

УДК 621.891:539.3

В. А. КОВТУН¹, В. Н. ПАСОВЕЦ², Ю. М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ³

¹Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Гомель

²Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Гомель

³Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, Гомель

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НАНОПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЖИМАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО СПЕКАНИЯ

Разработаны модели для нахождения напряженно-деформированного состояния порошковой системы, содержащей микроразмерные частицы меди и углеродные нанотрубки, при воздействии сжимающей нагрузки. Установлен характер распределения напряжений, возникающих в области контактного взаимодействия компонентов порошкового материала, включающего микроразмерные частицы меди и углеродные нанотрубки. Получены численные значения, позволяющие судить о величине возникающих напряжений в наноразмерных порошковых материалах при воздействии сжимающей нагрузки, что необходимо учитывать при осуществлении реальных технологических процессов получения новых композиционных материалов, обладающих высокими физико-механическими характеристиками.

На протяжении последних лет в различных областях науки и техники все более востребованными становятся объекты нанометрового масштаба: углеродные нанотрубки (УНТ), нанокомпозиты, тонкопленочные наноструктуры и т.д. Подобные системы интересны сочетанием ряда параметров, недостижимых для традиционных моно- и поликристаллических структур. Проблема создания твердотельных наноструктур с заданными свойствами и контролируемыми размерами входит в число важнейших проблем XXI века. Ее практическое решение вызовет революцию в электронике, материаловедении, химии, медицине и биологии [1].

Прогресс в области физических методов изучения твердых тел привел к более точным представлениям о структуре и свойствах твердых тел. Тем не менее, для детального описания электронного строения и химической связи в кристаллах, а также различных процессов на поверхности твердых тел использование только экспериментальных подходов оказывается недостаточным. Эффективность получаемых в экспериментах сведений во многом зависит от успеха их интерпретации, то есть в установлении корректных соотношений между спектральными и другими характеристиками вещества и

особенностями его электронной структуры. Поэтому физические методы исследования требуют также применения последовательных теоретических подходов и эффективных моделей. По сравнению с известными экспериментальными методами модельные представления имеют и самостоятельную ценность, так как при достаточной корректности могут обеспечить более полную информацию об особенностях электронного строения вещества, а также предсказать его возможные свойства и сферы применения.

Разнообразие новых и необычных механических, электрических и магнитных свойств нанотрубок обеспечивает основу прорыва в наноэлектронике и наномеханике. За последнее время нанотрубки из экзотических объектов уникальных экспериментов и теоретических расчетов превратились в предмет крупномасштабных физико-химических исследований, а их необычные свойства стали основой многих смелых технологических решений. Обнаруженные в экспериментах высокие значения механических характеристик и теплопроводности нанотрубок, а также достижения в синтезе открывают перспективы применения УНТ в композитах с целью создания новых материалов с уникальными свойствами, позволяют получать достаточно большие их количества, которые могут найти широкое применение в различных отраслях промышленности.

В то же время круг объектов, рассматриваемых как нанокompозиты, пока достаточно условен и включает весьма разнородные материалы, содержащие, например, в качестве одного из компонентов УНТ. К данным нанокompозитам также причисляют интеркалированные нанотрубки или нитевидные связи труб, упорядоченные слои нанотрубок в сочетании с различными матрицами, квазиодномерные волокна из однородных или неоднородных, соразмерных или несоизмерных нанотрубок. Так при получении нанокompозита на основе металлической матрицы и УНТ, введение нанотрубок в частицы металлической матрицы позволяет создавать композиционные материалы, отличающиеся высокими триботехническими и физико-механическими характеристиками, которые могут быть использованы в различных приложениях техники [2, 3].

Необходимо отметить, что вопросы формирования композиционных систем на основе дисперсной металлической матрицы и УНТ, а также разработка научно обоснованных методов управления их структурой и свойствами занимают одно их ведущих мест в современном материаловедении и являются предметом исследований многих научных центров мира, в том числе стран СНГ. При разработке новых композитов на основе металлической матрицы с наноструктурным углеродным наполнителем возникают серьезные проблемы, связанные с необходимостью обеспечения возможности проникновения жидкого металла внутрь углеродных нанотрубок, повышения смачиваемости поверхностей нанотрубок и однородности дисперсных нанонаполненных систем, что во многом определяется технологическими факто-

рами. Поэтому с точки зрения материаловедения исследование процессов структурообразования и изучение механизма интеркалирования нанотрубок металлом матрицы в порошковых системах микродисперсный металл – наночастицы углерода при высокоскоростном электроконтактном спекании представляется весьма сложной и нетрадиционной задачей. Необходимо отметить, что введение нанотрубок в дисперсные порошковые системы представляет интерес как метод повышения антифрикционных характеристик синтезируемых наноуплотненных композитов, а интеркалирование внутренних полостей углеродных нанотрубок металлом матрицы представляет интерес как метод повышения прочности получаемых материалов [4].

