

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И РОСТА ТРЕЩИН В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЯХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С.А. Бочкарева, Н.Ю. Гришаева, Б.А. Люкшин, С.В. Панин, Ю.С. Струков  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

В работе предлагается двухуровневый подход к моделированию наполненных полимерных композиционных покрытий, в основе которого лежит анализ прочностных свойств и деформационного поведения при контактном взаимодействии покрытия и контртела. Разрушение обычно связывается с параметрами напряженно-деформированного состояния (НДС) в локальных зонах, что подтверждает формулировку – «прочность является структурно-чувствительной характеристикой». Предлагаемые модели позволяют учитывать особенности структуры материала покрытия (геометрию, свойства включений, структурные особенности матрицы и т.д.), особенности взаимодействия на границе покрытие – подложка (пограничный слой, адгезию, рельеф подложки и т.д.) и на границе покрытие – контртело.

НДС защитного полимерного покрытия из композиционного материала анализируется методами механики деформируемого тела.

Вычислительный алгоритм основан на использовании метода конечных элементов и позволяет рассматривать геометрически и физически нелинейные процессы деформирования с использованием процедуры последовательных нагружений. Введением двойных узлов в конечно-элементной сетке реализуется возможность моделирования процессов трещинообразования и прорастания трещин в процессе нагружения. Исследовано влияние толщины покрытия, адгезии на границе покрытия и подложки на параметры НДС покрытия.

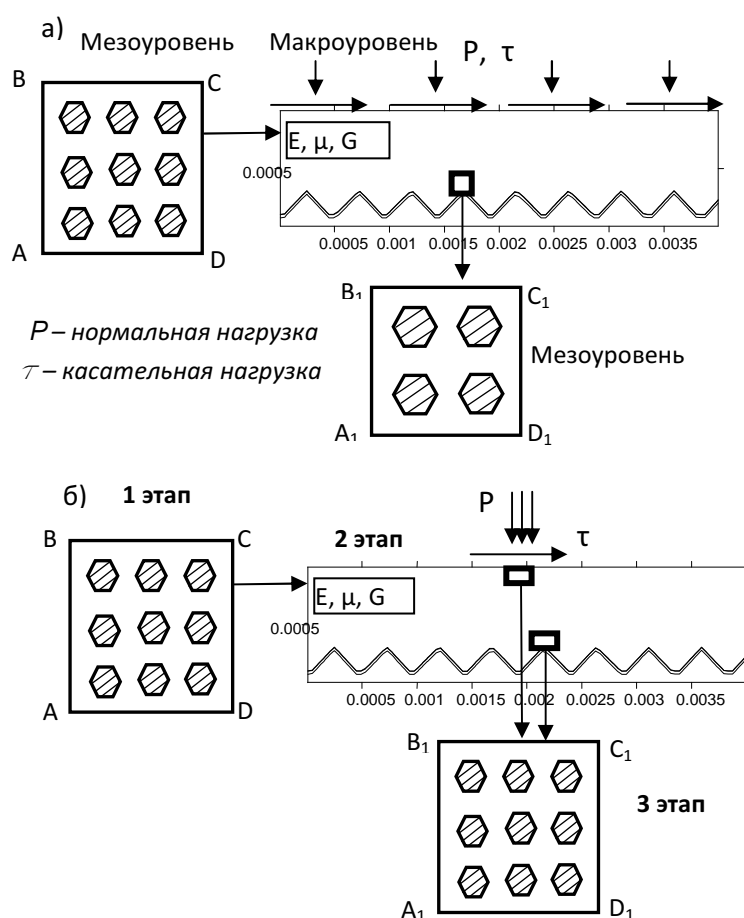


Рис. 1. Схема алгоритма определения параметров НДС покрытия

Износ покрытия при действии внешних нагрузок связан с его локальным разрушением, которое может быть обусловлено, в частности, тем, что армирующие добавки в полимерном покрытии являются концентраторами напряжений. В зонах концентрации напряжения могут значительно отличаться от средних значений, что и приводит к локальному разрушению. Масштаб включений, как правило, отличается от масштаба изделий на несколько порядков. Поэтому, при расчете параметров НДС полимерного покрытия задачи обычно решаются в предположении, что полимерное покрытие является однородным, и при его расчете можно использовать так называемые эффективные характеристики полимерной композиции.

