

УДК 004.94 : 539.31

*В. А. КОВТУН<sup>1</sup>, В. Н. ПАСОВЕЦ<sup>2</sup>, М. МИХОВСКИ<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, Гомель, Беларусь*

<sup>2</sup>*Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск, Беларусь*

<sup>3</sup>*Институт механики Болгарской академии наук, София, Болгария*

### **3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ НАНОПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОМ СПЕКАНИИ**

Методом компьютерного моделирования исследовано напряженно-деформированное состояние нанонаполненной поликомпонентной порошковой системы при высокоскоростном электроконтактном спекании. Установлено, что максимальные напряжения возникают в углеродных нанотрубках, а напряжения, возникающие в микроразмерных частицах меди и полимера, достаточны для их деформирования. Полученные в данной работе результаты моделирования согласуются с основными положениями механики материалов и механики деформируемого твердого тела.

**Ключевые слова:** нанонаполненная порошковая система, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние.

**Введение.** Последние три десятилетия развития науки ознаменовались прогрессом в области синтеза различных типов материалов, обладающих наноразмерной структурой. Наибольшее распространение получили наноструктуры углерода, такие как фуллерены [1], углеродные нанотрубки (УНТ) [2], луковичные наноструктуры углерода (ЛНУ) [3].

Современными требованиями расширения ассортимента материалов триботехнического назначения, обладающих оптимальным сочетанием эксплуатационных свойств и физико-механических характеристик, обусловлен повышенный интерес к дисперсным нанонаполненным системам и их компонентам [4, 5]. При этом вопросы разработки функциональных металлополимерных композитов с дисперсными наноразмерными наполнителями высокэнергетическими методами на основе представлений о механизмах деформирования, трения и разрушения материалов представляют собой актуальное междисциплинарное научное направление.

Наиболее перспективными с точки зрения сохранения исходных параметров структуры являются энергонапряженные технологии с интенсивным термическим и деформационным воздействием на спекаемый материал. К числу подобных технологий относится электроконтактное спекание порошковых материалов, осуществляемое при нагреве пропусканием электриче-

ского тока с одновременным приложением механической нагрузки на спекаемую систему. При этом на контактах между спекаемыми частицами порошка наблюдается высокая концентрация энергии. Еще одним преимуществом метода электроконтактного спекания является совмещение в одной операции формования материала и непосредственно спекания порошка, что дает значительное сокращение временных и энергетических затрат.

На сегодняшний день разработка и получение конкурентоспособных изделий невозможны без применения информационных технологий. Разработка композиционных материалов, содержащих в своем составе наноразмерные компоненты, выполняемая методом проб и ошибок или же только с использованием экспериментально-статистического моделирования, в большинстве случаев приводит к недопустимым затратам времени и материальных ресурсов. По данной причине в последнее время наметилась тенденция к актуализации роли компьютерного моделирования в области материаловедения [6, 7]. Технические и технологические решения, которые реализуются на базе анализа численных экспериментов, во многих случаях существенно сокращают затраты ресурсов, необходимых для разработки новых материалов.

Учитывая сложность решения задач о взаимодействии дисперсных нано- и микроразмерных компонентов, моделирование композитных материалов необходимо проводить с использованием современных систем инженерного анализа, реализующих метод конечных элементов [8]. На рынке имеются пакеты прикладного программного обеспечения, включающие в себя программные инструменты для анализа целого ряда явлений и процессов, протекающих на стадии формирования структуры материала. В частности, пакет ANSYS [9–14], реализующий метод конечных элементов, позволяет выполнять решения сложных 3D-задач по расчету термонапряженного состояния композиционных материалов, содержащих в своем составе микро- и наноразмерные компоненты. Он дает возможность с высокой точностью рассчитать поля напряжений и тепловые потоки в композиционном материале в процессе технологического воздействия давлением и электрическим током. При этом численное моделирование позволяет определить и оптимизировать физико-механические характеристики материала и выявить его слабые места уже на стадии проектирования.

В настоящее время недостаточно изученным остаётся вопрос исследования влияния технологических параметров процесса электроконтактного спекания износостойких металлополимерных нанонаполненных композитов на напряжения и деформации в областях контактного взаимодействия структурных составляющих.