Оценивая уровень разработок и практической реализации в области исследования и получения наноуплотненных композиционных материалов на основе порошковых систем микродисперсный металл – углеродные нанотрубки методом высокоскоростного электроконтактного спекания, следует отметить, что ряд вопросов, касающихся влияния формы и размера частиц и природы материала матрицы на структуру и свойства наноуплотненных композиционных материалов, устранения агломерирования наноструктур углерода, управления когезионной и адгезионной прочностью материала на границе углеродная нанотрубка – металл, установления оптимального соотношения компонентов по критериям прочности и износостойкости, выявления и исследования эффектов, наблюдаемых при контактном взаимодействии частиц подобных систем, а также развития и управления процессами структурообразования, остается неясным и нерешенным [5].

При интенсивном силовом воздействии на компоненты порошковых систем микродисперсный металл – УНТ происходит одновременное протекание процессов разрушения и уменьшения размеров агломератов углеродных нанотрубок, распределения и закрепления наноструктурного наполнителя в поверхностном слое и в междендритном пространстве микроразмерных порошковых частиц металла, что в итоге обеспечивает рост числа контактов металл – металл. Проведенные ранее исследования показали, что в процессе предварительной силовой обработки порошковых систем при постоянных параметрах и энергии, подводимой к данным системам, одним из основных факторов, определяющих разрушение агломератов и распределение УНТ в металлической матрице, является время. Полученные ранее результаты экспериментальных исследований продемонстрировали [6], что оптимальная продолжительность механической обработки порошковой системы медь – наноструктуры углерода составляет 60 мин, обеспечивая при этом формирование износостойких материалов с пористостью 3–4 % и повышенным значением разрушающего напряжения при сжатии. Выявлены закономерности влияния методов предварительной подготовки смесей порошков меди и углеродных нанотрубок на характер контактного взаимодействия компонентов композиционного материала. При электроконтактном спекании порошковых

материалов температура на активном электрическом сопротивлении контактов частиц возрастает со скоростью 800–900 °C/с, что при длительности процесса спекания 1,2–1,5 с ведет к тепловому удару с последующим градиентным распределением температуры внутри материала.

Для порошковой микродисперсной матрицы, активированной по методу свободного удара, характерна осколочная форма частиц с большим количеством сколов, трещин и других положительных дефектов, обеспечивающих условия, когда углеродные нанотрубки с высокоразвитой контактной поверхностью легче присоединяются к металлическим частицам. Причем скорость протекания процессов присоединения в большинстве случаев тем быстрее, чем больше поверхность вещества, участвующего в процессе. Процесс высокоскоростного электроконтактного спекания порошковой системы микродисперсный металл – углеродные нанотрубки одновременно сопровождается пластическим деформированием материала матрицы, возникновением электромагнитного поля в объеме композиционной системы и интенсивным выделением тепла с образованием жидкой фазы в зоне физического контакта металл – металл. Интенсивная пластическая деформация приводит к значительным структурно-фазовым превращениям обрабатываемого материала. Одним из наиболее часто наблюдаемых следствий данного процесса является смещение температурных границ фазового перехода вещества, ведущее к сокращению времени термической обработки, повышению прочности и эксплуатационных характеристик конечного продукта при уменьшении энергетических затрат.

Определение поведения наноразмерных частиц в порошковом материале под воздействием сжимающих нагрузок представляет собой большие трудности. Широкомасштабные исследования НДС нанодисперсных порошковых материалов не проводились, существуют лишь отдельные работы, результаты которых сильно отличаются друг от друга в зависимости от метода исследования, что не дает оснований говорить о каких-либо закономерностях.

