



**SIEMENS**

*Ingenuity for life*

Siemens Digital Industries Software

## Быстрое создание долговечных конструкций

Проектирование долговечных  
автомобилей с помощью численного  
моделирования в Simcenter 3D

### Краткий обзор

Siemens Digital Industries Software помогает заказчикам ускорить вывод изделий на рынок на всех этапах проектирования автомобиля. Описанный в данной статье процесс анализа долговечности с помощью 3D CAE-системы рассматривается с точки зрения оптимизации проектирования и виртуальной валидации изделия. Точнее говоря, в статье рассказывается о том, как использовать решения для 3D-симуляции для анализа долговечности кузова и ходовой части, но силовая установка не рассматривается, так как для нее нужно использовать другой процесс и учитывать другие физические свойства.

# Содержание

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>Трудности инженерного анализа долговечности автомобилей .....</b>	<b>4</b>
Подготовка моделей для анализа долговечности с помощью 3D CAE-системы.....	4
<b>Гибридный подход .....</b>	<b>6</b>
<b>Подход на основе цифровых дорог .....</b>	<b>7</b>
Эффективная и точная симуляция долговечности.....	8
<b>Композиционные материалы.....</b>	<b>11</b>
<b>Аддитивное производство .....</b>	<b>11</b>
<b>Заключение .....</b>	<b>13</b>
<b>Ссылки .....</b>	<b>14</b>

# Введение

Любой владелец хочет, чтобы его автомобиль был надежным. В отличие таких характеристик автомобиля, как динамика, комфорт или акустика, которые конечный пользователь может оценить напрямую, долговечность автомобиля можно проанализировать только после длительной эксплуатации и при внушительном пробеге. Поэтому заработать репутацию автомобильного бренда, который славится долговечностью изделий, сложно, а кроме того, это займет много времени. В то же время репутация может быть испорчена всего несколькими кампаниями по отзыву автомобилей.

Повышение долговечности с помощью добавления дополнительного материала увеличивает вес автомобиля (и расход топлива), уровень выбросов углекислого газа (CO<sub>2</sub>) и стоимость эксплуатации. Прочие модификации конструкции, повышающие долговечность, также влияют на различные эксплуатационные свойства автомобиля. Поэтому проектирование долговечного автомобиля представляет собой сложный процесс оптимизации разных атрибутов. Нужно стремиться к балансу между весом и долговечностью компонентов конструкции, контролируя при этом затраты и предотвращая ухудшение других характеристик.

Точный и эффективный инженерный анализ на ранних этапах имеет решающее значение для прогнозирования и повышения долговечности, поскольку именно он обеспечивает свободу при проектировании и не требует больших вложений. Чем раньше, тем лучше: модели создаются еще до прототипов, и оптимизировать производительность с их помощью быстрее, чем вносить изменения в уже существующий автомобиль, особенно если он уже выпущен на рынок.

Портфель Simcenter™ включает решения, полностью охватывающие стандартный процесс разработки автомобиля с учетом долговечности (рис. 1).

Для начала необходимо оценить нагрузки, которым будут подвергаться изделия в течение предполагаемого срока службы. На этом этапе нужно проанализировать характеристики, связанные с прочностью и долговечностью, а затем определить целевые значения.

Такие данные обычно служат вводными для виртуальной и физической валидации и оптимизации изделия. Последние два этапа разработки долговечного автомобиля включают в себя оптимизацию и валидацию физического прототипа перед испытанием конечного варианта изделия на дороге.

Программное обеспечение Simcenter™ 3D представляет собой комплексное, полностью интегрированное 3D CAE-решение с возможностью подключения к системам проектирования, 1D-симуляции, тестирования и управления данными<sup>1</sup>. Оно включает в себя центральную платформу, которая используется для моделирования, выполнения мультидисциплинарного инженерного анализа и оценки его результатов. Это достигается благодаря интеграции быстрых и точных решателей, позволяющих проводить мультифизический, структурный, акустический анализ, а также анализ электромагнитных характеристик, долговечности, потока, теплового состояния, кинематики, материалов и оптимизации.

Главная задача данной статьи — рассказать о том, как решение Simcenter 3D Specialist Durability, в сочетании с остальными решениями из портфеля Simcenter, предоставляет инженерам передовые инструменты для оценки долговечности с помощью универсального цифрового двойника автомобиля еще до создания первого прототипа. Эти инструменты позволяют выполнять самые разные задачи: от сбора данных о нагрузке до расширенного расчета долговечности.

Simcenter является частью Xcelerator, комплексного и интегрированного портфеля решений и сервисов Siemens Digital Industries Software.

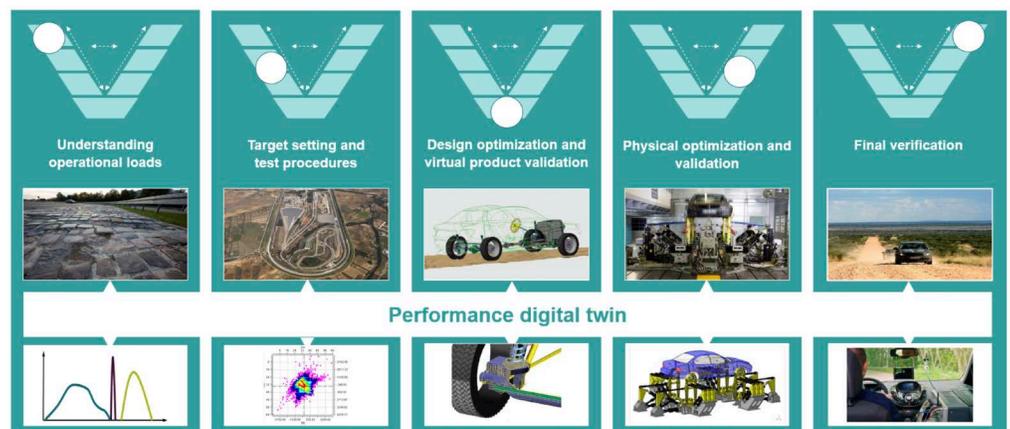


Рис. 1: Процесс расчета долговечности.

