

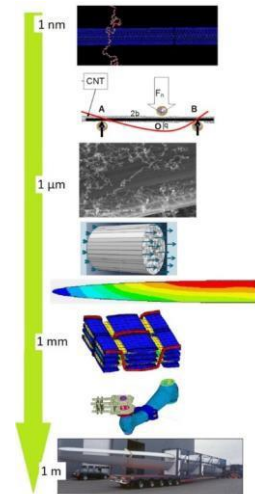
## Моделирование структуры и механических свойств волоконистых композитов от нано- до макроуровня.

Серия лекций в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого

### Степан Владимирович Ломов

Департамент инженерного материаловедения, Университет Лёвена (KU Leuven), Бельгия

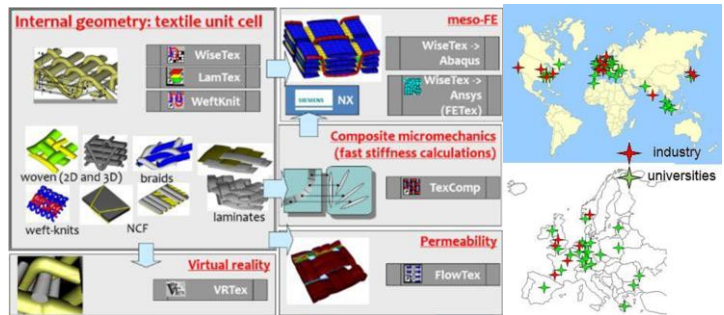
Серия лекций освещает современное состояние моделирования внутренней структуры и определяемого структурой механического поведения волоконистых композитов, с упором на текстильные композиты и многоуровневое (нано- и микроуровни) армирование. Лекции основываются на новых результатах автора и координируемой им группы «Композиционные материалы» в Университете Лёвена (KU Leuven), Бельгия.



## Лекция 1. Моделирование текстиля и текстильных композитов: внутренняя геометрия, механика, повреждаемость (WiseTex и вокруг него)

Лекция представляет «маршрут» моделирования внутренней архитектуры и механического поведения текстильных композитов, в основном композитов с полимерным связующим:

- **Общий подход к моделированию текстильных композитов:** механическое поведение композита определяемое структурой армирования, микро-мезо-макро иерархия текстильных композитов, структура пакета прикладных программ WiseTex
- **Геометрическая модель текстильного армирования:** кодирование структуры переплетения (2D и 3D ткани, плетёное армирование ...), создание геометрической модели; стохастика расположения волокон
- **Моделирование жесткости композита:** метод включений, его приложение к тканым ламинатам, трёхмерному армированию, трёхосным плетёным полотнам
- **Преобразование геометрической модели в конечно-элементную:** шаги преобразования; взаимопроникновение объёмов нитей; гомогенизация; моделирование повреждаемости