При изучении процессов контактного взаимодействия компонентов нанонаполненных систем на основе микродисперсной металлической матрицы возникают серьезные проблемы, связанные с резким отличием размеров и свойств контактирующих частиц. В связи с этим, системы «микродисперсный металл – углеродные нанотрубки» целесообразно рассматривать как структурную последовательность, включающую дисперсную матрицу, зону контактного взаимодействия и дисперсный наполнитель. Предварительные результаты экспериментальных исследований показали возможность управления процессами структурообразования, происходящими в матричных системах «микродисперсный металл – УНТ», а также позволили установить принципы повышения степени однородности данных систем и нанонаполненных композиционных материалов на их основе [7].

Таким образом одной из основных задач при получении композитов на основе порошковых систем микродисперсный металл – УНТ является исследование и прогнозирование напряженно-деформированного состояния (НДС) зон контактного взаимодействия поверхность частиц металла – углеродная нанотрубка. В данной работе приведены результаты исследования НДС фрагментов порошковых материалов, включающих микроразмерные частицы меди и УНТ.

Постановка задачи и методика проведения расчета. В соответствии с разработанной методикой адаптивного моделирования для оценки НДС и процессов контактного взаимодействия компонентов порошковых систем дисперсный металл – УНТ определены этапы модельных исследований, основными из которых являются: 1) создание модели мезофрагмента; 2) разработка расчетных схем; 3) ввод параметров моделирования; 4) ввод данных о свойствах материала компонентов; 5) установление условий однозначности модели; 6) ввод граничных условий; 7) расчет и получение результатов; 8) анализ результатов моделирования.

Разработанные расчетные схемы и компьютерные конечно-элементные модели мезофрагментов зоны контактного взаимодействия дисперсный металл – углеродные нанотрубки включают в себя:

- 1) две микроразмерные частицы меди и одну углеродную нанотрубку с внутренним диаметром 60 нм и внешним диаметром 100 нм, расположенную вертикально в наноразмерной поре (рисунок 1);
- 2) две микроразмерные частицы меди и одну углеродную нанотрубку с внутренним диаметром 60 нм и внешним диаметром 100 нм, расположенную горизонтально в наноразмерной поре (рисунок 2);

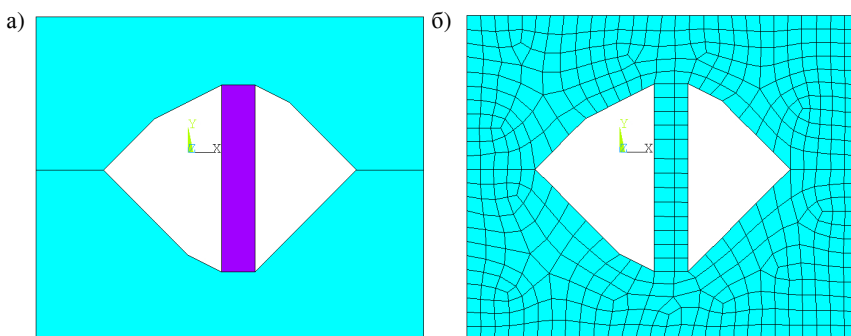


Рисунок 1 – Расчетная схема (а) и конечно-элементная модель (б) мезофрагмента зоны контактного взаимодействия с нанотрубкой, расположенной вертикально в наноразмерной поре

3) две микроразмерные частицы меди и две углеродные нанотрубки с внутренним диаметром 60 нм и внешним диаметром 100 нм, расположенные под углом в 45 градусов к горизонтальной поверхности в наноразмерной поре (рисунок 3).

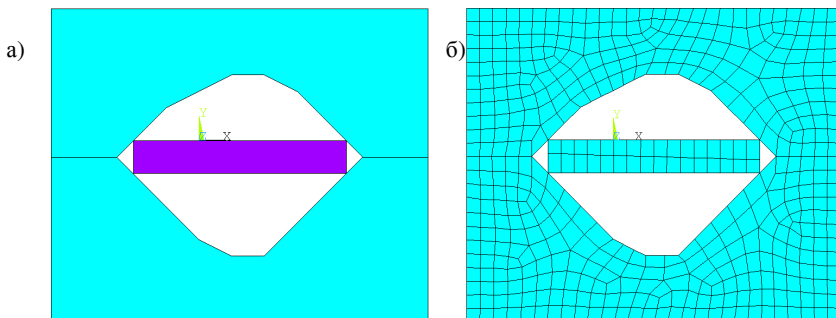


Рисунок 2 – Расчетная схема (а) и конечно-элементная модель (б) мезофрагмента зоны контактного взаимодействия с нанотрубкой, расположенной горизонтально в наноразмерной поре

Разработанные компьютерные модели имеют определенную степень идеализации, в частности не учитывается расстояние между слоями УНТ, составляющее $\approx 0,34$ нм, так как оно во много раз меньше по сравнению с размерами наночастиц углерода.

