

# Основы обеспечения долговечности конструкций средствами NX

Ричард Буш, директор по маркетингу NX Digital Simulation (Siemens PLM Software) © Copyright 2007. Siemens



Гарантийный ремонт изделий ежегодно обходится производителям в сотни миллионов долларов, йен, евро, рублей... Отдельные узлы или детали, считающиеся “достаточно прочными”, не выдерживают эксплуатационных нагрузок, что наносит ущерб и торговой марке, и уровням продаж. Конструкторы и технологи применяют методы анализа надежности для выявления вероятных зон возникновения трещин и повышения долговечности машин. Средства компьютерного моделирования позволяют рассмотреть различные варианты конструкции, задавать вопросы типа “а что будет, если...” и оптимизировать проектное решение.

Ранее в данной области был выполнен большой объем исследований. Процесс, вызывающий разрушение, на уровне структуры материала оказался исключительно сложным. Разрушение является результатом последовательных изменений в материале, которые часто имеют очень малые размеры, но заканчиваются появлением трещин или полным

выходом детали из строя. В настоящей статье рассматриваются основы обеспечения долговечности машин с применением широкого набора средств проектирования.

Начнем обсуждение с ряда базовых определений. Во-первых, усталость в материале накапливается, поэтому срок службы – важный параметр при проектировании. Малый размер зон разрушения требует тщательного исследования местных напряжений. При этом нельзя забывать, что постоянная нагрузка не вызовет разрушения, в связи с чем необходимо изучить влияние переменных нагрузок. Наконец, разрушение возникает тогда, когда трещина выросла настолько, что оставшийся материал больше не может выдерживать прилагаемую нагрузку, поэтому конструктор должен назначить или рассчитать безопасный срок службы машины. Такой подход предусматривает экономически обоснованную замену критически важных деталей в ходе планового технического обслуживания.

Прогнозирование срока службы отличается от анализа статической прочности методом конечных элементов (МКЭ): в МКЭ применяются понятия предела прочности и текучести материала,

**Таблица 1. Классификация систем анализа надежности по их функциональным возможностям**

Базовые функции	Усовершенствованные функции
Интеграция с применяемым пользователем препроцессором, решателем и постпроцессором МКЭ	
Ведение истории нагрузок, как измеренных, так и расчетных	
Математические и графические средства для анализа и отображения сохраненных нагрузок	
Функция расчета запаса прочности по напряжению (прочностной анализ)	
Функция расчета коэффициента усталостной прочности по напряжению (анализ усталостной прочности)	
Динамические напряжения (рассчитываются с применением линейной статической модальной суперпозиции)	Как и в базовом варианте плюс явный анализ переходных процессов или анализ с нелинейным шагом по времени
	Анализ усталостной прочности на основе спектральной плотности мощности (PSD) для случайных колебаний
	Применение местных напряжений и реальных нагрузок
	Учет эффектов двухосного нагружения и многоосевой расчет направления максимального разрушения, а также последующий анализ усталостной прочности в выявленном направлении
	Расчет усталостной прочности в условиях повышенной температуры
	Указание или выявление зон сварки и анализ усталостной прочности сварных швов и точечной сварки
	Расчет оценки срока службы (анализ усталостной прочности)
	Экспорт истории нагрузок и напряжений во внешний решатель

соответствующие его способности сопротивляться единичной приложенной нагрузке. Имитационное моделирование долговечности основано на многократном применении к материалу тех или иных условий нагружения.

Простые приложения для оценки долговечности часто используют упрощенные схемы нагружений, но всё равно остаются весьма эффективными средствами для сравнения различных вариантов конструкции. Программные продукты с более богатым функционалом, предназначенные для специалистов-расчетчиков, обеспечивают более детальный анализ (табл. 1). При выборе такого продукта необходимо учитывать, насколько безболезненно пройдет его интеграция с конструкторской САПР, будет ли он содействовать внедрению типовых оптимальных решений, и смогут ли его применять сами конструкторы. Важный момент – повторное использование данных. Геометрию конструкции, нагрузки и результаты расчета часто необходимо передавать в более мощные приложения для последующего прочностного анализа и оптимизации.

Теперь нужно обсудить последовательность выполнения расчетов. Как и большинство CAE-систем, приложения для анализа долговечности и усталостной прочности работают по классической схеме (рис. 1):

- препроцессинг (подготовка исходных данных);
- собственно расчет;
- постпроцессинг (анализ полученных результатов).

