

**Моделирование методом конечных элементов (МКЭ) процессаковки авиационных деталей**

Студенты гр. 10402222 Богославчик А. А., Корнилов Д.С.

Научный преподаватель – Боярчук А. Н.

Белорусский национальный технический университет  
г. Минск

Моделирование методом конечных элементов (МКЭ) является незаменимым инструментом при проектировании и совершенствовании технологииковки авиационных деталей. Этот метод позволяет инженерам «заглянуть» внутрь материала во время деформации, предсказать, как он будет вести себя под нагрузкой, и избежать ошибок, которые могут привести к браку [1]. В авиации, где каждая деталь должна выдерживать экстремальные нагрузки и температуры, такие расчеты критически важны. Например, при создании лопаток турбин или элементов фюзеляжа даже небольшая неточность в форме или структуре материала может стать причиной катастрофы. МКЭ заменяет дорогостоящие физические эксперименты виртуальными тестами, экономя время и ресурсы.

Процессковки включает нагрев металлической заготовки до высоких температур (часто выше 1000 °С) и ее деформацию с помощью пресса или молота [2]. При этом возникают сложные физические явления: материал течет неравномерно, в одних зонах сжимается, в других растягивается, а температура распределяется нелинейно из-за трения и контакта с инструментом. МКЭ разбивает деталь на тысячи мелких «кусочков» – конечных элементов, для каждого из которых решаются уравнения, описывающие деформацию, теплообмен и изменение структуры. Это позволяет увидеть, где могут появиться трещины, складки или участки с повышенным износом штампа. Например, при ковке диска компрессора двигателя важно, чтобы металл заполнил все углубления штампа без образования пустот. Моделирование помогает подобрать оптимальную скорость пресса, силу удара и температуру заготовки, чтобы добиться идеального результата.

Одной из ключевых задач является учет свойств материала. Авиационные сплавы, такие как титановый ВТ6 или никелевый Инконель, обладают высокой прочностью, но их поведение при ковке сильно зависит от температуры и скорости деформации. Например, если нагреть заготовку недостаточно, металл станет хрупким, а при перегреве – потеряет нужные свойства. МКЭ позволяет «проиграть» разные сценарии, чтобы найти баланс: при какой температуре сплав становится достаточно пластичным, но не перегревается, как скорость деформации влияет на размер зерен в структуре и, следовательно, на прочность готовой детали. Эти данные закладываются в модель в виде математических зависимостей, полученных из лабораторных испытаний.

Особенно сложным этапом становится моделирование контактного взаимодействия между заготовкой и инструментом. Во времяковки поверхности трутся друг о друга, что вызывает нагрев и износ штампа. В программах на основе МКЭ, таких как DEFORM или QForm, можно задать коэффициент трения, теплопроводность материалов и даже учесть смазку, которая снижает сопротивление. Это помогает продлить срок службы дорогостоящих штампов и сократить затраты на их замену. Например, при ковке крупногабаритных деталей шасси самолета неравномерный износ инструмента может привести к отклонениям в геометрии. Моделирование заранее показывает «слабые» места процесса, позволяя скорректировать конструкцию штампа или изменить технологические параметры.

Термические процессы – еще один важный аспект. При ковке часть энергии деформации превращается в тепло, что дополнительно нагревает заготовку. МКЭ учитывает это, рассчитывая, как температура распределяется по объему детали, как быстро она остывает после снятия нагрузки и какие остаточные напряжения возникают. Например, быстрое

охлаждение может привести к короблению тонкостенных элементов, а медленное – к нежелательному росту зерен в структуре. Точный прогноз этих явлений позволяет выбрать оптимальный режим охлаждения или добавить термообработку для снятия напряжений [2].

Верификация моделей – обязательный этап. Для этого результаты расчетов сравнивают с реальными данными, полученными в ходе испытаний. Например, на производстве устанавливают датчики на пресс, чтобы замерить усилиековки, или используют термопары для контроля температуры заготовки. После изготовления детали ее исследуют рентгеновскими методами или ультразвуком, чтобы обнаружить скрытые дефекты. Если модель предсказала их расположение, это подтверждает ее точность. Такая обратная связь позволяет постоянно улучшать алгоритмы и накапливать базу знаний для будущих проектов.

Сегодня МКЭ активно интегрируется в концепцию «цифровых двойников» – виртуальных копий реальных производственных процессов. Это позволяет не только проектировать детали, но и оптимизировать всю цепочку: от выбора сырья до контроля качества. Например, на заводе можно создать цифровую модель цеха, где будут тестироваться разные сценарииковки без остановки производства. Это сокращает время на переналадку оборудования и снижает риск человеческих ошибок.

Однако у метода есть и ограничения. Трехмерные модели требуют мощных компьютеров и долгого времени расчета, особенно для крупных деталей. Точность результатов зависит от качества входных данных: если свойства материала или условия трения заданы неправильно, прогноз будет ошибочным [3]. Поэтому развитие МКЭ идет в сторону упрощения интерфейсов, автоматизации сбора данных и использования нейросетей для ускорения расчетов. Например, искусственный интеллект может анализировать исторические данные моделирования и предлагать оптимальные параметры для новых задач.

#### **Список использованных источников**

1 Трегубов, В. И. Моделирование процессовковки и штамповки авиационных деталей методом конечных элементов / В. И. Трегубов, А. Д. Матвеев. – М.: Машиностроение, 2015. – 256 с.

2 Попов, Е. А. Численные методы в обработке металлов давлением / Е. А. Попов, С. Н. Григорьев. – Санкт-Петербург: Лань, 2018. – 412 с.

3 Колпаков, С. В. Компьютерное моделирование в кузнечно-штамповочном производстве / С. В. Колпаков, А. М. Белов. – Минск: БНТУ, 2019. – 198 с.