АНАЛИЗ ОСТАТОЧНОГО КОРОБЛЕНИЯ МАЛОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Лившиц А.В., Сухов М.П.
Восточно-Сибирский институт МВД России, г.Иркутск

Лившиц А.В.
Сухов М.П.
Восточно-Сибирский институт МВД России

Реалии сегодняшнего дня ставят перед российской авиационной промышленностью ряд задач, являющихся крайне важными в условиях высокой конкурентной борьбы на мировой арене. Среди этих задач можно выделить: повышение надёжности летательных аппаратов, увеличение их срока эксплуатации, уменьшение временных и ресурсных затрат на изготовление отдельных деталей и сборку узлов и агрегатов, обеспечение быстрой окупаемости. Одним из путей решения поставленных задач является уменьшение количества сборных узлов путём применения монолитных несущих конструкций, позволяющих выдерживать высокие нагрузки и обеспечивающих максимальную жёсткость.

Указанное направление является еще более значимым, если принять во внимание, что в конструкции планера самолёта существует большая номенклатура маложёстких авиационных деталей характеризуемых незначительной толщиной полотна и рёбер с различным характером расположения последних. К подобного рода деталям предъявляются повышенные требования, а именно к точности их изготовления, качеству поверхностей.

Технология изготовления маложёстких деталей встречается с серьёзными затруднениями в связи с появлением общего остаточного коробления, а часто и локальной потери устойчивости, приводящих к браку. Самый простой способ решения этой проблемы - усложнение технологического процесса введением дополнительных операций правки, рихтовки. Но, в конечном итоге, это приводит к увеличению трудоёмкости изготовления детали, снижению её эксплуатационных свойств, повышению стоимости. Более того, часто таким образом избежать деформирования детали не удается.

На наш взгляд, гораздо более интересным и полезным с точки зрения улучшения качественных характеристик деталей авиационного назначения, является математическое прогнозирование и управление короблением маложёстких деталей еще на этапе проектирования технологического процесса.

Причинам появления коробления посвящено достаточно большое количество работ А.И. Биргера [1, 2], Н.В. Калакуцкого [3], А.И. Промптова [5, 6, 7], С.К. Каргапольцева [4]. В этих работах говорится, что при удалении слоя металла с заготовки, имеющей внутренние термические остаточные напряжения, нарушается равновесное состояние остаточных напряжений. В связи с этим происходит деформирование детали в результате полного восстановления равновесного напряжённого состояния. Проводимые исследования были направлены на прогнозирование и математическое моделирование процесса формирования локальных остаточных деформаций.

Анализируя существующие математические методы, нами был сделан вывод о наиболее целесообразном использовании численных методов прогнозирования. Наиболее перспективным видится метод конечных элементов (МКЭ) (например с использованием программного продукта MSC/NASTRAN).

Были сформированы ряд расчётных конечно-элементных моделей для проверки достоверности результатов численного моделирования и подтверждение сходимости с аналогичными результатами, полученными для простейших задач, имеющих точное аналитическое решение.

Исследовались реальные детали типа «прямоугольная пластина» и модели коробчатой формы из алюминиевого сплава В95Т1. При выборе рассматриваемой модели с оребрением принимались следующие допущения: одинаковая высота, а также толщина ребер; рёбра в одном направлении параллельны друг другу; пересекающиеся рёбра перпендикулярны; толщина рёбер и полотна одинакова.

Расчёт деформации детали производили по методике приведённой в [4].

Следуя методики формирования конечно-элементной модели в MSC/NASTRAN, необходимо было решить следующие задачи:

- определить влияние размера конечно-элементной сетки на расхождение

результатов расчёта;

- определить условие закрепления или граничные условия адекватные реальным, выявить зависимость места расположения граничного условия на расчётные данные;
- задать эквивалентную систему нагрузки соответствующую действующим напряжениям.