# Трудности инженерного анализа долговечности автомобилей

Для эффективного инженерного анализа долговечности на ранних этапах конструкторам, работающим в CAE-системе, требуется решать вполне конкретные задачи, иметь доступ к данным и использовать разнообразные инструменты:

- Во-первых, им необходимы точные данные о дорожной нагрузке. Нагрузки, сказывающиеся на долговечности, связаны преимущественно с состоянием дорог, передаются через шины, оси вращения колес, а затем распространяются на ходовую часть и все компоненты конструкции автомобиля. Основная сложность заключается в получении точных данных о нагрузках для учета как критических (например, мощные дороги, выбоины и ненадлежащая эксплуатация), так и более привычных сценариев (плавного движения по шоссе), в тот момент, когда прототипа автомобиля еще не существует. Такие данные можно получить либо путем измерений, выполненных для ранее выпущенных автомобилей, либо путем симуляции на цифровых дорогах.
- Затем инженеру-расчетчику понадобятся инструменты для прогнозирования данных о нагрузках на уровне компонентов или подсистем. Они будут нужны в качестве исходных данных для инженерного анализа и оптимизации долговечности.
- Также необходим доступ к актуальным CAD-данным и ускоренный процесс переноса данных из CAD-системы в CAE-систему. Обычно конструкторы работают в другом отделе, а не вместе с инженерами-расчетчиками, использующими CAE-системы. Как правило, они ежедневно обновляют конструкцию компонентов, реагируя на запросы на изменение, поступающие из производственного отдела или от других инженеров-расчетчиков, использующих CAE-системы. Обычно конструкторы получают результаты расчета долговечности достаточно поздно, когда конструкция уже несколько раз изменялась, что сужает возможности проектирования (поскольку детали конструкции могли быть «заморожены» для других атрибутов и/или была начата подготовка к производству, в результате чего некоторые изменения становятся невозможны с точки зрения производства).
- Стандартные методы симуляции усталости в разных компаниях могут различаться и со временем меняться. Они должны быть реализованы в решении для расчета долговечности и легко доступны. Кроме того, в связи с возрастающей сложностью сборок и технологий, используемых в автомобилях, разнообразием типов материалов, стратегий соединений и производственных процессов существующих и хорошо известных методов обеспечения долговечности порой бывает недостаточно. Необходимы новые расширенные методики расчета усталостного ресурса.
- Наконец, для того чтобы специалисты, использующие CAE-системы, могли тщательно проанализировать, визуализировать и интерпретировать результаты, а также внедрить соответствующие изменения конструкции, нужны особые инструменты постобработки. Это повышает эффективность работы инженеров над финальным вариантом изделия.

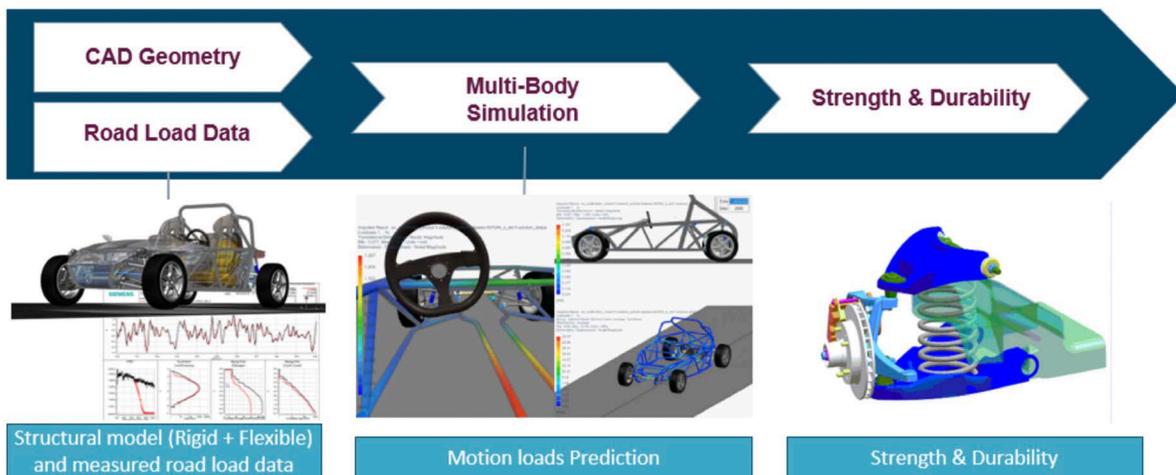


Рис. 2: Типичный процесс расчета долговечности с помощью 3D CAE-системы, от сбора данных о дорожной нагрузке до анализа прочности и долговечности.

### Подготовка моделей для расчета долговечности с помощью 3D CAE-системы

#### Доступ к актуальным данным CAD-системы и ускорение процесса переноса данных из CAD в CAE-систему

В ходе стандартного процесса работы в CAE-системе конструкторы предоставляют файлы CAD-системы инженерам-расчетчикам, использующим CAE-систему, через общие папки или по электронной почте. Инженеру-расчетчику, использующему CAE-систему, необходимо время на интеграцию CAD-модели в CAE-систему, подготовку и запуск симуляции, а также постобработку результатов. В то же время конструктор несколько раз обновляет данные CAD-системы, опираясь на обратную связь от специалистов других отделов (аналитиков, технологов, руководителей программ и т.д.).

Результаты CAE-анализа быстро устаревают. Чтобы этого избежать, нужно ускорить процесс переноса данных из CAD в CAE-систему. Именно поэтому компания Siemens Digital Industries Software предлагает следующие возможности портфеля решений Simcenter 3D:

- Интеграция с CAD-системами (Siemens NX™ или системами от других поставщиков) с полным доступом к объектам проектирования
- Решение для управления данными симуляции Teamcenter, которое автоматически передает самые актуальные версии деталей из CAD-системы в CAE-систему для их анализа, а затем связывает результаты расчета с деталями в CAD-системе.
- Возможности автоматизации и индивидуальной настройки NX Open для ускорения переноса данных из CAD- в CAE-систему и адаптации к потребностям заказчиков
- Эффективный и точный расчет долговечности и постобработка, которые мы подробно рассмотрим в данной статье



Рис. 3: Примеры экстремальных условий вождения.

#### Прогнозирование данных по дорожным нагрузкам

В реальном мире на компоненты и подсистемы воздействуют комплексные нагрузки. Эти нагрузки можно измерить только после производства прототипов. Поэтому для получения правильных значений нагрузок на всю систему необходим универсальный цифровой двойник. Его можно использовать для применения нагрузок к компонентам.

Сначала специалистам по расчету долговечности необходимо определить нагрузки, которые будут воздействовать на весь автомобиль и влиять на его срок службы. Они зависят от водителя, типа автомобиля и дорог, по которым будет ездить транспортное средство. После этого можно определить, какие нужно выполнить тестирования, или извлечь данные тестирований уже существующих автомобилей. Затем выполняется симуляция нагрузок на новые компоненты, после чего конструкция этих компонентов оптимизируется для достижения целевых значений по различным характеристикам.