Разумеется, результаты представляются в виде графиков, отчетов или цветных анимаций, которые легко воспринимаются и могут быть переданы любому, кто участвует в проектировании изделия. В качестве примера последовательности этапов расчета начнем с конструкторского проектирования детали. После того как деталь спроектирована, пользователь может:

- 1 С помощью мастер-процесса или непосредственно программы анализа создавать расчетную модель (задаются ограничения, нагрузки, генерируется сетка конечных элементов).
- 2 Добавлять параметры цикла усталостной нагрузки.
- 3 Выполнять анализ статической прочности.
- 4 Выполнять анализ усталостной прочности.
- 5 Просматривать полученные результаты.
- 6 При необходимости вносить изменения в конструкцию и повторять расчет.

(Примечание: возможен импорт нагрузок из внешнего решателя или из набора экспериментальных данных, после чего выполняются этапы 2÷6.)

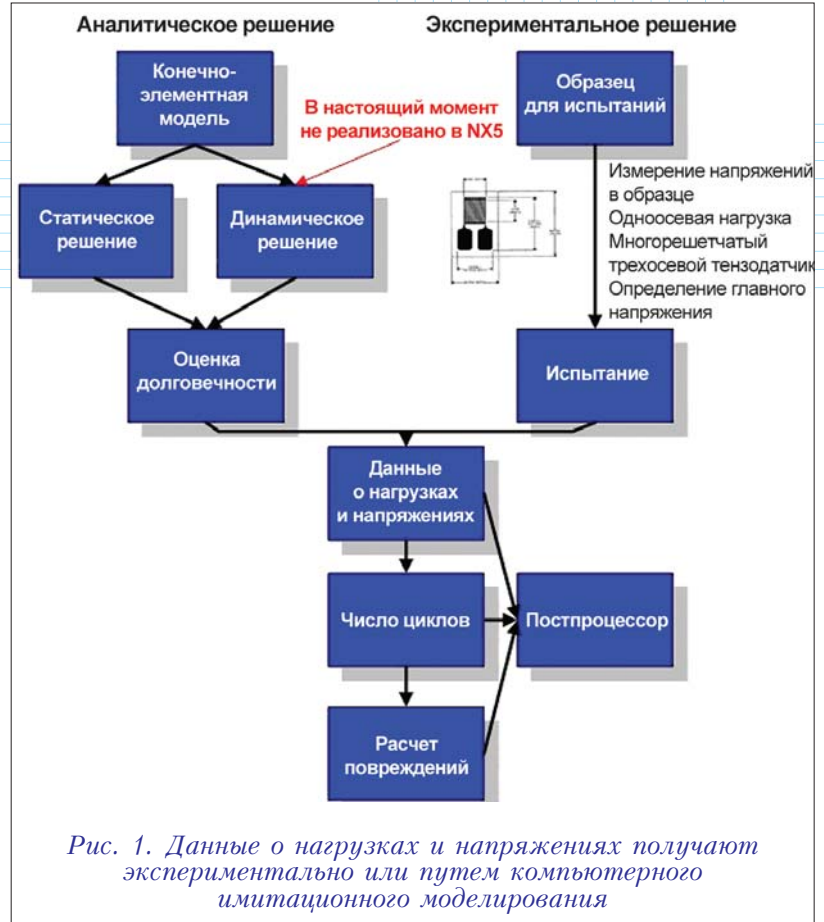


Рис. 1. Данные о нагрузках и напряжениях получают экспериментально или путем компьютерного имитационного моделирования

Ни один из этапов не является излишне сложным. Масштабируемая среда предоставляет неопытным пользователям технологию интерактивных *мастер-процессов*, основанных на опыте экспертов. Специалисты применяют такие средства, как шаблоны, и команды, задействуемые “одним щелчком мыши”, для упрощения процесса расчета. Имеется разнообразный инструментарий, привлекаемый по мере роста опыта. Как указал один производитель автомобильных деталей, “главная ценность таких систем – преодоление культурных различий за счет обмена опытом экспертов и данными в единой инструментальной среде”.

Как правило, в системах проектирования используются простые определения нагрузок типа “цикла статического нагружения” (полного или половины), как показано на рис. 2.