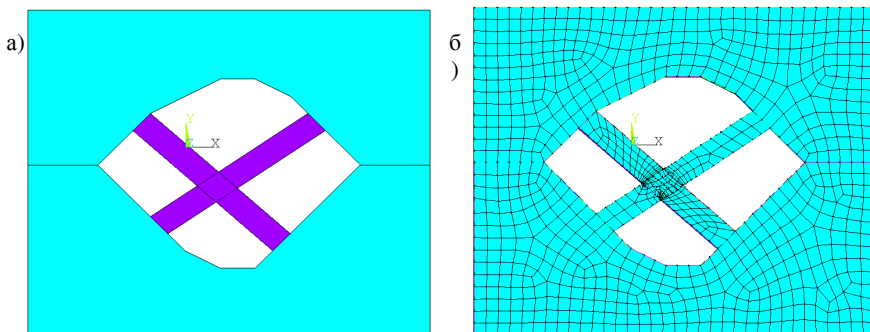


Рисунок 3 – Расчетная схема (а) и конечно-элементная модель (б) мезофрагмента зоны контактного взаимодействия с двумя нанотрубками, расположенными под углом 45 градусов к горизонтальной поверхности в наноразмерной поре

Деформирование частиц порошкового материала происходит в соответствии с упруго-пластической моделью: частиц меди (модуль Юнга $E_M = 110$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_M = 0,37$), многослойной УНТ ($E_{УНТ} = 2000$ ГПа, $\nu_{УНТ} = 0,18$). С учетом допущения, что сжимающая нагрузка

распределена равномерно, на каждый выделенный мезофрагмент материала действует сжимающая сила, равная 9,23 Н. Сжимающая сила определена из условия, что усилие сжатия электродов на опытно-промышленной установке для электроконтактного спекания составляет 12000 Н, площадь зоны спекания составляет порядка 15 мм², а диаметр одной частицы меди составляет 100 мкм. При этом компоненты системы взаимодействуют друг с другом сложным образом.

Разработанные компьютерные модели имеют ограниченную возможность перемещения нижних границ и основаны на результатах предварительных исследований структуры композиционных материалов на основе порошковых систем медь – УНТ (рисунок 4). Оценка НДС проводилась на основе решения плоской задачи теории упругости.