Поэтому цель представленной работы состояла в исследовании методами компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния порошковых металлополимерных нанонаполненных композиционных материалов в процессе электроконтактного спекания исходных компонентов.

**Методика моделирования.** Основными этапами расчета в программном комплексе ANSYS являются: построение геометрии исследуемого объекта; ввод свойств материалов; формирование граничных условий; генерация сетки конечных элементов; проведение расчета; визуализация и анализ результатов.

Разработаны расчетная схема и конечно-элементные модели для исследования напряженно-деформированного состояния, а также изучения механизма развития процессов консолидации компонентов металлополимерных нанонаполненных порошковых систем. Расчетные схемы мезофрагментов областей контактного взаимодействия структурных составляющих нанонаполненных металлополимерных дисперсных систем, построенные на основании микроструктурных исследований композиционных материалов на основе порошковых дисперсных систем «медь – ПТФЭ – УНТ», включают в себя фрагменты частиц меди, полимерного наполнителя в виде политетрафторэтилена (ПТФЭ) и углеродную нанотрубку (УНТ) (рисунки 1, 2).

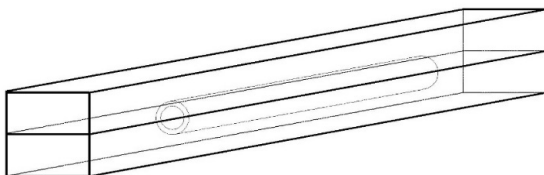


Рисунок 1 – Пространственное расположение компонентов мезофрагмента металлополимерной нанонаполненной порошковой системы

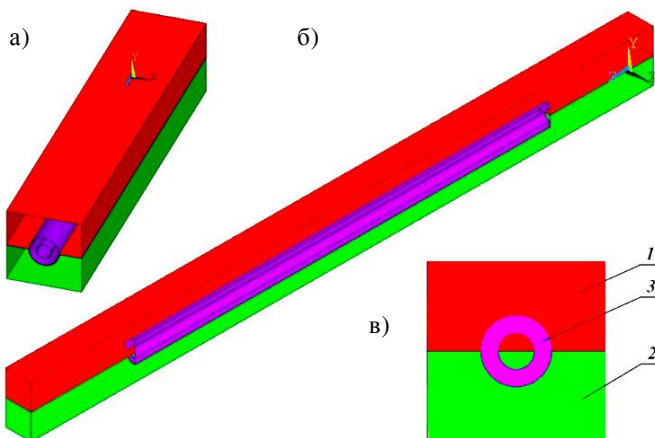


Рисунок 2 – Расчетная схема мезофрагмента металлополимерной нанонаполненной системы: *a* – аксонометрия; *б* – продольное сечение; *в* – поперечное сечение;

1 – микроразмерный компонент (медь или полимер); 2 – микроразмерный компонент (медь или полимер); 3 – углеродная нанотрубка

На основании расчетной схемы построены конечно-элементные модели (рисунок 3) мезофрагментов областей контактного взаимодействия структурных составляющих нанонаполненных металлополимерных дисперсных систем. При этом были исследованы следующие модели взаимного расположения компонентов в области их контактного взаимодействия, которые включают:

- 1) фрагменты двух частиц меди и одну УНТ;
- 2) фрагмент частицы меди, фрагмент частицы полимерного наполнителя и одну УНТ;
- 3) фрагменты двух частиц меди и одну УНТ.

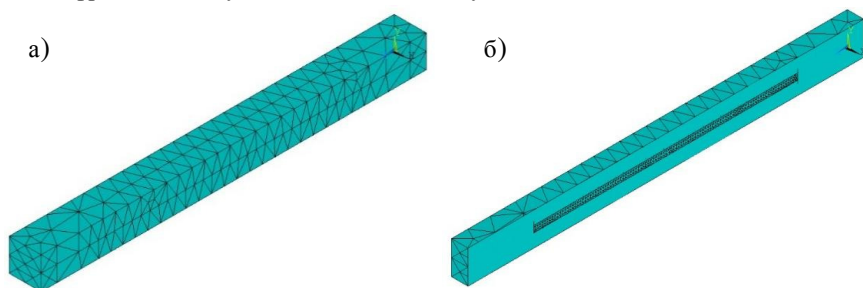


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель мезофрагмента трехкомпонентной металлополимерной системы:

*a* – 3D-изображение (общий вид), *б* – продольное сечение

Предполагалось, что деформирование частиц порошкового металлополимерного нанонаполненного материала происходит в соответствии с упругой моделью. Механические характеристики принимались следующими: частиц меди – модуль Юнга  $E_m = 110$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu_m = 0,37$ , УНТ –  $E_{унт} = 2000$  ГПа,  $\nu_{унт} = 0,18$ , ПТФЭ –  $E_n = 0,49$  ГПа,  $\nu_n = 0,45$ .

