

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНЫХ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ

И.И. Анисимов<sup>1</sup>, С.А. Бочкарева, Н.Ю. Гришаева, В.И. Десятых<sup>1</sup>, Б.А. Люкшин, С.П. Огородников<sup>1</sup>, Е.А. Чащихин<sup>1</sup>

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

<sup>1</sup> *ФГУП «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск, Россия*

При разработке новых высоконаполненных (до 70-80%) многокомпонентных (более 10-ти) полимерных материалов (ВНПМ) важную роль в формировании их свойств играют такие особенности как существенное (в разы) различие геометрических размеров и формы частиц наполнителя. Для различных типов наполнителей, находящихся в структуре ВНПМ, характерны определенные свойства и уровень адгезионного взаимодействия, для некоторых из них адгезионная связь с матрицей может полностью отсутствовать.

Для оценки деформационно-прочностных характеристик ВНПМ, наряду с существующими методами (методами физической химии, лабораторных экспериментов и т.д.) предлагается использование численных методов механики структурно-неоднородных сред и многоуровневых расчетных схем, что предполагает сокращение лабораторных экспериментов.

Предлагаемый подход позволяет учесть влияние свойств и геометрии фракционного состава ВНПМ, степени наполнения, разный уровень адгезионного взаимодействия.

Одним из способов определения эффективных физико-механических свойств наполненных полимерных систем является применение средств и методов вычислительной механики для определения параметров напряженно-деформированного состояния неоднородной среды под внешними воздействиями. Анализ проводится обычно для некоторой расчетной области конечных размеров. Эта область является представительным объемом материала, т.е. таким минимальным объемом, который позволяет судить о свойствах материала в целом. Для композитов регулярного строения в качестве представительного объема может служить ячейка периодичности. Для хаотически армированных материалов размер представительного объема определяется на основе сходимости результатов анализа при увеличении этого объема и в известной мере определяется требованиями к точности этих результатов [1].

Прямое моделирование с использованием конечно-элементных или конечно-разностных методов напряженно-деформированного состояния представительного объема материала, представляющего собой высоконаполненную полимерную композицию, наталкивается на значительные трудности. Это связано, в частности, с тем, что для таких композиций характерно наличие армирующих включений как с разными размерами, так и с различными физико-механическими свойствами. При использовании включений одного размера степень наполнения не может превзойти известного предела, т.к. образуются зоны, где новые включения таких же размеров не могут располагаться. Тогда в эти зоны вводятся включения меньших размеров, что повышает общую степень наполнения (отношение объема или массы включений соответственно к объему или массе всего материала).

Минимальный размер включений определяет размеры конечно-элементных ячеек. Как отмечено в [2], «дискретизация области, заполненной композитом, имеет существенные особенности. Дело в том, что для определения микронапряжений необходимо произвести это разбиение таким образом, чтобы вычислительная ячейка была много меньше ячейки периодичности». Применительно к композитам

нерегулярного строения это означает, что размер конечного элемента должен быть меньше, чем минимальный из размеров армирующих частиц. Понятно, что при наличии включений с размерами, отличающимися на два порядка и более, конечно-элементная сетка будет содержать неприемлемо большое число ячеек.

В связи с этим в работе реализован следующий подход [3], который можно назвать многоуровневым. Суть его заключается в том, что на первом этапе анализу подвергается область полимерной матрицы, содержащей наиболее мелкие армирующие частицы из всех типоразмеров, входящих в композицию. Для этой среды можно получить ее эффективные характеристики известными методами моделирования [1, 4 - 6] представительного объема соответствующих размеров. Эти характеристики используются для анализа на следующем уровне, когда анализируется расчетная область с включениями следующего типоразмера. После получения эффективных характеристик на этом уровне можно переходить к следующему, и т.д.

Этот подход позволяет с изменением расчетной области менять и минимальные размеры конечно-элементных ячеек, не нарушая сформулированного выше требования.

В качестве примера на рис. 1 приведена схема расчетной области в виде полимерной матрицы с армирующими включениями в виде компактных частиц. Целью работы является получение эффективных свойств модифицированной матрицы на первом уровне, которые далее могут использоваться для анализа композиции, содержащей крупные включения, с размерами на один-два порядка большие, чем для рассматриваемого случая.