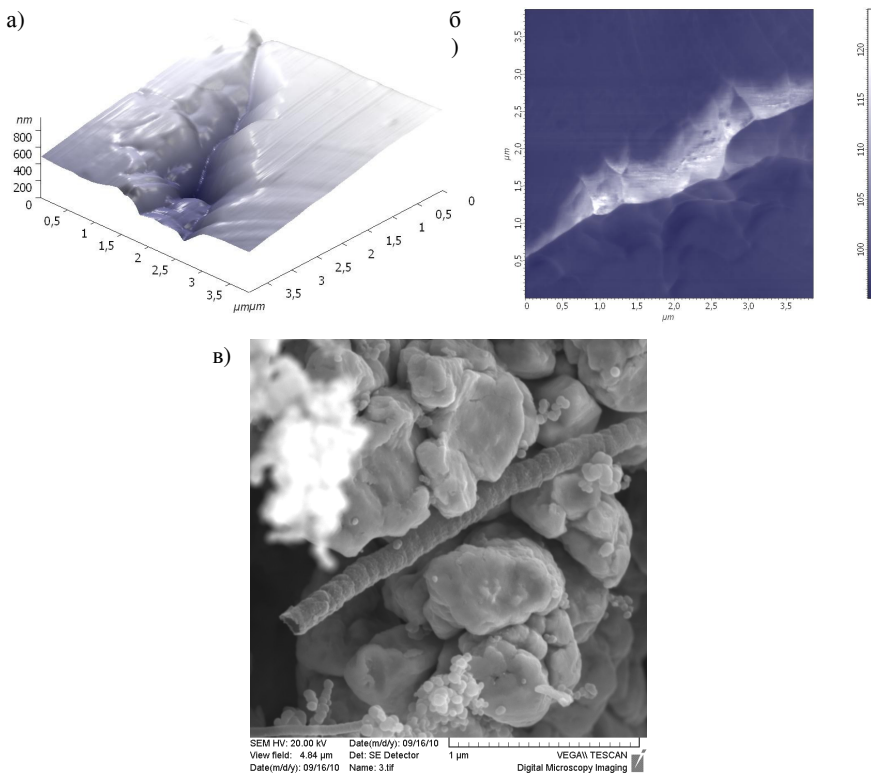


Рисунок 4 – Зона контактного взаимодействия частиц меди порошкового материала, содержащего 0,06 мас. % УНТ: а – 3D изображение; б – фазовый контраст; в – межчастичное пространство во вторичных электронах

Для исследования НДС фрагментов порошковых материалов использовался метод конечных элементов, реализованный в компьютерной программе ANSYS. Численное моделирование позволяет определить и оптимизировать прочностные характеристики материала и выявить уже на стадии проектирования его слабые места. Разбиение модели на конечные элементы выполнено в полуавтоматическом режиме с использованием подпрограммы Mesh Tool пакета ANSYS 11 [8]. При создании конечно-элементной сетки учитывалось, что точность метода конечных элементов зависит от правильного выбора типа и размера элементов дискретизации. Так, например, более частая сетка использовалась там, где ожидался большой градиент деформаций или напряжений. В то же время более редкая сетка применялась в зонах с незначительными изменениями деформаций и напряжений, а также в областях, не представляющих особого интереса.

Для решения поставленной задачи на частицах меди была создана конечно-элементная сетка из плоских четырехугольных элементов PLANE182, содержащих четыре узла. Каждый узел имел две степени свободы. Применение данного элемента дискретизации оказалось наиболее удобным для моделирования неравномерной сетки плоской модели на частицах меди, так как в нем заложена возможность пластической деформации. В то же время на УНТ генерировалась конечно-элементная сетка из плоских четырехугольных элементов PLANE42, содержащих четыре узла с двумя степенями свободы. При моделировании процесса контактного взаимодействия исходных компонентов порошковых материалов использовались специальные элементы TARGE169 и CONTA172, описывающие границу контакта плоского напряженно-деформированного тела.

Анализ результатов. С использованием подходов компьютерного моделирования плоского напряженно-деформированного состояния областей контактного взаимодействия композиционных нанонаполненных систем дисперсный металл – углеродные нанотрубки получены и исследованы поля распределения эквивалентных напряжений и деформаций.

Анализируя характер формирования НДС мезофрагмента порошкового композиционного материала, содержащего две микроразмерные частицы меди и одну углеродную нанотрубку (УНТ), расположенную вертикально в наноразмерной поре, можно отметить следующее (рисунок 5). Распределение эквивалентных напряжений в УНТ носит неоднородный характер. При этом максимальные эквивалентные напряжения возникают и наблюдаются в зоне контактного взаимодействия на границе раздела УНТ – нижняя частица меди, они имеют точечный характер и достигают значения 4250 МПа. Среднее значение эквивалентных напряжений в УНТ составляет 984–1920 МПа. В то же время величина напряжений непосредственно в частицах меди не превышает 518 МПа, а их средние значения составляют 234–268 МПа, что выше предела текучести меди. В результате наблюдается процесс пластиче-

ского деформирования дисперсных частиц меди с уменьшением объема образованных пор. Однако вертикальное расположение УНТ в поровом пространстве материала затрудняет протекание данного нестационарного процесса, что оказывает определенное влияние на структурообразование нанонаполненных композиционных систем.

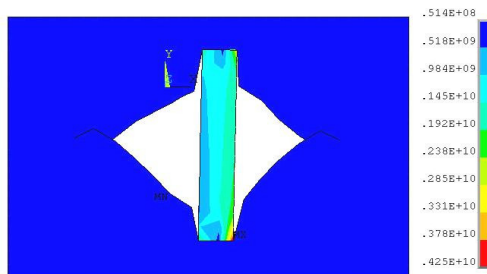


Рисунок 5 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой системы микроразмерная частица меди – УНТ, расположенная вертикально в наноразмерной поре, Па

