. 2). У первого по нагрузке ряда заклёпок посередине между ними для любого из соединяемых листов (435 МПа) она приблизительно в два раза превышает величину номинальных напряжений, действующих в листах на удалении от зоны их нахлёста (218 МПа). Таким образом, здесь так же, как и в экспериментах, величина изгибных напряжений у первого по нагрузке ряда заклёпок для образцов соединений внахлёт соизмерима с величиной номинальных растягивающих напряжений, действующих в листах на удалении от зоны их нахлёста.

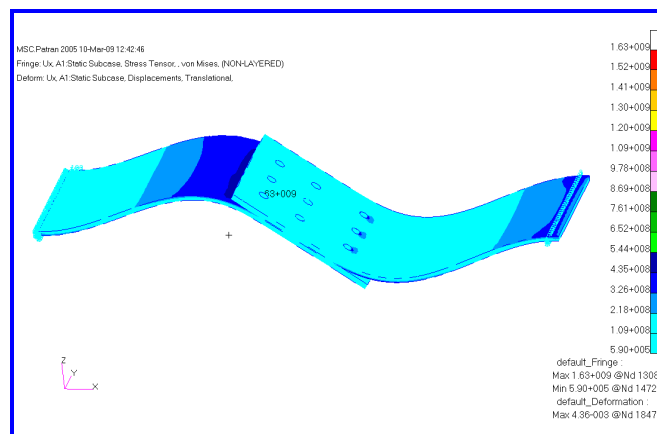
В гармоническом анализе в качестве нагрузки к свободному краю модели образца приложено гармоническое нагружение вдоль оси X с амплитудой 1 мм. На рис. 6 приведены результаты гармонического анализа модели образца в виде распределения по частоте напряжений Мизеса в узлах. Коэффициент демпфирования принят равным 2%. На втором резонансном пике напряжения Мизеса в указанной выше зоне достигают величины 1500 МПа, что значительно превышает предел прочности материала образца (540 МПа). На практике испытаний подобных образцов и эксплуатации натуральных конструкций самолётов у первого ряда заклёпок таких соединений часто развиваются усталостные трещины.

- В результате проведённых анализов:
- сформирована КЭ модель образца заклёпочного соединения внахлёт листов из металла;
 - выполнены расчёты собственных частот и форм колебаний модели образца. Первая изгибная частота модели составляет 96 Гц, первая частота колебаний в плоскости модели – 571 Гц; и можно сделать выводы:

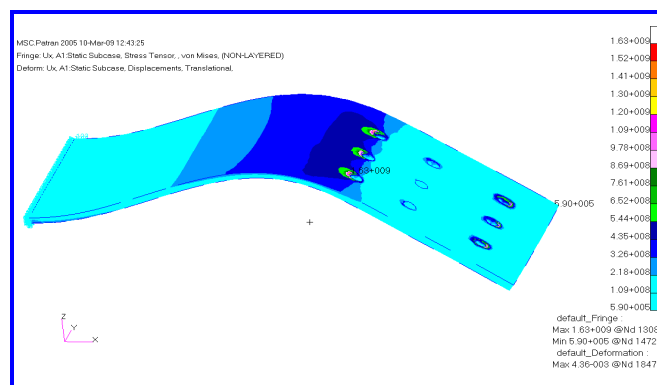
- что линейный упругий статический расчёт напряжённо-деформированного состояния модели подтверждает ранее получаемые из экспериментов (двухсторонней тензометрии, голографической интерферометрии) величины изгибных составляющих напряжений у первого ряда заклёпок для каждого из соединяемых листов. Их величина соизме-

рима с номинальными растягивающими напряжениями в листах;

- что в гармоническом анализе модели образца на втором резонансном пике величина напряжений Мизеса при демпфировании 2% составляет 1500 МПа, что превышает предел прочности (540 МПа) материала образца.



a



б

Рис. 5. Распределение напряжений Мизеса (Па) в модели образца: а – модель в целом; б – фрагмент с максимальными напряжениями

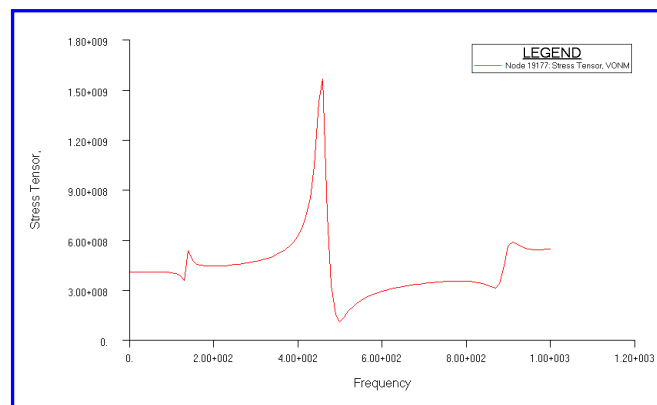


Рис. 6. Распределения по частоте напряжений Мизеса

Литература

1. Филин А. П. Элементы теории оболочек / А. П. Филин. – Л. : Стройиздат, 1987. – 384 с.
2. Shabunovich V. I. Local stress definition of structural elements using holographic interferometry / V. I. Shabunovich // Nondestr. Test. Eval. – 1995. – Vol. 12. – P. 211 – 218.
3. MSC. Nastran 2005 Quick Reference Guide // MSC. Software Corporation. – 2004. – 2159 p.
4. MSC. Patran 2005 Quick Reference Guide // MSC. Software Corporation. – 2004. – 1560 p.

Поступила в редакцию 22.03.2011

Виктор Иванович Шабуневич, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник,
т. (495) 366-33-66, e-mail: *Viktor-Shab@yandex.ru*.