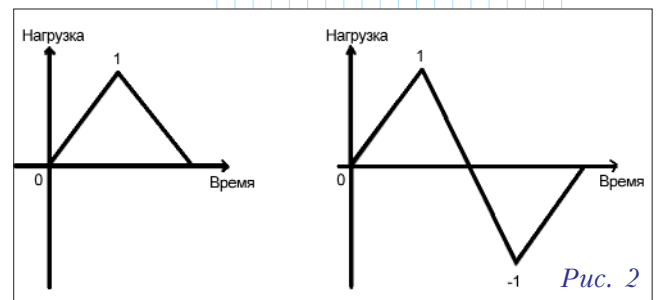


Рис. 2

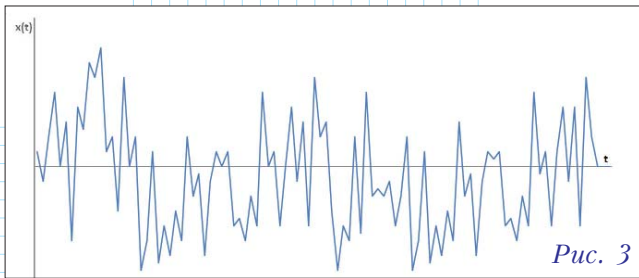


Рис. 3

Они пригодны для решения большинства текущих задач, однако более сложные системы позволяют учитывать эффекты двухосного нагружения, выполнять анализ усталостной прочности на основе функций спектральной плотности мощности для решения задач, связанных со случайными вибрационными нагрузками, а также задавать сложные статические рабочие циклы (рис. 3).

При помощи анализа статической прочности МКЭ можно оценить способность конструкции выдерживать приложенные нагрузки и вычислить максимальную нагрузку, приводящую к разрушению, но при этом **не учитывается** число циклов нагружения. Анализ усталостной прочности при циклической нагрузке позволяет оценить способность конструкции сопротивляться разрушению при воздействии повторяющихся нагрузок. При этом учитываются число циклов нагружения и зависимости уровней напряжения в материале от числа циклов (*S-N* диаграммы). Именно эти напряжения в конечном итоге приводят к возникновению трещин и последующему разрушению.

*S-N* диаграммы строятся для случая одноосевой нагрузки. Более сложные решатели могут использовать многоосевые подходы, как это рассматривается далее (рис. 4).

конструкции за один цикл нагружения составляет  $1/\text{срок службы}$ , а за  $n$  циклов –  $n/\text{срок службы}$ . Тогда повреждения можно оценивать как изменения нагрузки. Для расчета важнейших значений нагрузок и усталостных напряжений за весь предполагаемый срок службы изделия используется метод вычислений, известный как “Метод дождевого потока для подсчета циклов” (*Rainflow counting*). В данном алгоритме фиксируются экстремумы, соответствующие усталостным напряжениям, а остальные данные, не влияющие на усталостную прочность, игнорируются.

Помимо экономии времени и средств в результате анализа и оптимизации реальных конструкций, можно указать следующие очевидные преимущества инструментов анализа усталостной прочности:

- большее количество пользователей в ходе подготовки производства новых изделий может воспользоваться данной сравнительно простой технологией (например, конструкторам предоставляются хорошо знакомые им средства для анализа нагрузок, напряжений и долговечности изделий);
- внесение изменений в конструкцию протекает безболезненно за счет поддержания полной ассоциативности с *3D*-моделью изделия, созданной с помощью САПР;
- качество процесса разработки повышается за счет устранения ошибок, связанных с конвертацией данных, передачей файлов и т.д.;
- повышается эффективность процесса проектирования за счет устранения потерь времени, вызванных ручным вводом данных;
- предприятия могут брать лучшие существующие типовые решения и создавать стандарты предприятия по проектированию и анализу изделий с применением баз знаний;