Чтобы учесть структуру материала и оценить влияние включений на деформационно-прочностные характеристики изделия, предлагается изложенный

ниже алгоритм оценки прочностных свойств полимерного композитного покрытия.

На двух масштабных уровнях проводится анализ НДС покрытия (рис. 1 а).

На макроуровне (на уровне изделия) покрытие рассматривается как однородный материал с определенными эффективными деформационно-прочностными характеристиками, расчетная модель позволяет учитывать рельеф подложки и адгезию между покрытием и подложкой.

Зоны, в которых параметры НДС достигают максимальных значений, анализируются дополнительно на уровне матрица – включение (мезоуровне), позволяющем учесть наличие армирующих включений в материале явным образом. При этом на границах области (представительного объема) ставятся условия нагружения, полученные для соответствующих зон на макроуровне.

Расчет проводился на примере стальной подложки с трапециевидным рельефом и наполненного полимерного покрытия из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) при действии на поверхности покрытия распределенной и сосредоточенной нормальной сжимающей и касательной нагрузок (рис. 1 а, б).

Предлагаемый алгоритм состоит из трех последовательных этапов (рис. 1).

**На первом этапе** анализируется представительный объем наполненной полимерной композиции с учетом наличия фаз в явном виде [1 - 3], что позволяет получить детальные распределения параметров НДС в этом объеме при действии внешних модельных нагрузок. Как правило, это одноосное растяжение и чистый сдвиг. Осреднение полученных параметров по объему позволяет связать напряжения и деформации для заданного уровня внешней нагрузки, а объединение соответствующих точек на диаграмме в осях напряжения - деформации для разных уровней нагружения дает соответствующую диаграмму  $\sigma \sim \varepsilon$  для эффективных характеристик.

В плоской постановке задача определения НДС решается методом конечных элементов [4 - 6]. В явном виде учитывается наличие разных фаз – полимерной матрицы и армирующих включений, их взаимное расположение, характер взаимодействия, деформационно-прочностные свойства и т.д. Внешние нагрузки на первом этапе задаются как одноосное растяжение или чистый сдвиг, и сами по себе не имеют непосредственного отношения к эксплуатационной нагрузке, но позволяют (при соответствующем напряженном состоянии) с

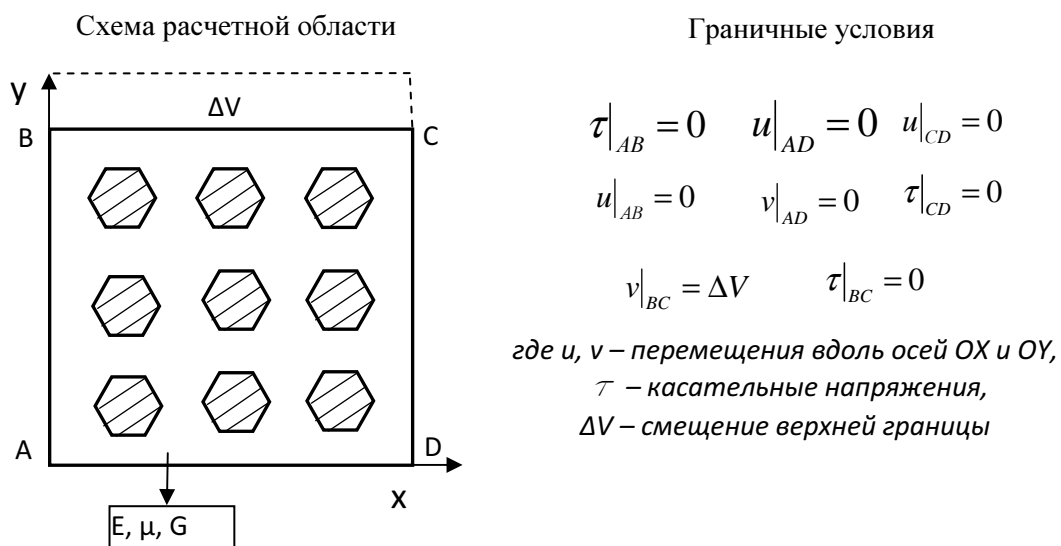


Рис. 2. Расчетная схема и граничные условия, соответствующие одноосному растяжению

использованием процедур осреднения оценить модуль упругости (модуль Юнга), коэффициент Пуассона и модуль сдвига.