При использовании комплексного цифрового двойника для получения данных о нагрузках на весь автомобиль, а также его подсистемы и компоненты, достаточно информации об испытательном треке и маневрах при вождении. Графики применения нагрузок на испытательном стенде могут быть адаптированы и оптимизированы под отдельные подсистемы и компоненты.

Существует два подхода к прогнозированию данных о дорожной нагрузке: гибридный подход и подход на основе цифровых дорог.

# Гибридный подход

Подход, основанный на комбинировании физических испытаний с численным моделированием. Он позволяет конструкторам последовательно и без лишних трудностей передавать данные об измерениях, сделанных на испытательных треках, в CAE-среду. Этот метод позволяет получить реалистичный прогноз дорожной нагрузки даже для тех нагрузок, которые невозможно измерить.

Если говорить более конкретно, то входными данными являются измерения сил, которые действуют на ось вращения колеса в уже существующих автомобилях, применяемые к многотельной модели симуляции. Модель рассчитывает смещения осей в новом автомобиле, на основе которых определяются нагрузки на компоненты и подсистемы, необходимые для проведения анализа долговечности в CAE-системе. Одним из основных преимуществ данного решения является то, что в модель не нужно включать детальные модели шин, водителя и дороги, так как данные нагрузки основаны на реальных измерениях, выполненных на автомобилях-предшественниках.

Simcenter 3D Motion-TWR от Siemens — это уникальное интегрированное программное обеспечение, которое охватывает весь процесс прогнозирования дорожной нагрузки.

Его можно применять не только для расчетов всего автомобиля. Можно использовать данные с сенсоров, задействованных при измерениях на испытательном треке, включая датчики силы вращения колес, ускорения, сопротивления и смещения. Нагрузки на подсистемы и компоненты, необходимые для анализа долговечности в CAE-системе, также можно рассчитать на основе этого типа данных.

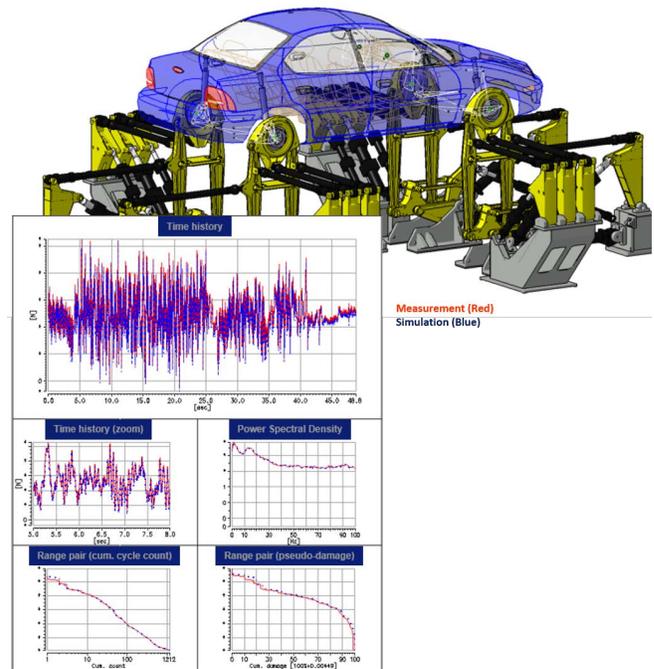


Рис. 4: Гибридный подход на основе физических испытаний и CAE-анализа.

# Подход на основе цифровых дорог

Подход на основе цифровых дорог нужно использовать, если вы не располагаете данными испытаний. В рамках этого подхода определяется профиль дороги, а затем применяется к CAE-модели. Виртуальный автомобиль, движущийся по виртуальной дороге, выполняет различные маневры.

Тогда как при гибридном подходе используются измерения, выполненные ранее на аналогичном автомобиле, подход на основе цифровых дорог требует инвестиций в измерения, создания точной модели шин, модели водителя и хорошего знания маневров вождения.

## Определение сложных событий нагрузки при анализе долговечности

Simcenter 3D Specialist Durability обрабатывает различные сложные события нагрузки на основе времени и частот (рис. 6).

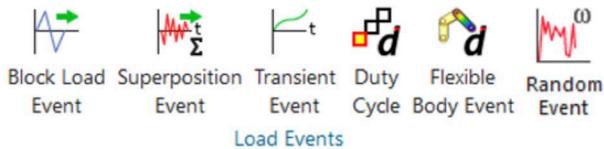


Рис. 6: События нагрузки в Simcenter 3D Specialist Durability.

События нагрузки могут напрямую использовать данные Simcenter 3D Motion, полученные на этапе прогнозирования данных по нагрузкам, описанном выше. Результаты напряжений податливых тел Simcenter 3D Motion можно проанализировать на предмет долговечности с использованием событий податливых тел. Сотни измеренных или полученных с помощью симуляции нагрузок можно объединить с помощью событий суперпозиции, а рабочие циклы позволяют конструктору создать упорядоченный список событий, включая коэффициенты повторения.

В некоторых случаях специалистам по расчету долговечности приходится выполнять сокращенный набор действий, например, если полная многотельная модель автомобиля или данные испытаний и цифровые дороги пока отсутствуют. Для того чтобы результаты расчета долговечности были полезны, применяемые нагрузки должны быть реалистичными. Применение случайных событий — это способ учета данных по дорожным нагрузкам, если они не доступны по результатам испытаний или анализа цифровых дорог. Эти события лучше всего представляются в диапазоне частот с помощью функций спектральной плотности мощности.

Разумеется, также доступны базовые события нагрузки, такие как простые события блокировки нагрузки и переходные события. Переходные события могут быть определены напрямую путем импорта данных истории нагрузок в переходном процессе или их записи.