Для решения поставленной задачи была создана конечно-элементная сетка из элементов SOLID 186, содержащих 20 узлов. Каждый узел имеет три степени свободы. Моделирование контакта осуществляли посредством элементов TARGE 170 и CONTA 174. При этом число расчетных узлов (Nodes) составило 18711, число элементов (Elements) – 11523, что позволило достичь приемлемой точности решения.

Сила сжатия электродов опытно-промышленной установки в процессе электроконтактного спекания исследуемых композитов составляет 12000 Н, а площадь зоны спекания – около  $15 \text{ мм}^2$ . Поэтому, учитывая, что частицы меди и прикладываемое усилие прессования распределены равномерно, при задании граничных условий к каждому выделенному мезофрагменту материала прикладывалась сжимающая сила  $1,2 \cdot 10^{-6}$  Н.

**Результаты моделирования.** Исследовано влияние технологических параметров электроконтактного спекания на формирование напряженного состояния износостойких покрытий, установлены закономерности образования

полей внутренних напряжений. В ходе обработки результатов выяснилось, что напряжения, возникающие в УНТ, значительно выше напряжений в металлической матрице и полимерном наполнителе. Поэтому стандартное число градаций цветов на шкале, равное 9, оказалось недостаточным для проведения сравнительного анализа, т. к. невозможно достаточно точно визуализировать напряжения, возникающие в образце. Для получения картины напряжений в мезофрагменте трехкомпонентной металлополимерной системы с целью более подробного ее исследования изменялся масштаб цветовой шкалы с помощью Uniform Contours путем указания параметров VMIN Min contour value и VMAX Max contour value соответственно минимального и максимального значений, отображаемых на экране. В результате на картине напряжений серым цветом отмечены места, в которых значения отображаемого параметра превышают максимальное, предусмотренное пользовательской шкалой, зато исследуемый диапазон значений хорошо визуализирован по образцу.

Анализируя характер формирования напряженного состояния мезофрагмента порошкового покрытия, содержащего две частицы меди и УНТ (рисунок 4), можно отметить следующее. Картина распределения напряжений в УНТ неоднородна (рисунок 4, а). Максимальные эквивалентные напряжения возникают в точках, расположенных на обоих концах УНТ. При этом максимальная величина эквивалентных напряжений достигает 7000–8000 МПа. Средняя величина данных напряжений составляет порядка 2000–3000 МПа. Распределение эквивалентных напряжений в микроразмерных компонентах также носит неоднородный характер (рисунок 4, б). При этом значения максимальных эквивалентных напряжений, возникающих в зонах контакта частиц меди, не превышают 300 МПа. Среднее значение эквивалентных напряжений в частицах меди находится в интервале от 189 МПа до 241 МПа, что достаточно для пластического деформирования частиц порошковой матрицы.

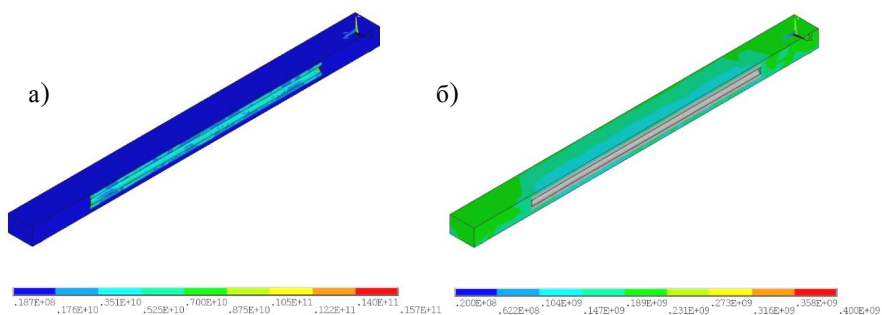


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой металлополимерной нанонаполненной системы, содержащей фрагменты двух частиц меди и УНТ, Па:  
 а – изображение с расширенной шкалой; б – изображение с ограниченной шкалой