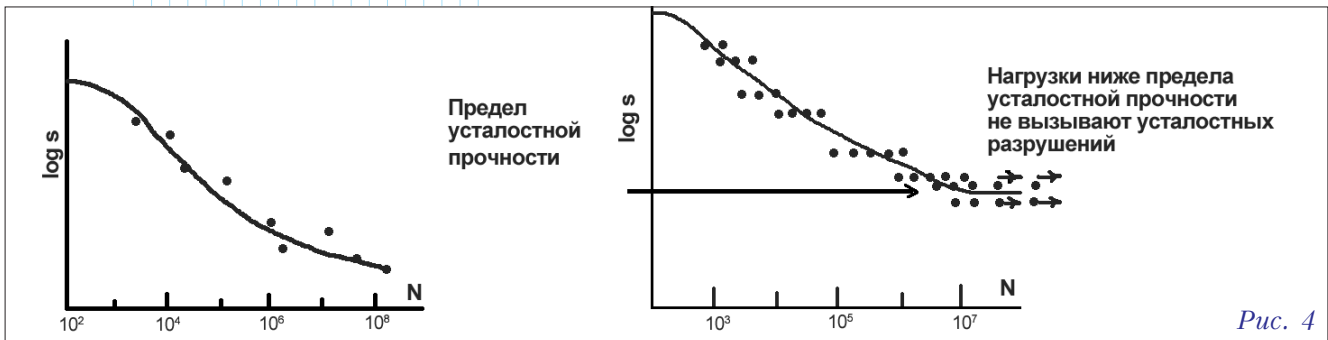


Рис. 4

Такие диаграммы применяются в программных продуктах для оценки срока службы конструкции под воздействием циклических нагрузок. Число циклов нагружения до момента разрушения обозначается как “циклов до разрушения” или “усталостный срок службы”. Как видно из диаграмм, существует точка, начиная с которой напряжение в материале “выравнивается”. Это и есть предел усталостной прочности (рис. 5). Нагрузки ниже этого предела считаются безопасными.

Возможно, вам доводилось слышать термин “оценка повреждаемости”. Это величина, обратная расчетному сроку службы: повреждаемость

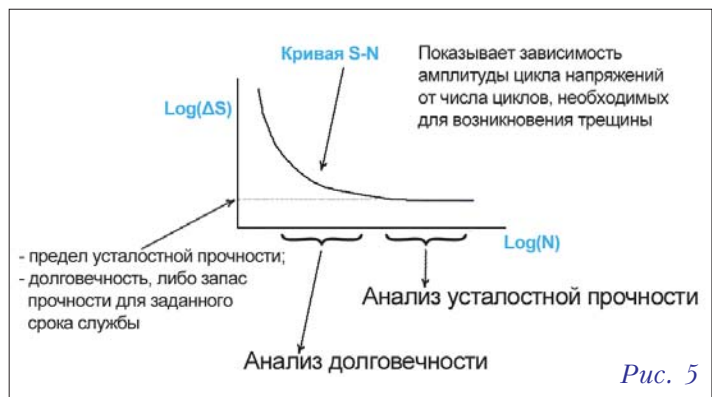


Рис. 5

- процесс разработки значительно упрощается благодаря интеграции этапов твердотельного моделирования, анализа статической прочности МКЭ, анализа собственных форм и частот колебаний, анализа кинематики и динамики механизмов, а также расчета усталостной прочности конструкции;
- упрощается обучение пользователей, так как процессы моделирования и анализа объединены в одном приложении с общим подходом к созданию пользовательского интерфейса;
- совместная работа в масштабах всего предприятия в ходе проектирования изделия поддерживается соответствующими средствами обмена данными.

### Оценка усталостной прочности в системе NX

Модуль оценки долговечности входит в стандартную поставку пакетов *NX Design Simulation* и *Advanced simulation*. Данный модуль выполняет анализ усталостной прочности и оценку пригодности конструкции. Результаты выводятся в форме контурных эпюр повреждений или числа циклов нагружения до возникновения трещины.

Панель инструментов “Навигация” предназначена для просмотра результатов расчета (рис. 6). Результаты для *Расчета 1* включают в себя расчетные смещения, нагрузки и напряжения. По этим данным выполняется анализ долговечности. В *Задачии 1* также вычисляется множество значений, в том числе оценка долговечности и коэффициент запаса прочности по усталостным напряжениям.

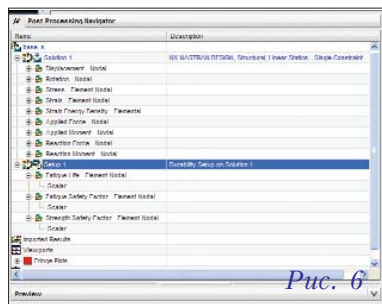


Рис. 6

Мастер-процесс в системе *UGS NX Design Simulation* позволяет задавать параметры статического цикла нагружений для анализа долговечности. В приведенном примере (рис. 7) пользователь ввел число циклов (1 000 000) и масштабный коэффициент (1.0000), а затем применил статическую нагрузку.