Проведенные исследования характера распределения эквивалентных напряжений в мезофрагменте, содержащем две микроразмерные частицы меди и одну углеродную нанотрубку (УНТ), расположенную горизонтально в наноразмерной поре в зонах контактного взаимодействия на границах раздела компонентов порошкового материала, показали, что он также носит неоднородный характер (рисунок 6). При этом можно отметить следующее. Среднее значение эквивалентных напряжений в УНТ составляет 1050–1380 МПа. Максимальные эквивалентные напряжения возникают в зоне контакта УНТ – нижняя частица меди, имеют точечный характер и достигают значения 3040 МПа. В то же время величина напряжений в частицах меди не превышает 386 МПа, а их среднее значение составляет 228 МПа. Таким образом, в случае горизонтального расположения УНТ в поровом пространстве происходит более значительное уменьшение объема пор по сравнению со случаем вертикального расположения УНТ в поровом пространстве зон контактного взаимодействия. При этом сформированный нанонаполненный композиционный материал будет иметь более низкую пористость.

Картина напряженно-деформированного состояния нанонаполненной порошковой системы в области мезофрагмента, содержащего две микроразмерные частицы меди и две углеродные нанотрубки, расположенные под углом 45 градусов к горизонтальной поверхности в поровом пространстве (рисунок 7) имеет следующие особенности. Напряжения, возникающие внутри УНТ, достигают 2460 МПа, а их среднее значение составляет 828–1100 МПа. Средние значения эквивалентных напряжений в частицах меди составляют 200–220 МПа, а максимальное значение в зоне контакта частиц

меди достигает 300 МПа. Такое расположение УНТ затрудняет деформирование меди. Пора изменяет свои размеры незначительно.

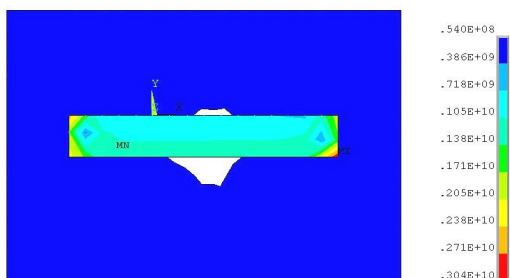


Рисунок 6 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой системы микроразмерная частица меди – УНТ, расположенная горизонтально в наноразмерной поре, Па

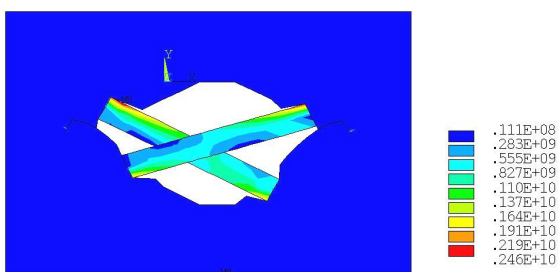


Рисунок 7 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой системы микроразмерная частица меди – УНТ, расположенными под углом 45 градусов в наноразмерной поре, Па

Основываясь на результатах представленных исследований можно отметить, что напряжения, возникающие в УНТ при технологическом процессе получения порошковых нанонаполненных композиционных материалов, не достигают предела прочности, что свидетельствует об их упругой работе. Таким образом, нанотрубки не подвергаются критическим деформациям или разрушению.

Необходимо отметить, что после достижения в частицах меди напряжений, превышающих предел текучести материала, происходит их пластическое деформирование. Материал частиц стремится заполнить межчастичное пространство. Как следствие, повышается плотность материала. В то же время увеличение размеров контактных площадок на поверхности частиц ведет к снижению контактного сопротивления между частицами.

В результате проведенных исследований получены данные о характере распределения напряжений, возникающих в компонентах композиционных

порошковых нанонаполненных систем в процессе их технологической обработки методом электроконтактного спекания, а также об изменениях структуры сформированных материалов. При этом найденные численные значения позволяют судить о величине возникающих напряжений в наноразмерных порошковых материалах при воздействии сжимающей нагрузки, что необходимо учитывать при осуществлении реальных технологических процессов получения новых композиционных материалов, обладающих высокими физико-механическими характеристиками. С практической точки зрения разработанные модели позволяют оптимизировать технологические режимы электроконтактного спекания композиционных материалов на основе порошковых систем микроразмерный металл – УНТ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Т11МС-014 «Моделирование процессов интеркалирования углеродных нанотрубок металлом матрицы при высокоскоростном электроконтактном спекании порошковых систем и установление механизма упрочнения нанонаполненных композитов»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Витязь, П. А.** Наноматериалы: от научных разработок к широкомасштабным внедрениям / П. А. Витязь, Э. М. Шпилевский, В. С. Урбанович // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах: сб. науч. ст. / редкол.: П. А. Витязь (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Изд. центр БГУ, 2011. – С. 3–12.