Картина распределения напряжений в мезофрагменте порошкового материала, содержащего частицу меди, частицу полимера и УНТ, представлена на рисунке 5. Анализ порошковой системы, содержащей фрагмент частицы меди, фрагмент частицы ПТФЭ и одну углеродную нанотрубку, позволил установить, что напряжения в частицах меди составляют 100–150 МПа, в частицах полимерного наполнителя 12–14 МПа. При этом максимальные напряжения наблюдаются в наноструктурном наполнителе. Так, значения эквивалентных напряжений в УНТ достигают 3820 МПа, а их средняя величина в объеме составляет от 500 до 1000 МПа. При этом следует отметить, что полимерный наполнитель подвергается сильному деформированию, а напряжения, возникающие в нем, превышают предел текучести политетрафторэтилена.

Картина напряженного состояния мезофрагмента порошкового материала, содержащего две частицы полимера и УНТ, представлена на рисунке 6.

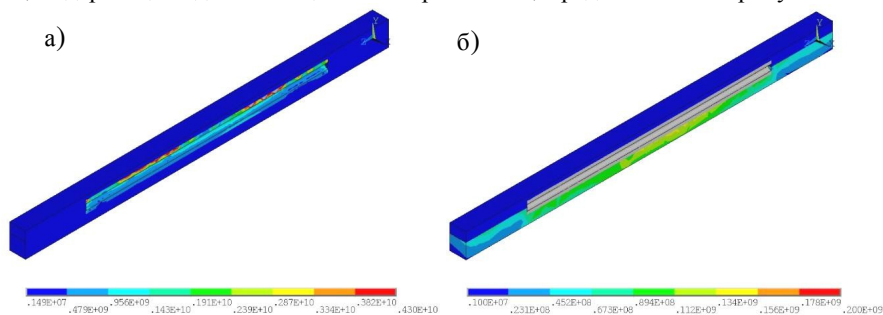


Рисунок 5 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой металлополимерной наноуполенной системы, содержащей фрагменты частицы полимера (сверху), частицы меди (снизу) и УНТ, Па:

*а* – изображение с расширенной шкалой; *б* – изображение с ограниченной шкалой

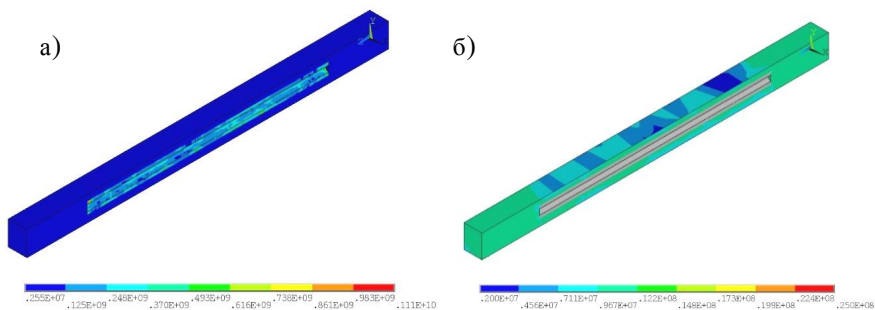


Рисунок 6 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой металлополимерной наноуполенной системы, содержащей фрагменты двух частиц полимера и УНТ, Па:

*а* – изображение с расширенной шкалой; *б* – изображение с ограниченной шкалой

Исследуя картину распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, можно отметить следующее. Напряжения, возникающие в частицах полимерного наполнителя, достигают значений 120 МПа, что превышает их предел текучести в 9–10 раз. Максимальные напряжения, возникающие в некоторых точках УНТ, достигают значений 1000 МПа. При этом среднее значение эквивалентных напряжений в УНТ в данном мезофрагменте составляет 125–248 МПа.

Из полученных результатов следует, что напряжения, возникающие в УНТ при технологическом процессе получения порошковых нанонаполненных композиционных материалов, не достигают предела текучести, что свидетельствует об их упругой работе. В результате такого эффекта углеродные нанотрубки не подвергаются критическим деформациям или разрушению.

