

УДК 621.891:539.3

В. А. КОВТУН¹, В. Н. ПАСОВЕЦ¹, Ю. М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ²

¹ *Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь*

² *Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, Гомель*

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НАНОПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО СПЕКАНИЯ

Разработаны модели термонапряженного состояния порошковой системы, содержащей микроразмерные частицы меди и углеродные нанотрубки, при электроконтактном спекании. Получены данные о характере распределения температуры, возникающей в области контактного взаимодействия компонентов порошкового материала. Полученные численные значения позволяют судить о величине возникающих температур в наноразмерных порошковых материалах при интенсивном тепловом воздействии, 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 получения композиционных материалов на основе нанонаполненных порошковых систем металл – углеродные нанотрубки.

Введение. В современных условиях прогресс в технике во многом зависит от разработок и широкого применения композиционных материалов [1]. Они обладают комплексом свойств и особенностей, отличающихся от исходных материалов, и открывают широкие возможности как для совершенствования изделий самого разнообразного назначения, так и для разработки новых конструктивных решений и технологических процессов. Создание композитов, всесторонний учет специфических особенностей их разработки и эксплуатации позволяют усилить положительные, снизить или свести до минимума отрицательные качества исходных компонентов, более полно использовать их потенциальные возможности и во многих случаях добиться уникальных и часто непрогнозируемых свойств материалов [2–4]. Основными предпосылками к широкому применению композиционных материалов в промышленности, наряду с их высокими эксплуатационными показателями, являются низкая трудоемкость производства, низкие капитальные затраты на организацию производства, высокие производительность труда, технологичность переработки и коэффициент использования материалов, а также возможность использования менее квалифицированного труда [5, 6].

В последнее время существенно возрос интерес к проблемам создания и использования порошковых композиционных материалов с металлической матрицей. По сравнению с другими композиционными материалами они

обладают рядом преимуществ благодаря комбинации положительных свойств металла матрицы и функциональных свойств наполнителей различного назначения (антифрикционного, упрочняющего, проводящего и т. д.). Свойства материалов с металлической матрицей обусловлены влиянием ряда факторов: свойств, количества и типа матрицы и наполнителей; вида распределения наполнителя в матрице; конструкции материала и технологии его получения; внешних воздействий [7, 8].

Композиционные материалы с металлической матрицей получают различными способами: твердофазного спекания (прокатка, литье, изотермическая ковка, экструзия); жидкофазного спекания (пропитка, литье); осаждением (химическое, электрохимическое, газофазное напыление); методами порошковой металлургии (спекание, прессование, сварка) и комбинированными методами [9–11]. Среди указанных способов именно методы порошковой металлургии дают широкие возможности создания композиционных материалов на металлической матрице. Они позволяют более дифференцированно управлять как фрикционными, так и прочностными свойствами, объединяя в одном материале несущую основу необходимой прочности и пластичности с различного рода наполнителями, играющими роль твердых смазок или активирующими процессы образования необходимых структур материала и вторичных структур трущихся слоев. Введение в состав композиционных материалов функциональных добавок позволяет также предотвращать явление схватывания поверхностей в процессе трения, создавать композиты с высокими триботехническими характеристиками [12, 13].

Одним из перспективных методов порошковой металлургии является электроконтактное спекание [14, 15]. Преимуществами данной технологии являются: высокая производительность (до 0,01–0,015 м²/мин); низкая энергоемкость; возможность получения спеченных изделий с незначительной пористостью; отсутствие необходимости использования защитной атмосферы; минимальная потеря порошкового материала; малая зона термического влияния электрического тока на изделие (0,2–1,0 мм), что в 6–10 раз меньше глубины распространения зоны термического влияния при электродуговой наплавке; возможность получения равномерных слоев в диапазоне от 0,5 до 4 мм, высокая степень автоматизации и благоприятные санитарно-гигиенические условия осуществления технологического процесса [16–19].