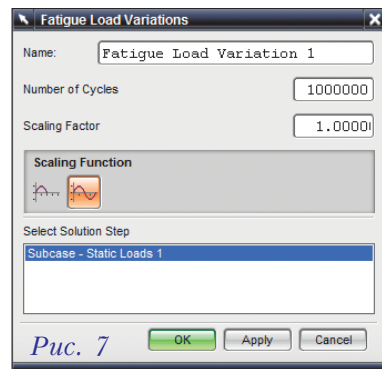


Рис. 7

Результатом анализа усталостной прочности шатуна (рис. 8) является прогнозируемый срок службы, выраженный в циклах нагружения. Цветовая шкала (левый верхний угол) облегчает понимание выводимой информации. Сообщение “Element Nodal” означает, что полученные результаты рассчитаны для узловых точек сетки конечных элементов. Красные области показывают зоны начала разрушения после примерно 30 000 циклов нагружения.

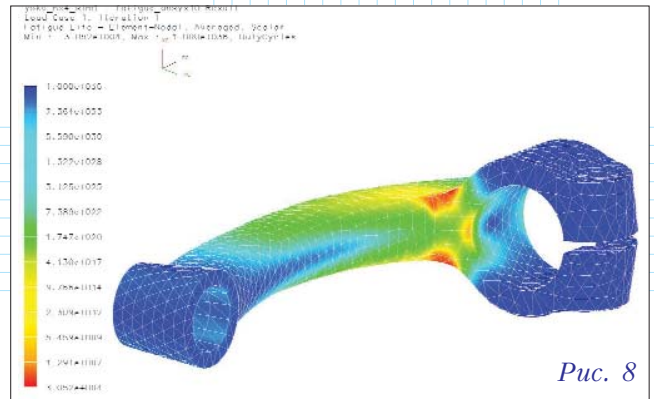


Рис. 8

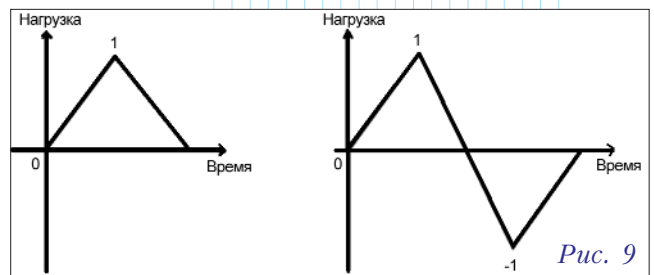


Рис. 9



Рис. 10

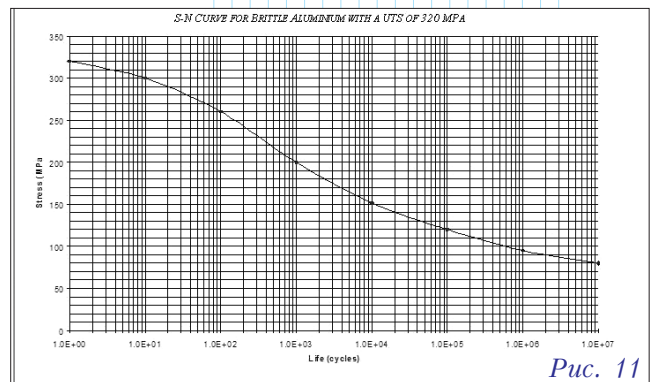


Рис. 11

Простые статические циклы нагружения соответствуют приложению и снятию нагрузки (рис. 9, слева), либо смене её направления (рис. 9, справа). Оба варианта достаточны для проведения базового анализа долговечности.

Сложный цикл статического нагружения представляет амплитуду нагрузки как функцию от времени. В приложениях с более широким функционалом доступно создание циклов, подобных приведенному на рис. 10.

На рис. 11 изображена диаграмма зависимости нагрузки от числа циклов для хрупкого алюминия с пределом прочности на разрыв 320 МПа.

© Copyright 2007. Siemens. All rights reserved. Примечание: Siemens и логотип Siemens являются зарегистрированными торговыми марками компании Siemens AG. Все прочие использованные в статье названия продуктов являются собственностью их владельцев.