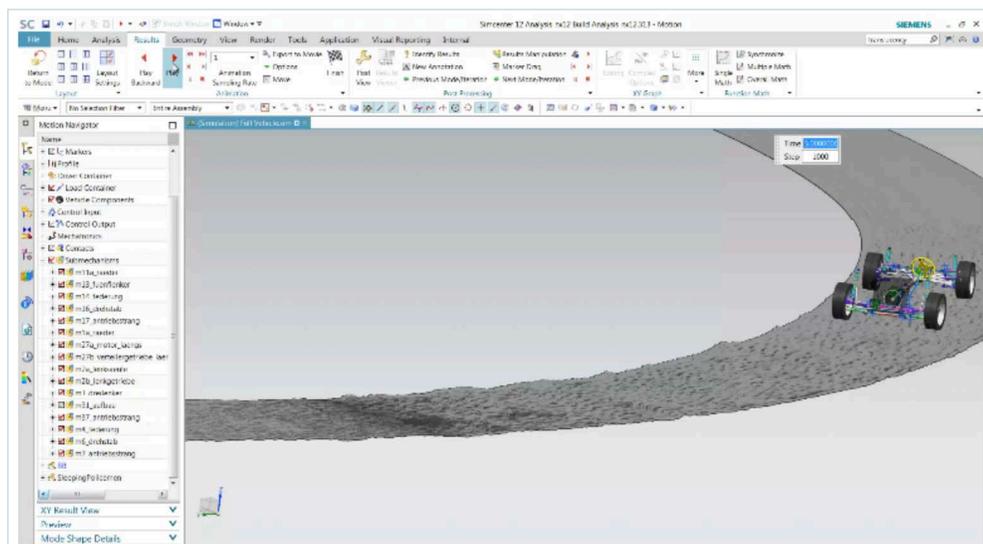


Рис. 5: Подход на основе цифровых дорог.

Наконец, события нагрузки могут быть запущены в обратном направлении для учета не только нагрузки, но и разгрузки.

Важным преимуществом Simcenter 3D Specialist Durability является то, что пользовательский интерфейс эффективно обрабатывает данные о событии нагрузки, оставляя за решателем ресурсоемкую задачу обработки сетки.

### Эффективная и точная симуляция долговечности

#### Управление параметрами усталости и методиками ее оценки

Следующим шагом в процессе оценки долговечности в 3D CAE-системе является определение параметров усталости и методик ее оценки в CAE-системе. Обычно это сложно, так как параметры (материалы, нагрузки, формулы и т.д.) многочисленны и неспециалистам сложно сделать выбор, а также в связи с тем, что эти параметры зависят от общей методики оценки усталости, которую также нужно выбрать из множества доступных вариантов.

Главным новшеством Simcenter 3D Specialist Durability, направленным на оптимизацию всего процесса работы в CAE-системе, является управление параметрами и методиками, применяемыми для расчета долговечности.

- Настраиваемые параметры Simcenter 3D Specialist Durability позволяют специалистам без ограничений выбирать нужные методики среди существующих или создавать собственные методики, а затем задавать соответствующие параметры.
- Специалист, работающий в CAE-системе, также может задать настройки по умолчанию для всех сотрудников, работающих в CAE-системе. Полная конфигурация (методика и параметры) будет настроена автоматически, а конечным пользователям достаточно сделать выбор только один раз, что делает процесс более быстрым и надежным.

Более того, любую комбинацию материалов, методик и параметров можно использовать в одном анализе с помощью локальных определений в модели.

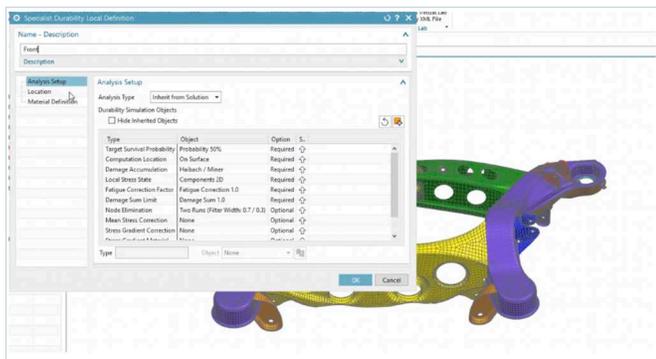


Рис. 7: Настройка расчета долговечности и задание материала.

### Эффективный решатель долговечности для прогнозирования и оптимизации усталостной долговечности компонентов

Доступ к точному и эффективному решателю долговечности необходим для сокращения времени анализа усталости и, следовательно, изучения различных вариантов конструкции, а также ее оптимизации с учетом усталостных характеристик.

Simcenter 3D Specialist Durability включает в себя быстрый, надежный и соответствующий стандартам отрасли решатель усталостной долговечности. Его можно запустить в последовательном или параллельном режиме на компьютере, на котором выполняется подготовка модели, или отдельно в пакетном режиме. Поддерживаются все стандартные методики расчета долговечности. Уникальная открытая архитектура модуля обеспечивает удобное добавление пользовательских методик расчета усталостного ресурса.

Комбинируя нагрузки компонентов, полученные описанными выше методами, результаты расчета напряжения на основе конечных элементов (КЭ) и параметры циклической усталости материалов, Simcenter 3D Specialist Durability позволяет конструкторам определять точки с наибольшим усталостным напряжением и соответствующую усталостную долговечность, а также оптимизировать конструкцию компонента с учетом усталостных характеристик.

Анализ усталостной прочности компонентов включает оценку малоциклового усталости, многоциклового усталости и неограниченной долговечности, коррекции градиента напряжения и внутренней усталости. С помощью специальных функций постобработки конструкторы могут быстро выявлять и решать проблемы, связанные с усталостной долговечностью, а также экспериментировать с различными вариантами конструкции. Эффективная интеграция Simcenter 3D с CAD-системой позволяет проводить простой параметрический анализ, а исследование области поиска оптимального решения в Simcenter 3D (на базе программного обеспечения HEEDS™, входящего в портфель Simcenter) поможет специалистам по расчету долговечности быстрее создавать оптимальные конструкции компонентов.

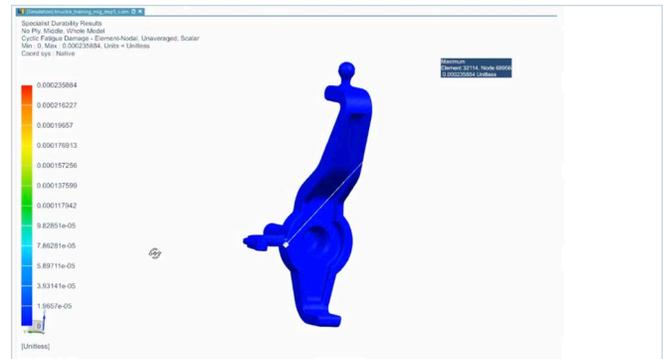


Рис. 8: Определение максимального усталостного разрушения.