На схеме (рис. 2) показан случай, когда одноосное растяжение представительного объема задается смещением одной границы прямоугольника вдоль оси, и это смещение определяет величину соответствующей средней деформации объема. На боковых границах АВ и CD используются известные условия «скольжения вдоль жесткой стенки», нижняя граница AD закреплена. Расчет НДС позволяет получить значения напряжений во всех точках объема (с точностью до размера конечно-элементной сетки), и затем найти средние значения напряжений по объему. Связывая полученные таким образом деформации и напряжения для разных уровней нагрузки, строим диаграмму  $\sigma \sim \varepsilon$  для эффективных характеристик.

Эти характеристики используются **на втором этапе** анализа, когда проводится расчет НДС покрытия в целом с учетом эксплуатационных нагрузок. Поскольку подложка имеет всегда шероховатость, что может быть связано как с чистотой обработки поверхности подложки, так и с заданным нанесением рельефа, анализ проводится ниже для случая, когда рельеф является регулярным, в виде равномерно расположенных зубцов трапецевидной формы.

В покрытии выделяются области, где напряжения и/или деформации являются экстремальными – за счет конкретного способа приложения нагрузки, рельефа подложки и т.д (рис. 1. а, б).

На этом уровне введением двойных узлов в конечно-элементной сетке реализуется возможность моделирования процессов трещинообразования и прорастания трещин в процессе нагружения, что позволяет учесть влияние адгезии между покрытием и подложкой. Условием возникновения трещин в этом случае являлось появление нормальных отрывных напряжений или соответствующих критериальных касательных напряжений

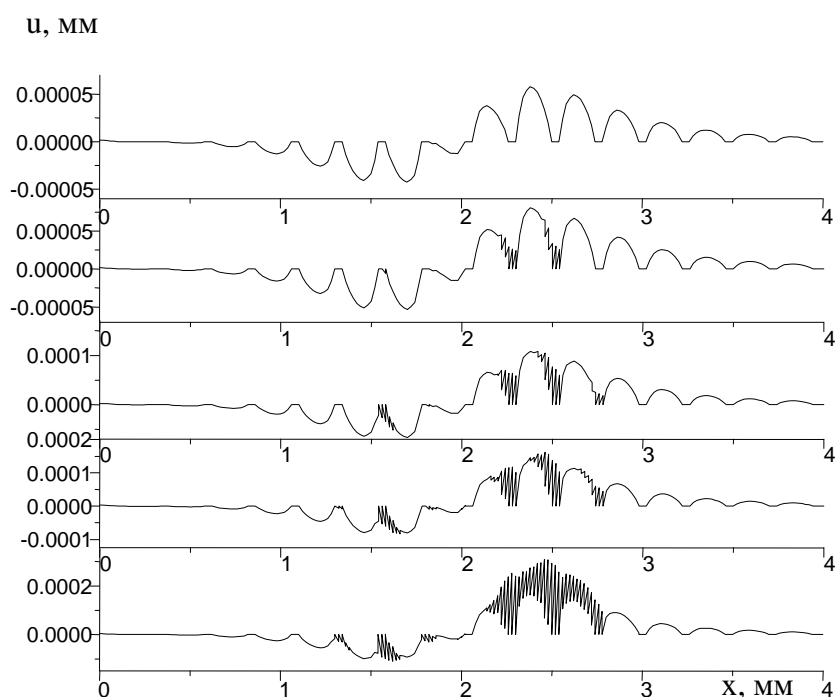


Рис. 3. Образование и рост трещин в последовательные моменты времени на поверхности контакта с регулярным зубчатым рельефом

На рис. 3 показаны результаты моделирования процессов возникновения и прорастания трещин в окрестности вершин зубцов. В отличие от гладкой поверхности когда возникновение трещины приводит к ее безостановочному росту, при регулярном рельефе трещины начинаются в окрестностях вершин, в общем случае не одновременно – что связано

с разным уровнем напряжений под индентором, и далее рост трещин может останавливаться за счет уменьшения напряжений в окрестности образующихся свободных поверхностей (рис.4). Иллюстрации относятся к последовательным этапам приложения нагрузки и соответственно этапам роста трещин.