Необходимо отметить, что в настоящее время требования к узлам и агрегатам машин и механизмов постоянно повышаются за счет увеличения передаваемой мощности и снижения материалоемкости изделий. Таким образом, современный уровень развития конкурентоспособной техники требует разработки и применения новых композиционных материалов, обладающих высокими прочностными свойствами и износостойкостью. Одним из способов получения таких композитов является введение в порошковую матрицу наноструктур углерода, обладающих высокими триботехническими и физико-механическими характеристиками. Представляется перспективным при-

менение углеродных нанотрубок (УНТ) и луковичных наноструктур углерода (ЛНУ) на макроуровне в качестве антифрикционных и упрочняющих наполнителей композиционных материалов.

Необходимо отметить, что основной проблемой при получении композитов на основе порошковых систем микродисперсный металл – углеродные нанотрубки является исследование и прогнозирование термонапряженного состояния зон контактного взаимодействия поверхность частиц металла – углеродная нанотрубка. В данной работе приведены результаты исследования термонапряженного состояний фрагментов порошковых материалов, включающих микроразмерные частицы меди и углеродные нанотрубки.

Постановка задачи и методика проведения расчета. В соответствии с разработанной методикой адаптивного моделирования для оценки термонапряженного состояния компонентов порошковых систем дисперсный металл – углеродные нанотрубки методом компьютерного моделирования определены этапы модельных исследований, основными из которых являются: разработка расчетных схем, создание модели мезофрагмента, ввод параметров моделирования, ввод данных о свойствах материала компонентов, установление условий однозначности модели, ввод граничных условий, расчет и получение результатов, анализ результатов моделирования.

Разработанные 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);

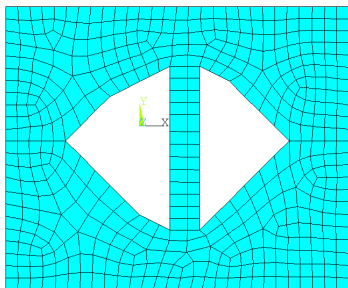


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель мезофрагмента зоны контактного взаимодействия с нанотрубкой, расположенной вертикально

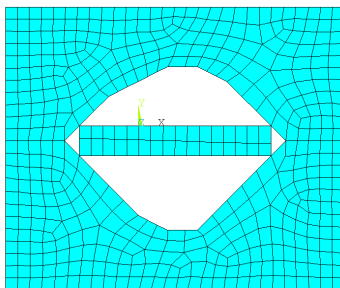


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель мезофрагмента зоны контактного взаимодействия с нанотрубкой, расположенной горизонтально

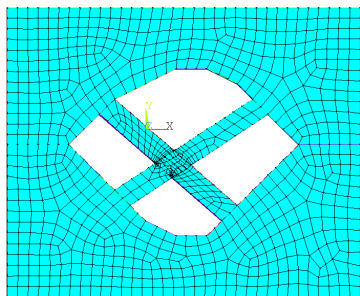


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель мезофрагмента зоны контактного взаимодействия с двумя нанотрубками, расположенными под углом 45 градусов

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).

Разработанные компьютерные модели в некоторой степени идеализированы, 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.

Исходные данные для расчетов взяты на основе предварительных исследований структуры композиционных материалов на основе порошковых систем медь – УНТ [20]. Термонапряженное состояние мезофрагментов зон контактного взаимодействия исходных компонентов порошкового материала определяли для следующих характеристик материалов: 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 частицы меди и прикладываемая сила прессования распределены равномерно, на каждый выделенный мезофрагмент материала действует сжимающая сила, равная 9,23 Н. Это значение определено из условия, что усилие прессования на опытно-промышленной установке для электроконтактного спекания составляет 12000 Н, площадь зоны спекания составляет около 15 мм^2 , а диаметр одной частицы меди – 100 мкм. Данная модель представляет собой периодически повторяющийся фрагмент области спекания порошкового материала, через который протекает электрический ток плотностью 450 А/мм^2 . При этом компоненты системы взаимодействуют друг с другом сложным образом.

Для исследования термонапряженного состояния фрагментов порошковых материалов использован метод конечных элементов, реализованный в компьютерной программе ANSYS. Разбиение модели на конечные элементы выполнено в полуавтоматическом режиме с использованием подпрограммы Mesh Tool. При создании конечно-элементной сетки учитывали, что точность метода конечных элементов зависит от правильного выбора типа и размера элементов дискретизации. Так, например, более частую сетку использовали там, где ожидался большой градиент температуры. В то же время более редкую сетку применяли в зонах с монотонно изменяющейся тепловой нагруженностью, 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 варианта дискретизации оказалось

наиболее удобным при моделировании 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.