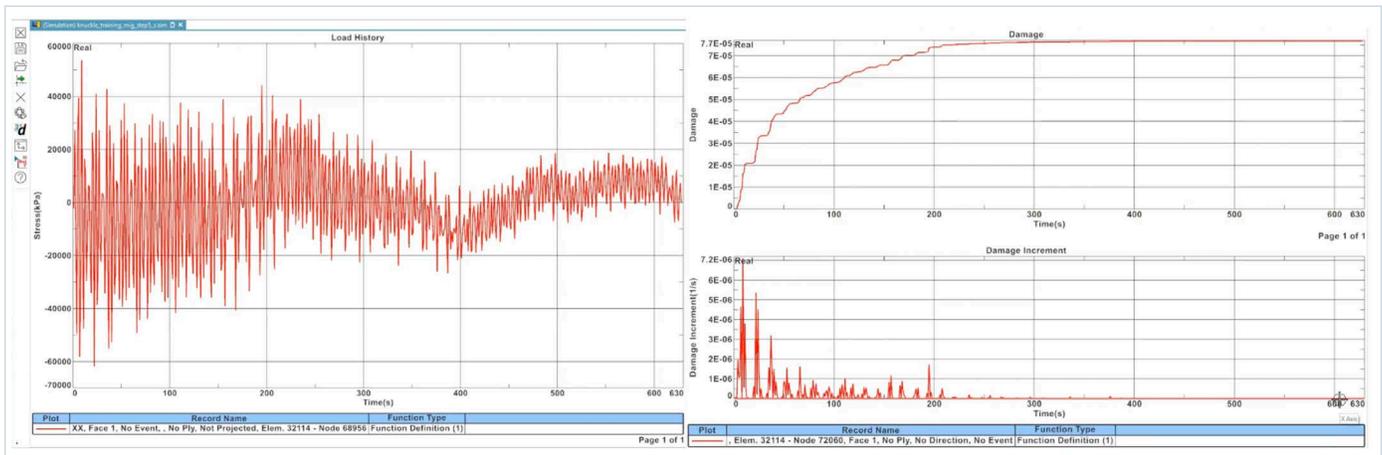


Рис. 9: Результаты переходных процессов в точках с максимальной усталостью: напряжение, усталостное разрушение и его постепенное увеличение.

В приведенном выше примере определяется критическая зона усталости, соответствующая максимальному циклическому усталостному разрушению (рис. 8), а результаты переходных процессов в этой точке автоматически проходят постобработку (рис. 9).

Компонент CAD-системы может быть полностью параметрическим, и любой из этих результатов может использоваться в качестве входных данных процесса оптимизации для итераций с конструкцией и поиска более легких и долговечных вариантов.

**Обеспечение надежных соединений**

Чаще всего разрушения происходят на сварных соединениях. Оценка усталостной долговечности таких соединений является обязательным требованием при разработке автомобиля. Однако эта задача сопряжена со значительными трудностями.

На сварные соединения действуют серьезные нагрузки. Основную проблему представляют их сложная и очень разнообразная геометрия, а также влияние этой геометрии на распределение нагрузки и, следовательно, на долговечность. Среднестатистический автомобиль содержит тысячи точек сварки и сварных швов с различной геометрией и различным усталостным поведением. Решение для расчета долговечности должно эффективно обнаруживать и определять эти многочисленные сварные соединения в модели, а затем автоматически присваивать им правильные свойства долговечности (геометрию, материал, методы расчета усталостного ресурса) перед запуском анализа.

Помимо геометрии, на долговечность сварных соединений влияет множество факторов, связанных с производственным процессом:

- Основной материал (пористость, состав)
- Химический состав основного материала (углерод, марганец, водород)
- Геометрия соединяемых компонентов (шероховатость поверхности, выравнивание, деформация)

- Температура при производственном процессе (сварка, предварительный нагрев, охлаждение)
- Однородность зоны, подверженной воздействию тепла

Вычисление напряжений в сварных соединениях требует дорогостоящего анализа, в то время как традиционные методы с приблизительной оценкой напряжений вокруг сварных соединений с последующей корреляцией с существующими результатами испытаний слишком консервативны. Решение Simcenter 3D Specialist Durability отличается точностью и эффективностью; предлагаемый компромисс заключается в автоматическом обнаружении сварных соединений и сочетании точности подхода на основе напряжения паза с удобством традиционных методов оценки номинального и структурного напряжения.

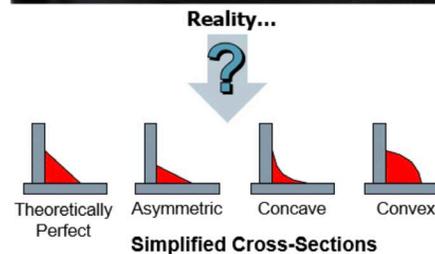


Рис. 10: Сложность геометрии сварных соединений.

Сварные соединения автоматически берутся из соединений, смоделированных в Simcenter 3D, определяются в файле xMCF, открытом стандарте для автомобильной промышленности, или выявляются в существующих сетках. Сварные соединения группируются по типам соединений, степени проникновения и толщине листа. Затем силы и моменты, прилагаемые к каждому сварному соединению, переносятся в замещающий результат КЭ-анализа, соответствующий его группе. Замещающая модель содержит результаты напряжения для единичных нагрузок, поэтому приложенные нагрузки преобразуются в результаты напряжения с помощью линейного преобразования. Наконец, результаты долговечности выводятся из напряжения.

Сварные швы являются наиболее сложным типом сварных соединений, так как они содержат огромный объем сложной локальной геометрии, которую невозможно создать непосредственно в КЭ-моделях: это неудобный процесс, выполняемый вручную, который чрезмерно утяжеляет модели.

Поддерживается множество различных методов моделирования сварных соединений (оболочка-оболочка, оболочка-твердое тело, твердое тело-твердое тело с упрощенной геометрией). Эффективный доступ к данным систем CAD и CAE и CAM обеспечивается с помощью файла xMCF. Поддерживаются все сертифицированные методы расчета (номинальное напряжение, напряжение пазы, эффективное напряжение).

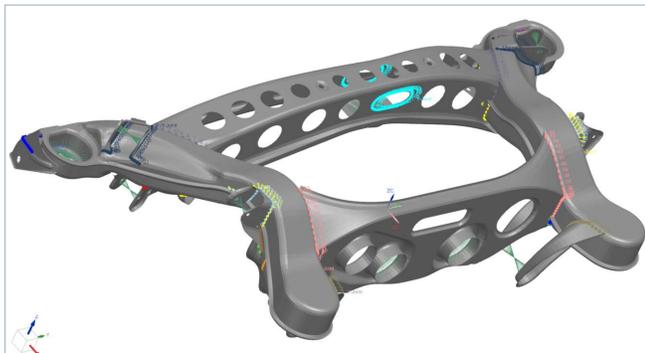


Рис. 11: Определение сварных швов.