Для полимерной матрицы, выступающей в качестве связующего, приняты деформационно-прочностные характеристики высоко-пластифицированного каучука с добавками. Кривая напряжения – деформации ( $\sigma \sim \varepsilon$ ) для такого материала определяется следующими параметрами: начальный модуль упругости 0.13 МПа, предел упругости по деформациям 10 %, предельная деформация 85...100 %, истинное

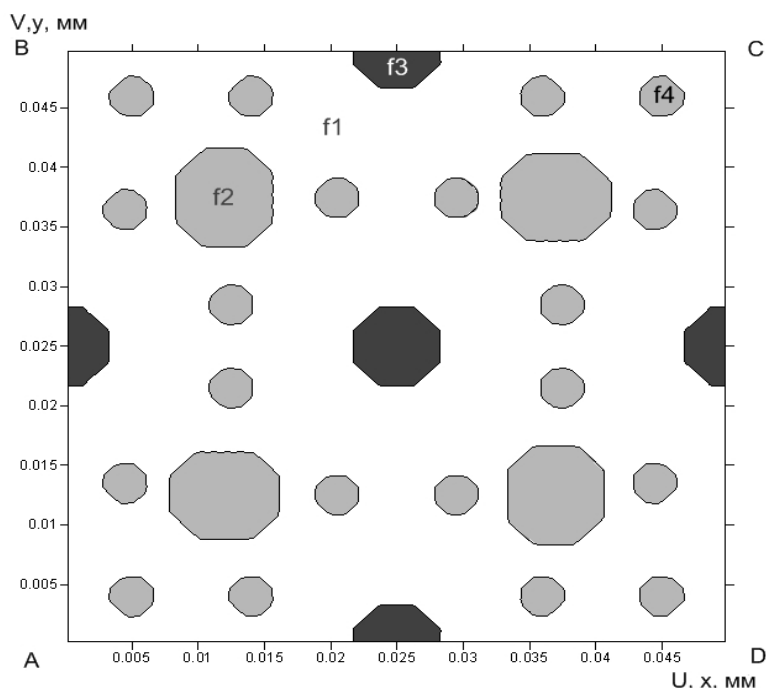


Рис. 1 – Расчетная область, наполненная включениями.

- f1 – связующее  $E = 0.13 \text{ МПа}$ ,  $\mu = 0.5$ ;
- f2 ( $7 \times 8 \text{ мкм}^2$ ) – наполнитель  $E = 71 \text{ ГПа}$ ,  $\mu = 0.315$  (7.68%);
- f3 ( $7 \times 7 \text{ мкм}^2$ ) – наполнитель  $E = 16.4 \text{ ГПа}$ ,  $\mu = 0.265$  (4.92%);
- f4 ( $3 \times 3 \text{ мкм}^2$ ) – наполнитель  $E = 71 \text{ ГПа}$ ,  $\mu = 0.315$  (5.6%)

предельное напряжение 0.04...0.07 МПа. В качестве наполнителя (армирующих включений) рассматриваются частицы трех размеров с отличающимися свойствами. Данные о размерах, форме и свойствах включений приведены на рис. 1. В работе рассмотрены два варианта одноосного нагружения представительного объема – вдоль осей OY и OX.

В первом случае граничные условия для одноосного растяжения вдоль оси OY: на линии AD перемещения  $V$  по оси OY и касательная составляющая нагрузки равны нулю:

$$V|_{AD} = 0, \sigma_{\tau} = 0$$

и в центральной точке на границе AD перемещения  $U$  по оси OX также задаются равными нулю.

На линии BC задано смещение  $V^*$  по оси OY, определяющее уровень нагрузки, при этом касательная составляющая нагрузки  $\sigma_{\tau}$  также отсутствует:

$$\sigma_{\tau} = 0, V|_{BC} = V^* = const,$$

а в центральной точке на границе BC перемещение  $U$  по оси OX равно нулю.

Здесь  $U, V$  - перемещения вдоль осей OX, OY соответственно;  $\sigma_{\tau}$  - касательная составляющая вектора напряжений на поверхности.

На двух других границах AB, CD приняты так называемые условия скольжения вдоль жесткой стенки, когда касательные к границе напряжения и нормальные смещения отсутствуют.