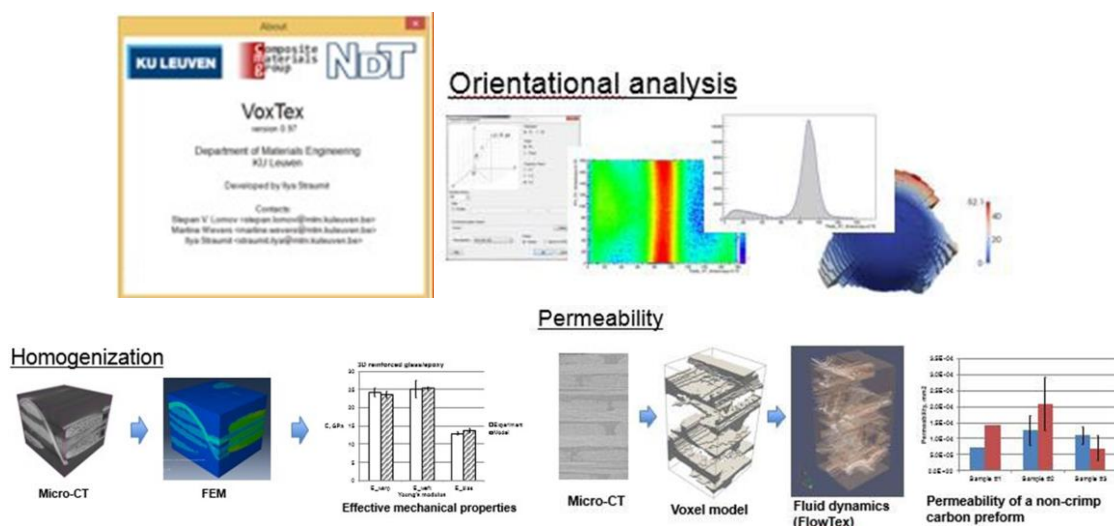


Пакет прикладных программ WiseTex и его пользователи в мире

## Лекция 2. Моделирование волокнистых композитов на основе микро-компьютерной рентгеновской томографии

В последние десятилетия микро-компьютерная томография ( $\mu$ СТ) широко применяется для волокнистых и текстильных композитов – благодаря быстрому развитию оборудования  $\mu$ СТ. Однако великолепные трёхмерные картинки не используются «на полную» как виртуальное представление текстильного материала, поскольку воксельная структура изображения не содержит информации о локальных направлениях волокон – информации, которая является важнейшей характеристикой волонистого армирования и волокнистого материала вообще.

**Программа VoxTex** (KU Leuven) с помощью методов обработки трёхмерных изображений получает информацию о локальных направлениях волокон, используя т.н. «тензор структуры». В результате получается трёхмерный массив вокселей, каждый из которых содержит информацию о (1) типе материала (связующее; нить или слой, с идентификацией внутри структуры ткани; пора); (2) локальном направлении волокон. Знание общего объёма нити или слоя позволяет присвоить вокселям также информацию о (3) локальной объёмной доле волокон. Эта воксельная модель может служить основой для различных видов анализа материала: внутренняя геометрия и описание дефектов, проницаемость, миромеханика, воксельные конечно-элементные модели.



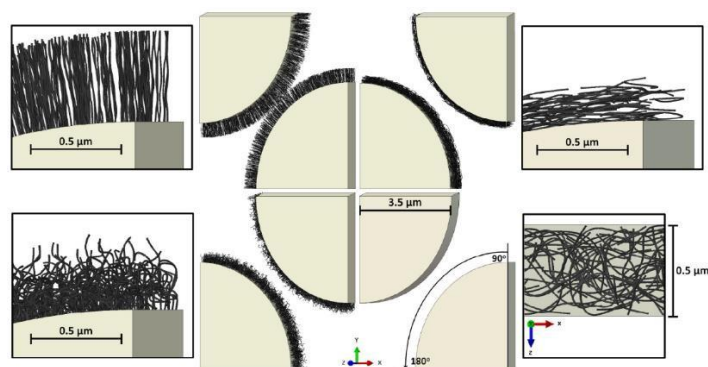
Модели внутренней структуры, микромеханики и проницаемости волокнистых композитов, основанные на  $\mu$ СТ



### Лекция 3. Моделирование волокнистых композитов с наноармированием используя многоуровневый конечно-элементный анализ

Масштаб наноармирования (например, углеродных нанотрубок), измеряемых нанометрами, в 1000 раз меньше масштаба армирующих волокон, измеряемых микрометрами. Посредством «погружения» конечно-элементной сетки, описывающей нанотрубки, в сетку, представляющую связующее, удастся решать трёхмерные задачи с тысячами нанотрубок помещённых между волокнами. Морфология нано-фазы (нанотрубки, выращенные на волокнах или распределённые в связующем, агломераты...) без труда и гибко моделируется, причём с учётом случайного распределения нанотрубок.