Из наиболее опасных, с точки зрения прочности, областей «вырезается» область  $A_1V_1C_1D_1$  (рис. 1), которая снова подвергается анализу НДС. Масштаб «вырезанной» области выбирается таким образом, чтобы он был соизмерим с размером включений, что позволяет учесть форму, расположение, размер и свойства включений на конечно-элементной сетке.

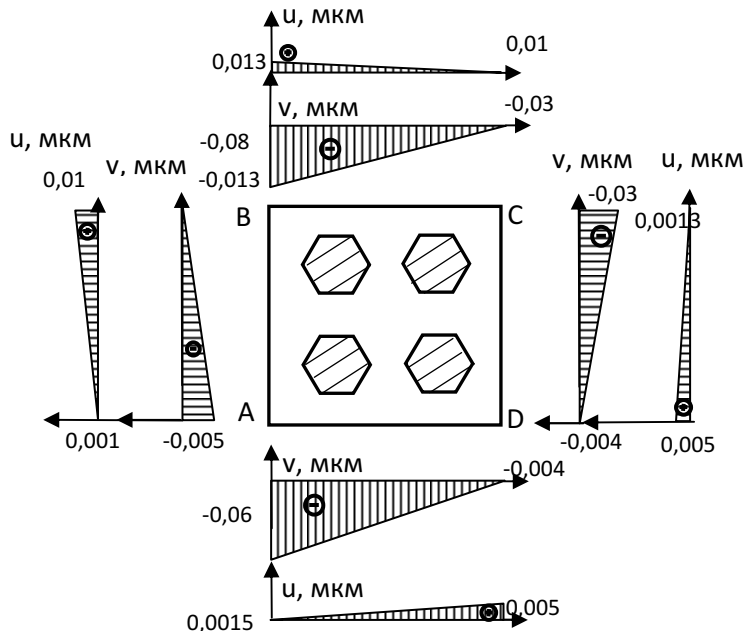


Рис. 5. Граничные условия на 3 этапе любой заданной области.

Таким образом, нагрузка будет соответствовать приложенной внешней нагрузке и влияние внутренней структуры материала на НДС будет учтено (рис.5).

Результаты расчетов получаются вновь в виде детальных распределений параметров НДС с учетом наличия реальных элементов структуры. В итоге получаются не осредненные по объему, а реальные распределения деформаций и напряжений, и прогноз прочности на основе этих распределений становится более оправданным и достоверным (рис.6).