### Создание более легких и долговечных автомобилей благодаря новым материалам и производственному процессу

Производители стремятся повышать долговечность автомобилей, но это не должно приводить к их утяжелению. Облегченные автомобили выбрасывают меньше CO<sub>2</sub>, обладают большим запасом хода. Если речь идет о спорткарах, то можно говорить о том, что меньший вес улучшает все характеристики в целом. Поэтому ведутся активные исследования в области разработки и применения новых материалов и производственных процессов. Для виртуального прогнозирования и оптимизации влияния новых материалов на долговечность автомобилей необходимы инновационные методы инженерного анализа усталости.

Чтобы учесть влияние производственного процесса, применяется типичный, консервативный подход: использование данных об усталости для базового материала и введение большого коэффициента запаса прочности, что позволяет учесть все факторы неопределенности, связанные с производством. Методики изучения влияния производства особенно важно продумать для работы с новыми типами материалов, такими как композиты, и деталями, создаваемыми с помощью аддитивного производства. В таких случаях в каждом производственном процессе определяется новый материал, поэтому применять традиционные методы становится невозможно.

Рассмотрим некоторые важные факторы и методы работы с новыми материалами чуть подробнее.

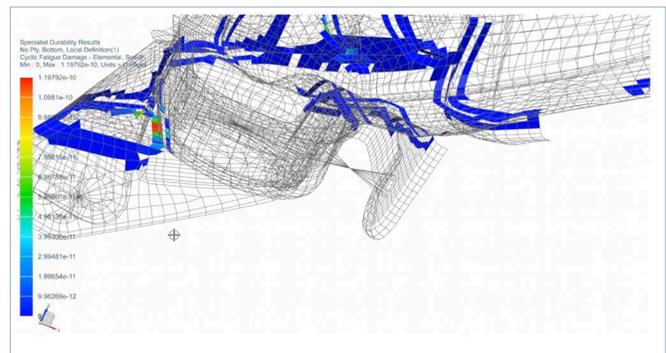


Рис. 12: Циклическое усталостное разрушение сварных швов.

# Композиционные материалы

Из-за недостаточной точности стандартные методы обеспечения долговечности при применении к композитам приводят к конструкционной избыточности, что сводит на нет преимущества использования легких материалов. Компания Siemens участвовала в нескольких исследовательских проектах по внедрению и проверке новых методик расчета усталостного ресурса.

Механизмы разрушения в усиленных волокнами деталях намного сложнее, чем в деталях из более традиционных материалов. Если металлические детали имеют ограниченную усталостную долговечность, то композиты, как правило, демонстрируют значительно большую прочность. Однако перед усталостным разрушением может произойти локальное снижение жесткости, которое способно оказать заметное влияние на механические свойства компонента, а затем и на характеристики автомобиля в целом. Точечное событие, например воздействие с малой энергией или неправильное использование, также может привести к износу композиционного материала и рассматриваться как предварительное повреждение при анализе долговечности.

В Simcenter 3D Specialist Durability реализованы уникальные методики анализа композиционных материалов с короткими и непрерывными волокнами. Учитываются снижение прочности и перераспределение напряжений при воздействии сложных нагрузок в течение срока службы композитного материала. Кроме того, новые технологии сокращают объем усилий, затрачиваемых на тестирование для определения характеристик материалов.

Разумеется, решения, предлагаемые для композиционных материалов с короткими волокнами, отличаются от решений, предлагаемых для материалов с непрерывными волокнами.

Для компонентов, усиленных короткими волокнами и обычно используемых в неструктурных деталях, производственный процесс определяет ориентацию волокон, что существенно влияет на ее прочность и долговечность. Поэтому параметры усталостной прочности материала должны быть локальными: применяется подход на основе S-N кривой<sup>3,4</sup>.

Для компонентов, усиленных непрерывными волокнами и обычно используемых в структурных деталях, в разных направлениях материала (в продольном и поперечном направлениях, направлении сдвига и направлении вне плоскости) возникают различные явления, по-разному влияющие на локальную жесткость материала. Чтобы учесть эти локальные явления, в различных направлениях применяются законы ухудшения на уровне слоев<sup>5,6</sup>. Также можно применять законы разрушения для оценки отслоения из-за усталостных нагрузок<sup>7</sup>. Данные

законы позволяют в рамках одного анализа оценить как статическое (неправильное использование, движение по ямам на дороге и тротуару), так и усталостное разрушение (связанное с обычной эксплуатацией автомобиля, в частности с дорожной нагрузкой).

Эти законы были проверены в промышленных условиях в рамках исследовательских программ, в которых участвовали ведущие эксперты отрасли. В ходе этих программ проводилась серия испытаний для определения характеристик материалов. Не менее полезна и интеграция решений для разработки материалов (а именно Simcenter Multimech) в Simcenter 3D<sup>8</sup>, позволяющая выполнять многоуровневую симуляцию и в результате использовать знания о материалах в процессе структурной симуляции композитов.

Другой трудностью процесса разработки композитов из непрерывного волокна является подготовка и постобработка КЭ-модели. Simcenter 3D Laminate Composites — это специальный модуль, предназначенный для предварительной и постобработки многослойных конструкций из композиционных материалов. Простые в использовании инструменты определения композита позволяют инженерам-расчетчикам быстро создавать КЭ-модели конструкций, состоящих из многослойных композиционных материалов. С помощью этого модуля конструкторы могут оптимизировать и проверять конструкции из композиционных материалов, а также генерировать результаты слоев в виде графиков и электронных таблиц на основе напряжения результирующей оболочки и напряжений слоев, деформаций и мер разрушения.



Рис. 13: Композиционные материалы из коротких волокон.

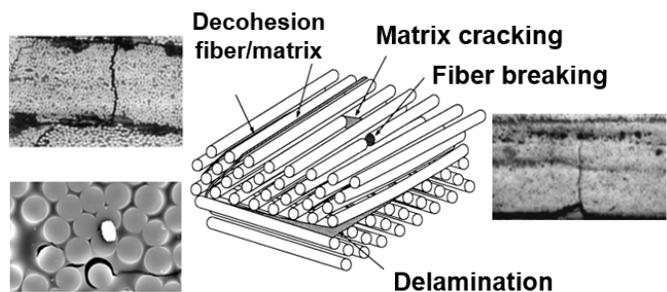


Рис. 14: Композиционные материалы из непрерывных волокон: явления прогрессирующего разрушения.