Гибкая двухуровневая модель позволяет изучать влияние нанотрубок на перераспределение и возможное подавление концентрации напряжений на микроуровне волокнистых композитов. С помощью модели можно строить разнообразные распределения нанотрубок: распределённые в связующем, выращенные на волокнах или организованные специальным образом. Наличие нанотрубок оказывает сильное влияние на гетерогенность полей напряжений. Лес нанотрубок, выращенных на волокнах, подавляет концентрации напряжений на поверхности волокон, но увеличивает напряжения в межволоконном пространстве. Агломераты нанотрубок ведут себя как жёсткие включения, увеличивая концентрацию напряжений. Перспективный путь для подавления концентраций напряжений – создание «сети» нанотрубок между волокнами.



Конечно-элементные модели волокнистых композитов с нанотрубками, различные конфигурации леса нанотрубок

## Лекция 4. Промышленные программные продукты для многоуровневого моделирования текстильных композитов – новые разработки Siemens PLM Software

### 4.1 Программные продукты Siemens для моделирования композитов (представляется специалистами Siemens)

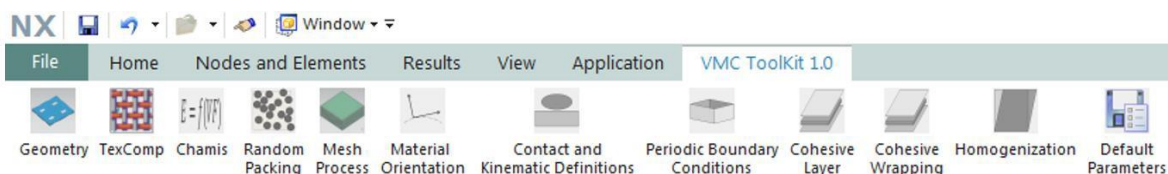
Технологии композиционных материалов занимают всё более серьёзные позиции на рынке. Это вызвано требованиями снижения веса, увеличения полезной нагрузки, снижения потребления топлива. Лёгкие композиционные материалы быстро завоёвывают позиции в автомобильной промышленности; это развитие в большой степени связано с экспериментом, поскольку средства компьютерного проектирования для композитов развиты недостаточно. Программные продукты Siemens PLM используются в промышленности для проектирования как композиционных изделий, так и процессов их производства. На базе работы с заказчиками в авиа- и автомобилестроительных секторах, Siemens PLM, вместе со своими партнёрами в промышленности и в университетах, разрабатывает средства моделирования повреждаемости, усталости, шума, акустики и вибрации.

### 4.2 Виртуальное исследование материалов (VMC) для текстильных композитов: новые программные средства NX Open (С.В. Ломов)

Siemens, в сотрудничестве с университетами Гента и Лёвена, разработал программные средства и процесс моделирования композитов. Основная цель: получение характеристик и параметров, описывающих механику материала на основе численного эксперимента, заменяющего натурные испытания образцов.

Основные элементы технологии:

- уровни моделирования от микро (волокна в нити) до мезо (текстиль или ламинат) и макро (деталь)
- CAD интерфейс к программе моделирования геометрии текстиля WiseTex (KU Leuven)
- быстрая гомогенизация с помощью программы TexComp (KU Leuven)
- конечно-элементная гомогенизация ORAS (университет Гента)

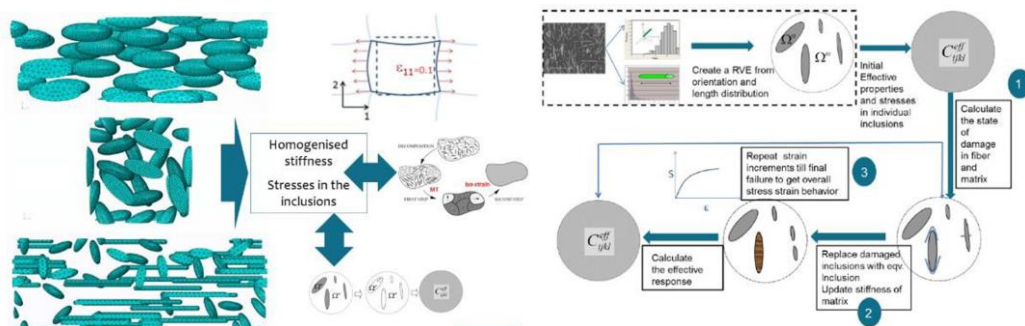


Программные средства NX Open для моделирования текстильных композитов

### 4.3 Моделирование композитов армированных короткими случайно расположенными волокнами: квази-статическое и усталостное нагружение (С.В. Ломов)