**Заключение.** Авторами методами компьютерного моделирования проведено исследование взаимодействия нано- и микродисперсных компонентов порошковой металлополимерной системы в процессе получения композиционных материалов методом высокоскоростного электроконтактного спекания. Для этого была разработана геометрия мезофрагмента металлополимерной системы, определены свойства материалов, граничные условия и создана конечно-элементная модель, а также выполнен расчет эквивалентных напряжений по Мизесу.

В процессе моделирования было установлено, что максимальные напряжения возникают в углеродных нанотрубках, а напряжения, в микроразмерных частицах меди и полимера, достаточны для их деформирования. Полученные в данной работе результаты моделирования согласуются с основными положениями механики материалов и механики деформируемого твердого тела.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках международного проекта T17MC-015 (2017–2019 гг.).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Никитина, Ю. Н.** Структура и физические свойства фуллерена-C<sub>60</sub> / Ю. Н. Никитина, А. В. Зогова, З. А. Ягафарова // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – Т. 2. – С. 37–39.

2 **Раков, Э. Г.** Материалы из углеродных нанотрубок. «Лес» / Э. Г. Раков // Успехи химии. – 2013. – Т. 6. – № 82. – С. 538–566.

3 **McDonough, J. K.** Carbon Onions: Synthesis and Electrochemical Applications / J. K. McDonough, Y. Gogotsi // Electrochem. Soc. Interface Fall. – 2013. – No. 22 (3). – P. 61–66.

4 **Гусев, А. И.** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М. : Физматлит, 2007. – 416 с.

5 **Kovtun, V.** Tribological properties and microstructure of the metal-polymer composite thin layer deposited on a copper plate by electrocontact sintering / V. Kovtun, V. Pasovets, T. Pieczonka // Archives of metallurgy and materials. – 2017. – Vol. 62, No 1. – P. 51–58.

6 **Смирнов, В. А.** Моделирование и инструментальные средства численного анализа в нанотехнологии материаловедения: обзор / В. А. Смирнов, Е. В. Королев, А. В. Евстигнеев // Нанотехнологии в строительстве. – 2014. – Т. 6, № 5. – С. 34–58.

7 Компьютерное моделирование напряжений на фазовых границах в высокопрочном чугуна при горячем выдавливании / А. И. Покровский [ и др.] // Литье и металлургия. – 2017. – Т. 86, № 1. – С. 123–135.

8 **Плескачевский, Ю. М.** Компьютерное моделирование структуры и свойств композитов в нагруженных конструкциях / Ю. М. Плескачевский, А. О. Шимановский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 1 (34). – С. 41–51.

9 **Скворцов, Ю. В.** Моделирование композитных элементов конструкций и анализ их разрушения в САЕ-системах / Ю. В. Скворцов. – Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева. – Электрон. дан. – 2012 (CD-ROM).

10 **Бруйка, В. А.** Инженерный анализ в ANSYS WORKBENCH / В. А. Бруйка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.

11 **Лукьянова, А. Н.** Моделирование контактной задачи с помощью программы ANSYS / А. Н. Лукьянова. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 52 с.

12 **Морозов, Е. М.** ANSYS в руках инженера / Е. М. Морозов. – М. : ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.

13 **Огородникова, О. М.** Введение в компьютерный конструкционный анализ / О. М. Огородникова. – Екатеринбург : Уральск. гос. техн. ун-т, 2001. – 49 с.

14 **Шкловец, А. О.** Конструкционный анализ методом конечных элементов в САЕ-пакете ANSYS Mechanical / А. О. Шкловец. – Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева, 2012. – 53 с.

V. A. KOVTUN<sup>1</sup>, V. N. PASOVETS<sup>2</sup>, M. MIHOVSKI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Gomel branch of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

<sup>2</sup>University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>Institute of Mechanics of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

### **3D-SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF METAL-POLYMER NANOFILLED COMPOSITES AT HIGH-VELOCITY ELECTROCONTACT SINTERING**

In this paper, the stress-strain state of a nanofilled multicomponent powder system at high-velocity electrocontact sintering was investigated by computer simulation methods. It has been established that the maximum stresses occur in carbon nanotubes, and the stresses arising in microdimensional particles of copper and polymer are sufficient for their deformation. The simulation results obtained in this paper are consistent with the basic principles of the material mechanics and the deformable solid mechanics.

Получено 03.11.2018