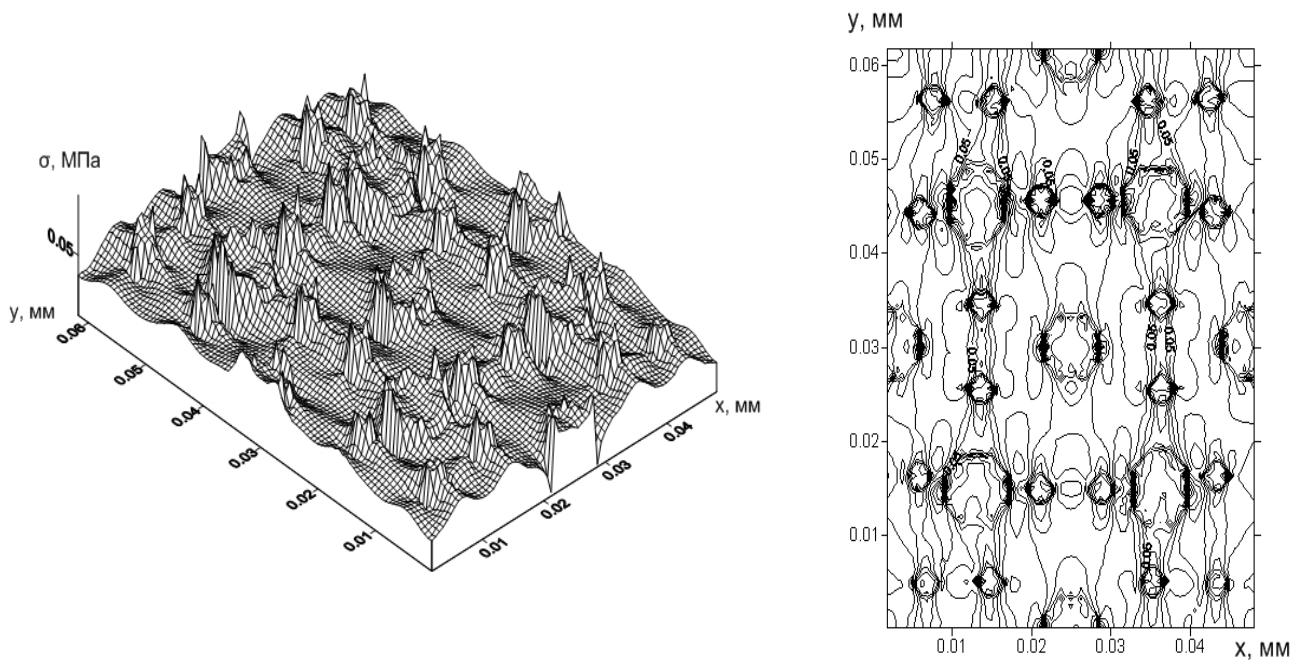


Рис. 2. Поверхность распределения интенсивностей напряжений и соответствующие изолинии при растяжении наполненной полимерной композиции вдоль оси OY

Распределения интенсивностей напряжений и деформаций для анализируемого объема показаны на рис. 2 и рис. 3 в виде поверхностей, отражающих зависимости соответствующих параметров от координат. Отчетливо прослеживаются большие градиенты этих величин в окрестностях включений, каждое из которых представляет собой концентратор напряжений. В то же время внутри относительно жестких включений как напряжения, так и деформации практически постоянны, причем

последние близки к нулю. Это вполне согласуется с физическими представлениями о характере распределения деформаций и напряжений в неоднородном материале.

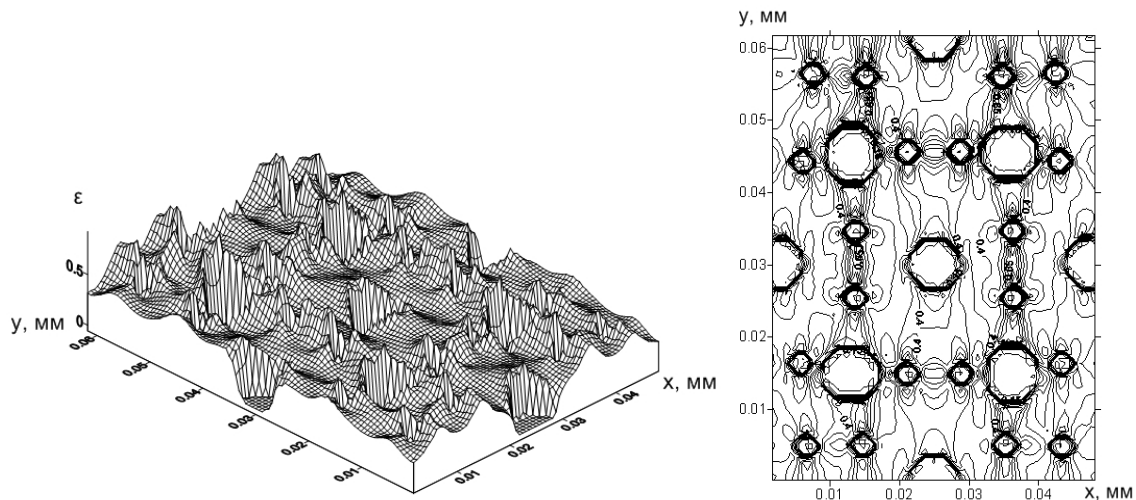


Рис. 3. Поверхность распределения интенсивностей деформации и соответствующие изолинии при растяжении наполненной полимерной композиции вдоль оси  $OY$   
 Граничные условия для одноосного растяжения вдоль оси  $OX$  полностью аналогичны таковым для предыдущего случая с учетом соответствующих обозначений:

