

**К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
Порошкового композиционного наноструктурированного
металлополимерного материала**

© 2016 г. В.Н. ПАСОВЕЦ, В.А. КОВТУН*

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, г. Минск,
*Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь
e-mail: pasovets_v@mail.ru, vadimkov@ya.ru

Введение

Инновационный путь развития промышленности предполагает проведение модернизации предприятий, технического и технологического перевооружения производств, широкое внедрение новых материалов и эффективных технологий. Важнейшее значение в реализации данных планов принадлежит научно обоснованным методам повышения технических параметров промышленной продукции путем применения современных материалов.

В настоящее время развитие техники во многом определяется разработкой и применением композиционных материалов, так как 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 новых композитов, всесторонний учет специфических особенностей их исходных компонентов и требований эксплуатации позволяют в полном объеме использовать их потенциальные возможности и во многих случаях добиться уникальных и часто непрогнозируемых свойств материалов и сформированных из них покрытий [1].

В широкой номенклатуре машиностроительных композитов особое место занимают материалы, в состав которых введены наполнители с наноразмерными частицами. Данные материалы по устоявшейся терминологии относят к нанокompозитам [2]. Наиболее часто в качестве наноразмерного наполнителя таких материалов применяют наноструктуры углерода в виде фуллеренов, углеродных нанотрубок (УНТ), луковичных наноструктур углерода (ЛНУ) [3]. Однако, несмотря на высокую эффективность применения нанокompозитов в машиностроении, обусловленную реализацией синергического эффекта повышения комплекса показателей деформационно-прочностных, триботехнических, адгезионных и других служебных характеристик, их доля в общем объеме функциональных материалов невысока и не отвечает возрастающим запросам и потребителям, производящих машины и механизмы различного назначения. В значительной мере данное обстоятельство обусловлено недостаточной разработкой теоретических основ наноматериаловедения, которые включают физические, структурные, технологические, триботехнические, технико-экономические и другие аспекты, и требуют системного анализа особенностей механизма формирования функциональных нанокompозитов различного состава и структуры, а также применения изделий из них в различных областях приборо- и машиностроения.

Цель работы состояла в моделировании и исследовании влияния технологических параметров электросилового реакционного спекания на формирование напряженного состояния порошковых износостойких покрытий.

Методы расчета

Разработаны расчетные схемы и конечно-элементные модели для исследования напряженно-деформированного и термонапряженного состояний, а также изучения механизма развития процессов консолидации компонентов металлополимерных порошковых систем.

Разработана компьютерная конечно-элементная модель мезофрагмента контактного взаимодействия компонентов металлополимерного износостойкого покрытия, структурированного наночастицами углерода, включающая в себя частицы меди размером 100 мкм, одну частицу плакированного полимера размером 150 мкм с толщиной медного слоя 6 мкм, одну углеродную нанотрубку с внутренним диаметром 30 нм и внешним диаметром 60 нм, расположенную горизонтально, и две луковичные наноструктуры углерода диаметром 100 нм, каждая из которых расположена по разные стороны относительно УНТ (рис. 1 и 2).

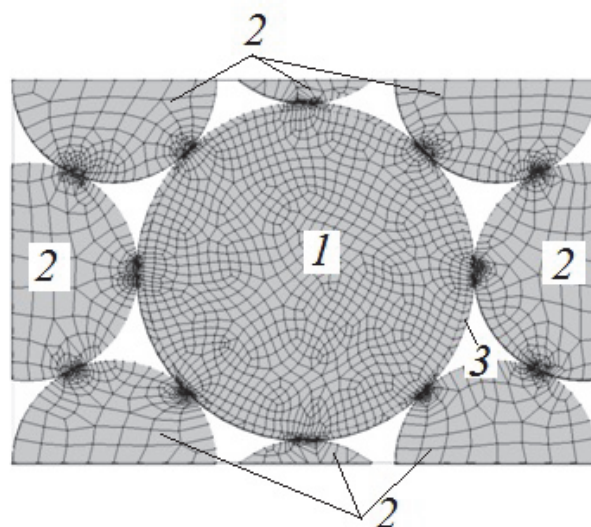


Рис. 1. Конечно-элементная модель мезофрагмента металлополимерной системы, содержащего фрагменты частиц меди и частицу плакированного полимера, одну углеродную нанотрубку и две луковичные наноструктуры углерода. 1 – частица полимер, 2 – частицы меди, 3 – плакирующая оболочка полимера.