2 **Витязь, П. А.** Основы нанотехнологий и наноматериалов / П. А. Витязь, Н. А. Свидунович. – Минск: Изд. центр БГУ, 2011. – С. 3–12.

3 **Пасовец, В. Н.** Получение, свойства и безопасность композитов на основе порошковых металлов и наноструктур углерода / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун, Ю. М. Плескачевский; УО «Гомельский инженерный институт» МЧС Респ. Беларусь. – Гомель: БелГУТ, 2011. – 200 с.

4 **Физико-механические характеристики композиционных материалов на основе порошковых дисперсных систем медь – углеродные нанотрубки** / В. А. Ковтун [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2011. – Т. 55, № 1. – С. 91–95.

5 **Определение оптимального размера матрицы композиционного наноматериала на основе порошковых смесей меди и углеродных нанотрубок** / В. Ковтун [и др.] // Научни известия на НТСМ. – 2011. – Т. 19, № 1. – С. 48–51.

6 **Пасовец, В. Н.** Влияние механоактивации исходных порошковых компонентов на структурообразование и свойства композиционных материалов на основе систем медь – наноструктуры углерода / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун // Материалы, технологии, инструменты. – 2008. – Т. 13, № 3. – С. 87–93.

7 **Ковтун, В.А.** Механизм повышения прочностных свойств нанонаполненных композиционных материалов с медной порошковой матрицей / В. А. Ковтун, В. Н. Пасовец // Полимерные композиты и трибология: тезисы докладов международной науч.-техн. конф. Гомель, 27-30 июня 2011 г. / Редкол. В. Н. Адериха [и др.]. – Гомель: ИММС НАНБ, 2011. – С. 114–115.

8 ANSYS [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.ansys.com>. – Date of access: 20.01.2012.

V. A. KOVTUN, V. N. PASOVETS, YU. M. PLESKACHEVSKII

MODELING OF THE STRESS-STRAIN CONDITION FOR NANO-FILLED COMPOSITES UNDER THE IMPACT OF COMPRESSIVE STRESS IN THE PROCESS OF ELECTROCONTACT SINTERING

The model of the stress-strain condition for the powder system containing micro-particles of copper and carbon nano-tubes under the impact of compression load has been designed. The data on the nature of the distribution of stresses in the contact interaction of the components of the powder material including micro-particles of copper and carbon nano-tubes have been obtained. There have been got the numerical values to determine the largest emerging stresses in nano powder materials under the impact of compression load that must be taken into account in the implementation of the real technological processes for the production of new composite materials with high physical-mechanical characteristics.

Получено 20.04.2012

**ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 6. Гомель, 2012**

УДК 624.072.21.7

О. В. КОЗУНОВА, Е. А. СИГАЙ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ ИНЖЕНЕРНОЙ СИСТЕМЫ «ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНАЯ ШПАЛА – МНОГОСЛОЙНОЕ ОСНОВАНИЕ»

Строение железнодорожного пути моделируется в виде гибкого линейно-упругого элемента пути (железнодорожная шпала) и совокупности нелинейно-упругих слоев конечной толщины с переменным модулем деформации (многослойное основание). Для расчета упругого основания с учетом физической нелинейности слоев в работе используется метод конечных разностей в вариационной постановке (вариационно-разностный подход). Для реализации указанного подхода составлена программа на языке Mathematica 8.0 и проведена ее числовая апробация.

В инженерной практике часто встречаются балки, расположенные на многослойном упругом основании. К таким конструкциям относятся шпалы и рельсы железнодорожного пути, ленточные фундаменты зданий, днища резервуаров и др. Цель работы – исследование напряженно-деформированного состояния инженерной системы «железнодорожная шпала – многослойное основание».

Существующие методы расчета балок и балочных плит, расположенных на упругом основании, базируются на использовании теории линейно деформируемых тел. В реальных условиях для неоднородных грунтов зависимость между нагрузкой и осадкой имеет явно нелинейный характер [1, 2].