### Аддитивное производство

Аддитивное производство дает возможность создавать формы, которые ранее создать было невозможно. Появляются новые задачи, связанные с прогнозированием характеристик таких деталей.

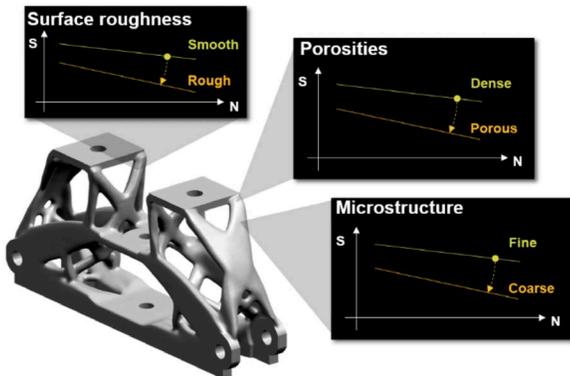


Рис. 15: Вариантность S-N кривых в геометрии компонентов, изготавливаемых с помощью аддитивного производства.

Основной проблемой при анализе усталости деталей, изготавливаемых с помощью аддитивного производства, является то, что S-N кривые меняются в зависимости от геометрии. В связи с особенностями этого производственного процесса шероховатость поверхности, уровни пористости и улучшения микроструктур в разных местах различаются. Эти факторы серьезно влияют на кривые S-N. Шероховатость поверхности уменьшает усталостную долговечность. Это также верно для конструкций с большим количеством пористых участков или для грубых микроструктур.

Сложность состоит в том, что эти факторы очень трудно контролировать. Они сильно зависят от геометрии, поэтому даже для одного компонента возможно множество вариантов. Проверить все возможные комбинации параметров невозможно физически.

Именно поэтому в основе решения Simcenter 3D Specialist Durability лежит машинное обучение<sup>9,10</sup>. В качестве отправной точки используется обширная база данных S-N кривых с различными комбинациями воздействующих факторов, которую можно дополнить данными заказчика. На ее основе можно спрогнозировать уровень шероховатости, пористость и микроструктуры на каждой сетке в геометрии, что позволит оценить срок службы компонента в целом. Критические области легко визуализируются, после чего можно выполнять итерации проектирования.

### Определение причины усталостного разрушения

Получить точные результаты в ходе симуляции очень важно, чтобы сделать правильные выводы. Чтобы улучшить конструкцию, нужно понимать не только, есть ли вообще

проблема и где она возникла, но и причины этой проблемы. Анализ в CAE-системе на ранних этапах разработки автомобиля также помогает определить программу испытаний, которая будет выполнена после изготовления прототипа. Это устраняет необходимость проведения длительных и дорогостоящих испытаний для оценки сценариев, которые были бы оценены как безопасные.

Помимо эффективного поиска критических областей (рис. 8), решение Simcenter 3D Specialist Durability дает пользователю еще одну возможность: оно позволяет проанализировать, какие нагрузки оказывают влияние на критические области (рис. 16). Эти данные можно использовать для улучшения конструкции компонентов. Для этого нужно оптимизировать распределение нагрузок от мест приложения, которые оказывают наибольшее влияние на критические области. Это гораздо более эффективный подход, чем укрепление конструкции с помощью дополнительного материала. Еще одна возможность — это определение наиболее эффективных и простых методов испытания компонента, например, испытания на образцах, снятых с производства.

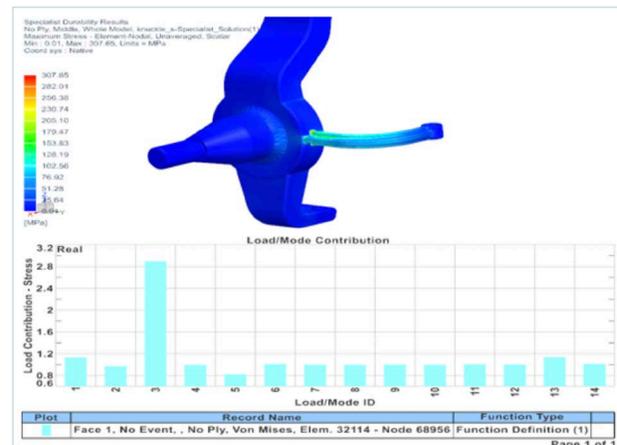


Рис. 16: Вклад нагрузки/формы колебаний.

Также предлагаются специализированные сценарии постобработки. Инженер-расчетчик, работающий в CAE-системе, может воспользоваться интеллектуальной сортировкой, основанной на сбоях и событиях, для лучшей оценки результатов. Сортировка по событиям, материалам, группам, параметрам долговечности, формулам, слоям композитов и т.д. позволяет получить нужный результат для оптимизации конструкции.

Наконец, простой доступ к определенным результатам в сочетании с мощными возможностями исследования области поиска оптимального решения с помощью Simcenter 3D Design Space Exploration (на базе HEEDS), позволяет быстро находить баланс между различными атрибутами и подбирать оптимальную конструкцию.

# Заключение

Комплексный цифровой двойник, предлагаемый в Simcenter 3D, помогает точно и эффективно проанализировать долговечность с помощью 3D CAE-инструментов в интегрированной среде.

Все начинается с получения данных по дорожным нагрузкам и прогнозирования нагрузок на уровне компонентов благодаря гибриднему подходу, сочетающему в себе интеллектуальную обработку данных испытаний и многотельной симуляций. Другая возможность — запуск многотельной симуляции с использованием цифровой дороги, виртуального водителя и точных моделей шин.

Можно без труда создать модель для расчета долговечности в CAE-системе благодаря полностью интегрированной и управляемой среде, обеспечивающей постоянную синхронизацию моделей симуляции с последней версией конструкции. Специалисты по расчету долговечности могут выбрать подходящие параметры анализа из обширной библиотеки или добавить собственные методики. Они также могут создать шаблоны, чтобы анализ долговечности могли выполнять другие пользователи, например, расчетчики более широкого профиля или конструкторы, использующие CAE-систему.

В решение интегрирован эффективный и хорошо зарекомендовавший себя в отрасли решатель долговечности, включающий в себя передовые инструменты для расчета усталости компонентов и соединений. Целый ряд методик, проверенных в рамках проектов по исследованиям и разработке новых технологий, выполняемых в университетах и промышленных компаниях, открывает совершенно новые возможности разработки материалов.