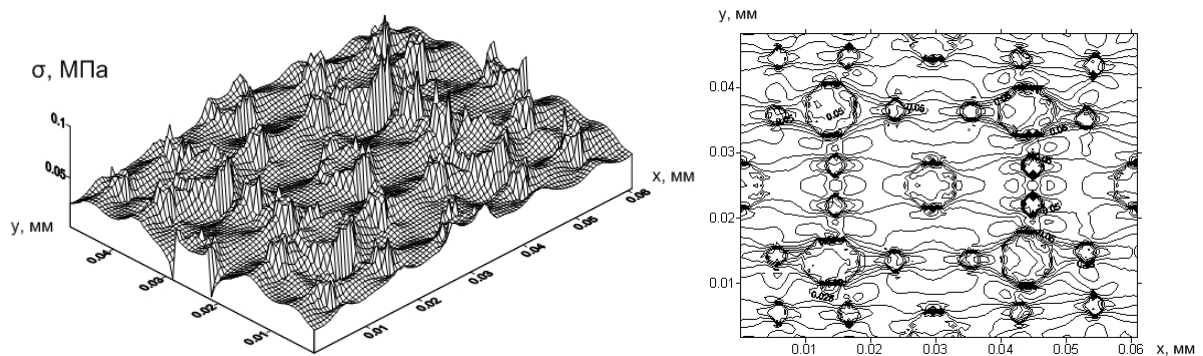


Рис. 4. Поверхность распределения интенсивностей напряжений и соответствующие изолинии при растяжении наполненной полимерной композиции вдоль оси  $OX$

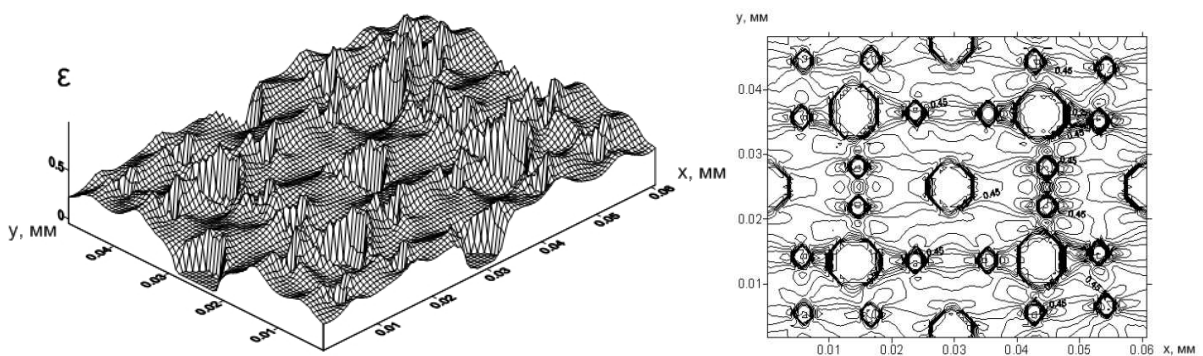


Рис. 5 Поверхность распределения интенсивностей деформации и соответствующие изолинии при растяжении наполненной полимерной композиции вдоль оси  $OX$

Результаты расчетов на рис. 4 и рис. 5 по своему характеру также близки к приведенным выше для растяжения представительного объема в другом направлении.

Небольшие отличия связаны с тем, что распределение включений в расчетной области не является инвариантным по отношению к повороту осей на  $90^0$ .