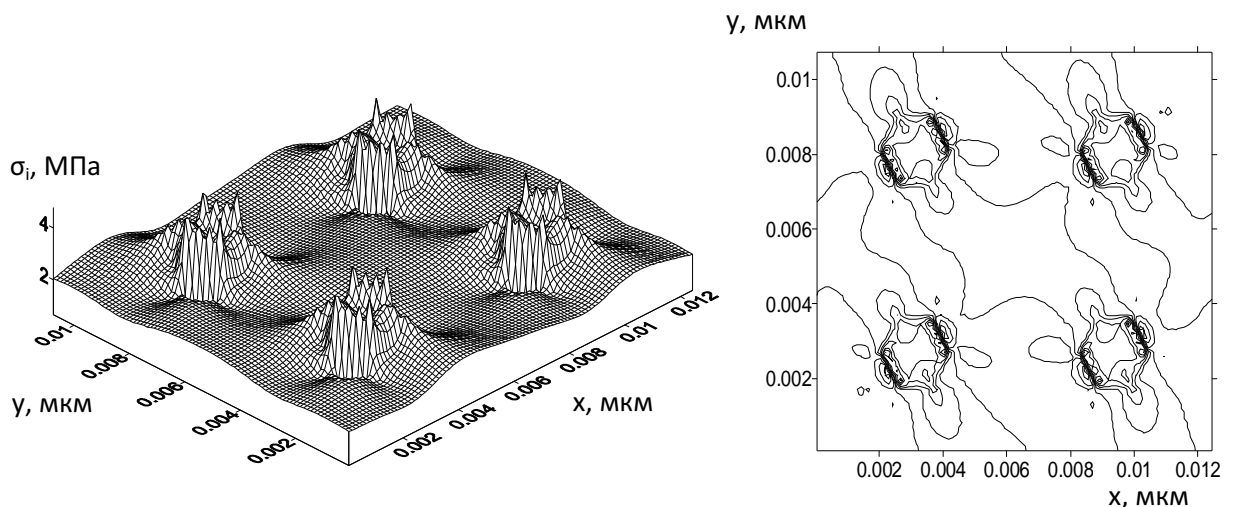


Рис. 6. Поверхности и изолинии распределения интенсивностей напряжений под действием нормальной и касательной внешних нагрузок для компактных включений (мезоуровень)

На третьем этапе проводится анализ НДС локальной зоны в масштабе, позволяющем вновь, как и на первом этапе, учесть наличие разных структурных элементов в материале. Этот объем подвергается действию уже не модельных, а реальных нагрузок, которые отражают собой сложный характер НДС, определенного на втором этапе в выделенной локальной зоне.

Воздействие внешней нагрузки учитывается заданием граничных условий. Метод конечных элементов позволяет определять значения напряжений или перемещений в элементах и узлах. Поэтому, используя линейную аппроксимацию, можно получить недостающие значения на границе

Таким образом, на третьем этапе решается та же задача, что и на первом. Отличия заключаются в том, что, во-первых, нагрузка является не модельной, а задается на основе анализа НДС покрытия; во-вторых, внутренняя геометрия образца в общем случае отличается от его геометрии на первом этапе.

Расчеты проводились для СВМПЭ, наполненного включениями компактной формы. Примеры распределения интенсивностей напряжений в виде поверхностей и изолиний интенсивностей напряжений, полученные на третьем этапе, приведены на рис. 6.

Расчеты показали, что для материала, наполненного включениями компактной формы, максимальные нормальные и касательные напряжения, интенсивности деформаций и напряжений в выделенном элементе покрытия увеличиваются в разы, когда анализ проводится с учетом наличия неоднородности материала. Для игольчатой формы включений при таких же степенях наполнения значения параметров возрастают намного больше.

Таким образом, расчетные значения экстремальных параметров напряженно-деформированного состояния, когда учитываются структурные особенности материала, изменяются не только количественно, но и качественно. Так, если на 2 этапе анализа в покрытии не обнаруживаются положительные (растягивающие) нормальные напряжения (которые могут привести к нарушению сплошности), то при расчете с учетом структуры на третьем этапе анализа при той же нагрузке нормальные «отрывные» напряжения возникают на границе матрица-включение, а касательные напряжения значительно больше, чем в выделенном для анализа объеме однородного покрытия. Это может привести к возникновению локального разрушения. Учет возможности локального разрушения важен особенно для материалов, у которых слабая адгезионная связь между включениями и матрицей.

Для материалов, наполненных компактными по форме включениями, увеличение размеров включений приводит и к увеличению максимальных напряжений за счет концентрации напряжений.

Предлагаемый метод анализа позволяет связать уровень внешней нагрузки, способ ее приложения, характеристики рельефа подложки, состав материала композиции с локальными распределениями параметров НДС и далее с прогнозом прочности материала покрытия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Люкшин Б.А., Панин С.В., Бочкарева С.А., Люкшин П.А., Матольгина Н.Ю., Осипов Ю.В.. Компьютерное конструирование наполненных полимерных композиций Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. 216с.

2. Дашук И.А., Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Матольгина Н.А. Влияние деформационно-прочностных свойств структурных элементов на характеристики дисперсно наполненных композиций // Механика композиционных материалов и конструкций. 2004. Том 10 № 3. С. 366-384.

3. Люкшин Б.А., Герасимов А.В., Кректулева Р.А., Люкшин П.А. Моделирование физико-механических процессов в неоднородных конструкциях. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 272с.

4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541с.

5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392с.

6. Справочник по строительной механике корабля. Пластины. Теория упругости, пластичности и ползучести. Численные методы. – Ленинград: «Судостроение», 1982, т.2, – 464 с.