Анализ результатов. Методами компьютерного моделирования исследовано термонапряженное состояние областей контактного взаимодействия композиционных нанонаполненных систем дисперсный металл – углеродные нанотрубки, получены и исследованы поля распределения температур.

Анализируя характер термонапряженного состояния мезофрагмента порошкового композиционного материала, содержащего две микроразмерные частицы меди и одну углеродную нанотрубку, расположенную вертикально в наноразмерной поре (рисунок 4), можно отметить, что распределение температуры в частицах меди носит неоднородный характер. Вид распределения вероятно связан с путями протекания электрического тока. При этом максимальные температуры наблюдаются в зоне контактного взаимодействия частиц меди, что объясняется повышенным сопротивлением окисных пленок на поверхности частиц меди и как следствие повышенным тепловыделением в данных зонах. Установлено, что в точках контактного взаимодействия частиц меди температура составляет 1083 °С, что достаточно для плавления меди, образования некоторого количества жидкой фазы и возникновения жидкометаллических мостиков. Более низкая температура в объеме металла, контактирующего с воздушной порой, объясняется отдачей тепла в воздух и искривлением линий тока, что также определяет более высокую температуру в областях контактного взаимодействия микроразмерных частиц меди.

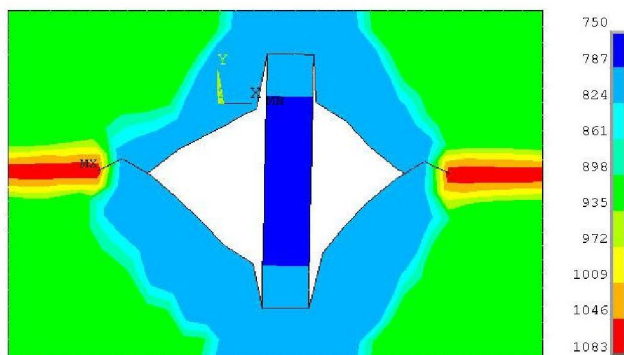


Рисунок 4 – Распределение температуры (°С) в области контактного взаимодействия компонентов порошковой системы микроразмерная частица меди – вертикальная УНТ

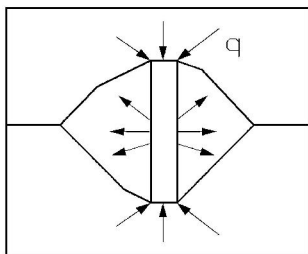


Рисунок 5 – Тепловые потоки q в области контактного взаимодействия компонентов порошковой системы микроразмерная частица меди – УНТ

Основываясь на результатах данных исследований можно констатировать тот факт, что температуры, возникающие в области контактного взаимодействия частиц меди, достаточны для частичного формирования жидкой фазы в процессе спекания. Среднее значение температуры в частицах меди составляет 850–870 °С. В то же время величина температуры в УНТ составляет 800–810 °С, что объясняется высокой теплоотдачей в объем поры. При этом температура в УНТ повышается за счет теплопередачи, а снижается за счет конвективного теплообмена, как это представлено на рисунке 5.

Анализ термонапряженного состояния мезофрагмента порошкового композиционного материала, содержащего две микроразмерные частицы меди и одну углеродную нанотрубку, расположенную горизонтально в наноразмерной поре (рисунок 6), показал, что максимальные температуры наблюдаются в зоне контактного взаимодействия частиц меди. Среднее значение температуры в частицах меди, как и в предыдущем случае, составляет 850–870 °С. Однако температура внутри УНТ составляет 980–1083 °С. Повышение температуры на поверхности УНТ связано, по-видимому, во-первых, с ее высокой теплопроводностью, а во-вторых, с проникновением некоторого количества металла матрицы внутрь УНТ под действием прикладываемого давления прессования и частичной реализацией капиллярного эффекта. Также необходимо отметить значительное уменьшение размеров нанопоры по сравнению с начальными размерами, что предположительно связано с интеркалированием УНТ металлом матрицы.