Моделирование механических свойств, зарождения и развития повреждаемости в композитах, армированных короткими случайно расположенными волокнами основывается на алгоритме гомогенизации Мори-Танака и на концепции эквивалентного включения с отслоением. Лекция начинается со сравнения различных вариантов гомогенизации Мори-Танака, в том числе используемых в коммерческих программах, и демонстрирует преимущества непосредственного применения алгоритма Мори-Танака.

KU Leuven и Siemens совместно разработали теоретические подходы и программную реализацию методов, позволяющих адекватно предсказать механическое поведение композитов, армированных короткими или изогнутыми волокнами: (1) гомогенизированные упругие свойства; (2) напряжённо-деформированное состояние индивидуальных включений; (3) напряжения на поверхности волокон и расслоение, вызванное этими напряжениями; (4) нелинейные кривые напряжение – деформация.



Моделирования случайно армированных композитов:  
сравнение вариантов гомогенизации по Мори-Танака и последовательность вычислений





# ПОЛИТЕХ

Институт передовых  
производственных технологий

**Проф. д.т.н. Степан Владимирович Ломов**

Координатор группы «Композиционные материалы»  
Кафедра композиционных материалов Toray  
Департамент инженерного материаловедения, KU Leuven  
Kasteelpark Arenberg 44, bus 2450  
3001 Leuven Belgium  
tel +32-16-32-12-10 secretary +32-16-32-13-00  
fax +32-16-32-19-90  
e-mail [stepan.lomov@kuleuven.be](mailto:stepan.lomov@kuleuven.be)  
[www.composites-kuleuven.be](http://www.composites-kuleuven.be)



Проф. Ломов координирует группу «Композиционные материалы» и возглавляет направление исследований «композиты на мезо- и макро-уровне»:

- текстиль и текстильные композиты
- композиты со случайным армированием (короткие и длинные волокна)
- механика гетерогенных сред
- моделирование и экспериментальное исследования механики композитов
- производство композитов, особенно формование и пропитка

*С.В. Ломов закончил школу №30 в 1972 г. и Физико-механический факультет ЛПИ (кафедра прикладной математики) в 1978 г. В 1978-1989 гг. работал во ВНИИ Трансмаш (Ленинград) в области бронеполитики, и получил степень кандидата технических наук в 1985 г. Затем в 1989-2015 гг. он был сначала научным сотрудником, затем профессором СПбГУТД, где получил степень доктора технических наук по текстильному материаловедению в 1995 г. С 2000 г. работает в KU Leuven, Бельгия.*

*В KU Leuven проф. Ломов руководил 17-ю защищёнными PhD и восемь аспирантов готовят диссертации под его руководством. Его международное сотрудничество охватывает многие страны мира, наиболее интенсивно в странах Европейского союза, Японии, США, Вьетнаме и России. Он является экспертом ЕС и нескольких национальных организаций, финансирующих научные исследования, в том числе русских «мегагрантов» и программы 5-в-100.*

*Проф. Ломов является координатором со стороны KU Leuven нескольких национальных и европейских проектов, а также исследований, напрямую финансируемых промышленностью, на сумму около 1,5 млн евро в год. Он является профессором кафедры «Композиционные материалы», организованной фирмой Toray в KU Leuven. Пакет прикладных программ WiseTex, созданный проф. Ломовым, используется более чем в 50 компаниях и университетах.*

*Проф. Ломов является (со)автором более чем 500 научных статей, включая более 200 в рецензируемых журналах. Он редактировал две книги, изданные Elsevier, и написал главы в десятке книг. Он является членом редакционных советов журналов Composite Science and Technology, Textile Research Journal, Mechanics and Industry, Composites and Nanostructures и членом программных советов конференций ECCM, ESAFORM, TexComp, CompTest, FPCM.*