Отвечая на первый поставленный вопрос можно отметить, что в случае громоздкости или конструктивной сложности исследуемой модели расчёт может затруднится из-за ограниченных вычислительных возможностей компьютера. В общем случае, стоит задача определения оптимального размера сетки, с одной стороны обеспечивающего достаточную точность результата, с другой минимизацию времени расчета. По результатам расчета определено, что размер элемента не должен превышать толщины подкрепленной пластины.

Решая вторую задачу, рассматривая возможные варианты закрепления, было определено условие - деталь должна быть зафиксирована, но условия закрепления не должны повлиять на деформационную картину в целом. В результате математического моделирования выявлено: закрепление должно быть выполнено за узлы, являющиеся вершинами одного элемента, толь ко в этом случае их местоположение на поверхности детали на общую деформационную картину практически не влияет. В этом случае размещение закрепляемых узлов в центральной части полотна детали либо на поверхности ребер, значительно на среднюю стрелу прогиба не влияют .

Следующий шаг формирования расчётной модели это задание нагружения. В работах С.К. Каргапольцева сформированы зависимости для расчета различных компонентов нагрузки. В элементах детали действуют сжимающие (растягивающие) осевые силы и изгибающие моменты, действующие после механического снятия припуска (выборка кармана). Для упрощения расчётов целесообразно использовать принцип разбивки детали на простейшие конструктивные составляющие элементы, такие как полотно и подкрепляющие ребра.

Параболические зависимости для напряжений, действующих в полотне, после снятия припусков на его изготовление предложены в работе [4]. Эти напряжения целесообразно рассматривать в виде двух составляющих:

$$\sigma z(y) = \sigma Pz + \sigma Mz ,$$

где σPz – напряжения растяжения-сжатия, действующие на оставшуюся часть заготовки и обеспечивающее ее уравновешивание по силе;

σMz – напряжения изгиба, действующие на оставшуюся часть заготовки и обеспечивающее ее уравновешивание по моменту.

Нагружаемые на модель эквивалентные силы определяются из условия, чтобы работа, производимая ими на узловых перемещениях, была равна работе действительных напряжений на перемещениях точек граничной поверхности элемента. Формируя конечно-элементную модель необходимо задать размер конечного элемента в соответствии с толщиной полотна. Равномерно распределяя нагрузку по толщине полотна и соответственно не выходя за границы одного элемента не трудно обеспечить эквивалентную систему нагружения.

Сходимость результатов, значения деформаций, рассчитанные указанным методом и полученные экспериментальным путём имеют расхождение от 1 до 6%.

Несмотря на трудоёмкость предлагаемого метода ожидаемый результат обеспечит экономическую эффективность.

Считаем, что реализация при построении конечно-элементных моделей указанных предложений позволит успешно решить поставленную задачу прогнозирования остаточного коробления маложестких деталей.

Литература

1. *Биргер А.И., Мавлютов Р.Р.* Сопротивление материалов. – М.: Наука,1986. – 559 с.
2. *Биргер А.И.* Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
3. *Калакуцкий Н.В.* Исследование внутренних напряжений в чугуне и стали. С. п. б. и хромолит А. Траншель, 1887. – 116 с.

4. *Каргапольцев С.К.* Остаточные деформации при фрезеровании маложёстких деталей с подкреплением. – Иркутск: Восточно-Сибирский институт МВД Российской Федерации. – 136 с.
5. *Промптов А.И.* Расчёт остаточных деформаций изгиба и закручивания по остаточным напряжениям // Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов: Межвузовск. сб. – Куйбышев, 1976. – Вып. 3. – С. 187 – 192.
6. *Промптов А.И., Ботвенко С.И.* Причины возникновения и возможные пути управления неустойчивым состоянием полотна при изготовлении деталей коробчатой формы // Управление технологическими процессами в машиностроении. Сб. науч. тр. ИПИ. – Иркутск, 1989. – С. 3 – 9..