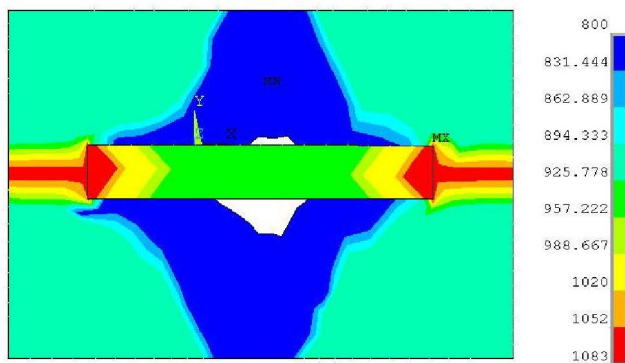


Рисунок 6 – Распределение температуры (°С) в области контактного взаимодействия компонентов порошковой системы микроразмерная частица меди – УНТ, расположенная горизонтально в наноразмерной поре

Исследование термонапряженного состояния мезофрагмента порошкового композиционного материала, содержащего две микроразмерные частицы меди и две углеродные нанотрубки, расположенные под углом 45 градусов в наноразмерной поре, не показало существенных различий по сравнению с термонапряженным состоянием мезофрагмента порошкового композиционного материала, содержащего две микроразмерные частицы меди и одну углеродную нанотрубку, расположенную вертикально в наноразмерной поре (рисунок 7). При этом максимальные температуры наблюдаются в зоне контактного взаимодействия частиц меди, что объясняется повышенным сопротивлением окисных пленок на поверхности частиц меди и, как следствие, повышенным тепловыделением в данных зонах. Среднее значение температуры в частицах меди составляет 850–870 °С.

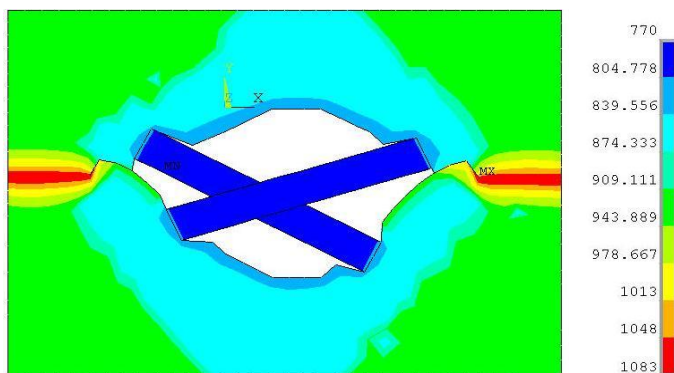


Рисунок 7 – Распределение температуры (°С) в области контактного взаимодействия компонентов порошковой системы микроразмерная частица меди – УНТ, расположенные под углом 45 градусов в наноразмерной поре

Значение температуры на поверхности УНТ составляет 790–800 °С, а в местах контактирования с медью – 840 °С, что несколько ниже, чем в двух предыдущих случаях, и, по-видимому, объясняется большим объемом воздуха, находящегося в поре.

Заключение. Методами компьютерного моделирования исследовано термонапряженное состояние областей контактного взаимодействия композиционных нанонаполненных систем дисперсный металл – углеродные нанотрубки, получены и исследованы поля распределения температур. Показано, что распределение температуры в частицах меди носит неоднородный характер, что предположительно связано с путями протекания электрического тока. При этом максимальные температуры наблюдаются в зоне контактного взаимодействия частиц меди, что объясняется повышенным сопротивлением окисных пленок на поверхности частиц меди и, как следствие, повышенным тепловыделением в данных зонах.

С практической точки зрения разработанные модели позволяют оптимизировать технологические режимы спекания композиционных материалов на основе порошковых систем металл – УНТ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Т13МС-008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2 **Белый, В. А.** Проблемы создания композиционных материалов и управления их фрикционными свойствами / В. А. Белый // Трение и износ. – 1982. – Т. 3, № 3. – С. 389–395.

3 **Васильев, В. В.** Композиционные материалы: справочник / В. В. Васильев, Ю. М. Тарнопольский. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

4 **Левина, Д. А.** Порошковая металлургия: объемы производства растут, конструкция изделий усложняется / Д. А. Левина, Л. И. Чернышев, И. И. Белан // Порошковая металлургия. – 2005. – № 5–6. – С. 125–128.