Наконец, постобработка позволяет определить критические области, различные события нагрузки и ситуации, что поможет улучшить конструкцию автомобиля (компонента) с точки зрения долговечности и одновременно сократить затраты на испытания.

С помощью Simcenter 3D Specialist Durability можно достигнуть баланса между целевым значением долговечности и другими атрибутами, такими как вес автомобиля, NVH, комфорт, жесткость и безопасность, еще до создания первого прототипа автомобиля.

## Истории успеха заказчиков

О решениях, описанных в этой статье, еще лучше расскажем заказчики Siemens.

Узнайте, как Fiat использует Simcenter 3D и Simcenter Tecware<sup>11</sup> для виртуальной валидации и верификации долговечности:

<https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/our-story/customers/fiat/69071/>

Узнайте, как центр исследований и разработки China FAW Co., Ltd. существенно сокращает затрачиваемое на разработку транспортных средств время и соответствующие расходы, используя решения и сервисы Simcenter по расчету долговечности:

<https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/our-story/customers/china-faw/16790/>

## Благодарности

Мы благодарим участников проекта CompFat, реализуемого доктором Атулом Джейном в рамках докторской диссертации по программе Baekeland PhD, финансируемой VLAIO (Государственное агентство Фландрии по инновациям и предпринимательству), при участии Siemens Digital Industries Software, а также кафедры материаловедения Левенского университета и Гентского университета. Защита докторской диссертации состоялась 4 мая 2015 года.

Мы также благодарим участников проекта ModelSteelComp, являющегося частью исследовательской программы SIM NANOFORCE, которая координируется компаниями Bekaert (Бельгия, до 2015 года) и ABV (Бельгия, с 2016 года), финансируется SIM (Strategic Initiative Materials, Фландрия) и VLAIO (Государственное агентство Фландрии по инновациям и предпринимательству).

Кроме того, мы выражаем благодарность участникам проекта SBO и IBO M3Strength и проекта IBO FATAM, являющимся частью исследовательской программы MacroModelMat (M3) (см. <https://www.sim-flanders.bel/research-program/m3/>), которая координируется компанией Siemens (Siemens Digital Industries Software, Бельгия) и финансируется SIM и VLAIO.

# Ссылки

- 1 Веб-страница, посвященная решениям Simcenter для расчета прочности и долговечности: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/industries/automotive-transportation/strength-durability.html>
- 2 Веб-страница Simcenter 3D: Predict performance of your 3D geometry-based designs; <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/simcenter/simcenter-3d.html>
- 3 A. Jain, W. Van Paepegem, I. Verpoest, S.V. Lomov, *A feasibility study of the Master SN curve approach for short fiber reinforced composites*, I.J. Fatigue, 91(1), 2016, стр. 264-274.
- 4 M. Hack, W. Korte, S. Straesser, M. Teschner, *"Fatigue simulation of a short fiber reinforced oil-filter under high temperature and pressure load"*, Procedia Engineering, Volume 213, 2018, стр. 207-214.
- 5 Carrella-Payan, D., Magneville, B., Hack, M., Naito, T., Urushiyama, Y., Yamazaki, T., Van Paepegem, W.: *Implementation of fatigue model for unidirectional laminate based on finite element analysis: theory and practice*. Frattura ed Integrita Strutturale 38, 184-190 (2016)
- 6 Hack, M., Carrella-Payan, D., Magneville, B., Naito, T., Urushiyama, Y., Yamazaki, T., Van Paepegem, W., *A progressive damage fatigue model for unidirectional laminated composites based on finite element analysis*. Frattura ed Integrita Strutturale 44 (2018)
- 7 Carrella-Payan, D., Magneville, B., Naito, T., Urushiyama, Y., Yamazaki, T., Allaer, K., Van Paepegem, W., Matveeva, A., Hack, M.: *Parameter Identification of delamination onset in mode I (UD and Angled-Ply interface) for static and fatigue simulation of CFRP*. Proc. Fatigue Des. (Senlis) 17 (2017)
- 8 Siemens adds material modeling to Simcenter through acquisition of MultiMechanics: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-adds-material-modeling-simcenter-through-acquisition-multimechanics>
- 9 M. Schultz, N. Lammens, M. Hack, H. Erdelyi, *"Machine Learning Enhanced Durability Analysis of Additively Manufactured Lightweight Components"*, NAFEMS Nordic Seminar, CAE in support of Sustainability and Durability, Billund, Denmark, 25-26 ноября 2019 г.
- 10 N. Lammens, M. Schulz, M. Hack, H. Erdelyi, *"Local Fatigue Parameter Prediction of Additively Manufactured Components using Machine Learning"*, Fatigue 2020, Downing College, Cambridge, UK, 29 июня – 1 июля, 2020 г.
- 11 Durability and Fatigue Life testing: Acquire & understand road load data to optimize strength and fatigue: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/simulation-test/durability-fatigue-life-testing.html>

## Siemens Digital Industries Software

### Штаб-квартира

Granite Park One  
5800 Granite Parkway  
Suite 600  
Plano, TX 75024  
USA  
+1 972 987 3000

### Северная и Южная Америка

Granite Park One  
5800 Granite Parkway  
Suite 600  
Plano, TX 75024  
USA  
+1 314 264 8499

### Европа

Stephenson House  
Sir William Siemens Square  
Frimley, Camberley  
Surrey, GU16 8QD  
+44 (0) 1276 413200

### Азиатско-Тихоокеанский регион

Unit 901-902, 9/F  
Tower B, Manulife Financial Centre  
223-231 Wai Yip Street, Kwun Tong  
Kowloon, Hong Kong  
Kowloon, Hong Kong +852 2230 3333

### О компании Siemens Digital Industries Software

Siemens Digital Industries Software помогает создать цифровое предприятие и шагнуть в будущее разработки, производства и проектирования электронных систем. Портфолио решений Xcelerator помогает компаниям самого разного размера создавать цифровые двойники, которые открывают новые возможности, позволяют получать ценные знания, переходить на новые уровни автоматизации и успешно внедрять инновации. Дополнительная информация по продуктам и услугам компании Siemens Digital Industries Software представлена на сайте [siemens.com/software](https://www.siemens.com/software), а также в социальных сетях [LinkedIn](#), [Twitter](#), [Facebook](#) и [Instagram](#).  
Siemens Digital Industries Software – Where today meets tomorrow!

[siemens.com/software](https://www.siemens.com/software)

© 2020 Siemens. Список товарных знаков Siemens представлен [по ссылке](#). Все прочие товарные знаки являются собственностью их владельцев.

82137-82655-C6-RU 10/20 LOC