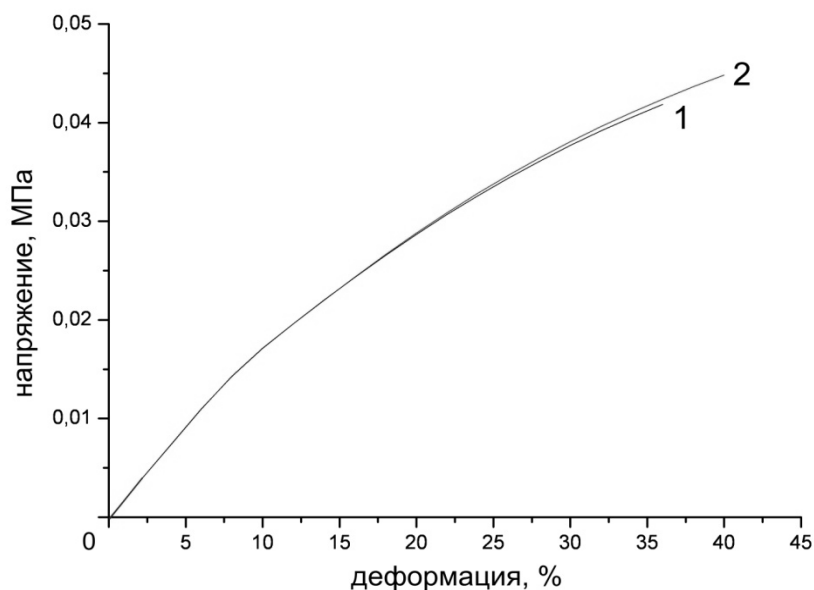


Рис. 6. Диаграммы  $\sigma \sim \varepsilon$  для композиционного материала в случае одноосного растяжения, 1 – вдоль оси ОУ, 2 – вдоль оси ОХ

На рис. 6 приведены диаграммы напряжения-деформации, соответствующие двум приведенным случаям приложения растягивающей нагрузки. При качественном согласовании результатов небольшие отличия можно объяснить теми же причинами, что и небольшие отличия в распределениях напряжений и деформаций. До определенного уровня деформирования эти кривые вообще практически совпадают. При деформациях около 30 % и выше кривые расходятся, а предельные деформации, отвечающие конечным точкам на кривых 1 и 2, отличаются примерно на 3 % (в абсолютных цифрах; для случая 1 это значение примерно 37 %, для 2 – около 40 %). Значения предельных деформаций получены следующим образом. Локализация деформаций в матрице, которая хорошо видна на приведенных распределениях (рис. 2-5), приводит к тому, что при среднем уровне деформаций, например, 37 % (случай 1, растяжение вдоль оси ОУ), в матрице деформации достигают предельных для материала матрицы значений. Для конкретности из указанного выше диапазона предельных деформаций 85...100 % в расчетах принималось значение 95 %.

Коэффициент Пуассона при растяжении материала в разные стороны получился одинаковым и равным  $\mu=0.46$ .

## ВЫВОДЫ

1. При относительно небольших отличиях в распределениях включений, или армирующих частиц, в матрице можно получить довольно большие отличия в эффективных характеристиках при больших деформациях, что особенно важно при оценке так называемых предельных состояний. Это означает, что анализ материала необходимо проводить с различными вариантами распределения включений в расчетной области, набирая статистику получаемых эффективных характеристик.

2. Для хаотически армированных материалов, которыми являются высокоэнергетические материалы, такая статистика необходима для получения средних значений (математического ожидания) и среднеквадратичного отклонения (дисперсии), которыми и нужно пользоваться при получении оценок предельных состояний. Эти оценки, в свою очередь, будут иметь вероятностный характер, что, по-видимому,

является неизбежным при анализе композиционных материалов со случайным распределением армирующих включений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Люкшин Б.А., Панин С.В., Бочкарева С.А., Люкшин П.А., Матолыгина Н.Ю., Осипов Ю.В. Компьютерное конструирование наполненных полимерных композиций. Томск: изд-во ТУСУР, 2007, 216 с.
2. Победря Б.Е. Принципы вычислительной механики композитов // Механика композиционных материалов, 1996, т. 32, № 6, с. 720-746.
3. Анисимов И.И., Бочкарева С.А., Десятых В.И., Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Матолыгина Н.Ю., Смолянинова Н.В. Эффективные деформационно-прочностные характеристики полимерной композиции с дисперсными включениями разных размеров // Физическая мезомеханика, 2006, т. 9, № 2, с. 11-15.
4. Анохина Н.Ю., Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Матолыгина Н.Ю. Компьютерное конструирование наполненной полимерной композиции с требуемыми деформационно-прочностными свойствами // Механика композиционных материалов и конструкций, 2009, т. 15, № 4, с. 600 - 609.
5. Оценка адгезионного взаимодействия фаз композиционного материала по кривой напряжения-деформации // Механика композиционных материалов и конструкций, 2010, т. 16, № 1, с. 97-105.
6. Люкшин Б.А., Панин С.В., Бочкарева С.А., Струков Ю.С. Двухуровневый подход к анализу НДС полимерного композиционного антифрикционного покрытия // Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред. Успехи, проблемы, перспективы. Труды Всерос. конф., приуроченной к 20-летию ИПРИМ РАН. Москва, 30 ноября – 2 декабря 2009 г. – М.: Альянстраснатом, 2010, с. 43-50.