5 **Сердюк, Г. Г.** Технология порошковой металлургии: учебное пособие: в 2 ч. / Г. Г. Сердюк, Л. И. Свистун– Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2005. – Ч. 2: Формирование порошков. – 160 с.

6 **Браутман, Л.** Современные композиционные материалы / Л. Браутман, Р. Крок; под ред. Л. Браутмана. – М.: Мир, 1970. – 672 с.

7 **Крейдер, К.** Композиционные материалы с металлической матрицей / К. Крейдер. – М.: Машиностроение, 1978. – 503 с.

8 **Шоршоров, М.** Физико-химическое взаимодействие в композиционных материалах / М. Шоршоров // В кн.: Композиционные материалы. – М.: Наука, 1981. – С. 1–18.

9 **Мешков, В. В.** Проблемы создания триботехнических композитов на основе металлической матрицы / В. В. Мешков // Известия АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. – 1984. – № 1. – С. 116–120.

10 **Композиционные материалы:** сборник. – М.: Наука, 1981. – 303 с.

11 **Матусевич, А. С.** Композиционные материалы на металлической основе / А. С. Матусевич. – Минск: Наука и техника, 1978. – 216 с.

12 **Джонс, В. Д.** Основы порошковой металлургии / В. Д. Джонс; под ред. Г. А. Меерсона. – М.: Металлургиздат, 1940. – 160 с.

13 **Боуден, Ф. П.** Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1969. – 543 с.

14 **Электроразрядное реакционное спекание** / И. М. Федорченко [и др.] // Докл. АН СССР. – 1977. – Т. 236, № 3. – С. 585–588.

15 **Мальцев, И. М.** Электроимпульсноспеченный при прокатке порошковой композиции антифрикционный материал / И. М. Мальцев // Материаловедение. – 2005. – № 6. – С. 53–55.

16 **Мальцев, И. М.** Получение триботехнического уплотнительного материала методом электропрокатки порошка / И. М. Мальцев // Материаловедение и металлургия. – 2005. – Т. 50. – С. 269–272.

17 **Белявин, К. Е.** Теоретические основы электроимпульсного спекания металлических порошков / К. Е. Белявин. – Минск: НИИ ПМ с ОП, 1998. – 52 с.

18 **Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов** / К. Е. Белявин [и др.] – Минск: ООО «Ремико», 1997. – 180 с.

19 **Ковтун, В. А.** Триботехнические покрытия на основе порошковых меднографитовых систем / В. А. Ковтун, Ю. М. Плесакачевский; под науч. ред. акад. П. А. Витязя. – Гомель: ИММС НАНБ, 1998. – 148 с.

20 **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.

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

MODELING AND INVESTIGATION OF THERMOSTRESSED STATE OF NANO-FILLED COMPOSITES DURING ELECTROCONTACT SINTERING PROCESS

There were created the models of the powder system thermostressed state at the electrocontact sintering. This system contained micro-sized particles of copper and carbon nanotubes. The data for the temperature distribution character in the region of the contact interaction between the components of the powder material was obtained. This data allows to evaluate the magnitude of the temperature occurring in nanoscale powder materials under intense heat impact that should be considered in the real production technological processes of new composite materials with high physical and mechanical characteristics. From a practical point of view, the developed models allow to optimize the production technological processes of composite materials based on the nano-filled metal – carbon nanotubes powder systems.

Получено 25.09.2013

**ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 7. Гомель, 2013**

УДК 621.867

Д. М. КУЗЁМКИН

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНОГО КОНВЕЙЕРА С ПОДРЕССОРЕННЫМИ РОЛИКАМИ

Выполнено компьютерное моделирование колебаний элементов конструкции ленточного конвейера в среде пакета MSC.ADAMS. Проведен анализ влияния коэффициента жесткости упругих элементов на амплитуды колебаний и сил, действующих на ролики. Показано, что введение демпфирующих элементов позволяет уменьшить амплитуды перемещений и сил на 15–30 %.

Многолетняя отечественная и зарубежная практика использования традиционных ленточных конвейеров различного назначения, исполнения и