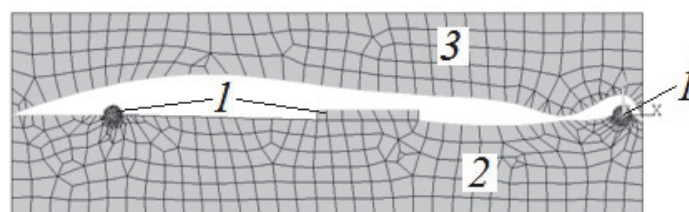


Рис. 2. Увеличенное изображение мезофрагмента зоны контактного взаимодействия, содержащей фрагмент частицы меди, фрагмент частицы плакированного полимера, одну углеродную нанотрубку и две луковичные наноструктуры углерода. 1 – наноструктуры углерода, 2 – частицы меди, 3 – плакирующая оболочка полимера.

Деформирование частиц порошкового металлополимерного материала происходит в соответствии с упруго-пластичной моделью: частиц меди (модуль Юнга $E_m = 110$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_m = 0,37$), УНТ ($E_{УНТ} = 2000$ ГПа, $\nu_{УНТ} = 0,18$), ЛНУ ($E_{ЛНУ} = 2210$ ГПа, $\nu_{ЛНУ} = 0,15$), полимера ($E_p = 0,49$ ГПа, $\nu_p = 0,45$). С учетом того допущения, что прикладываемое усилие прессования распределено равномерно, то на каждый выделенный мезофрагмент материала действует сжимающая сила, равная $1,2 \cdot 10^{-3}$ Н. Сжимающая сила определена из условия, что усилие прессования на опытно-промышленной установке для электроконтактного спекания составляет 12 000 Н, а площадь зоны спекания составляет порядка 15 мм². Разработанные компьютерные

модели имеют ограниченную возможность перемещения нижних границ. Оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) проводилась на основе решения плоской задачи теории упругопластичности. Разработанные модели основаны на результатах предварительных исследований структуры композиционных наноструктурированных металлополимерных материалов.

Результаты исследования

С использованием подходов компьютерного моделирования плоского напряженно-деформированного состояния мезофрагментов контактного взаимодействия частиц поликомпонентной металлополимерной наноструктурированной порошковой системы исследовано влияние технологических параметров электросилового реакционного спекания на формирование напряженного состояния износостойких покрытий, установлены закономерности образования полей внутренних напряжений.

Анализируя характер формирования напряженного состояния мезофрагмента порошкового покрытия можно отметить следующее (рис. 3). Распределение эквивалентных напряжений в микроразмерных компонентах металлополимерного покрытия носит неоднородный характер. При этом максимальные эквивалентные напряжения возникают в зонах контакта частиц меди и в некоторых точках достигают значения 500 МПа. Среднее значение эквивалентных напряжений в частицах меди находится в интервале от 128 МПа – 250 МПа. В тоже время величина напряжений в плакированном ПТФЭ достигает предела текучести, равного 25 МПа. Происходит локальное сжатие некоторых участков плакированного медной оболочкой политетрафторэтилена. Полимерный наполнитель легко деформируется.



Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой металлополимерной системы, содержащей фрагменты частиц меди и частицу плакированного полимера, одну углеродную нанотрубку и две луковичные наноструктуры углерода, Па.

Значения эквивалентных напряжений в медной оболочке полимерного наполнителя равны 190-252 МПа. На некоторых участках медной оболочки значения эквивалентных напряжений превышают 300 МПа, однако ввиду незначительности размера данных участков можно говорить о том, что данное локальное повышение напряжений не влияет на прочность медной оболочки. Анализ картины полей напряжений показывает, что процессы разрушения в данной порошковой системе не происходят. Пластическое деформирование частиц меди и плакированного полимерного наполнителя наблюдается в зонах контактного взаимодействия медных частиц как между собой, так с плакированным полимерным наполнителем.

При ближайшем рассмотрении порошковой системы, содержащей фрагмент частицы меди размером 100 мкм, фрагмент частицы плакированного полимера размером 150 мкм с толщиной медного слоя 6 мкм, одну УНТ, расположенную горизонтально, и две ЛНУ диаметром 100 нм, каждая из которых расположена по разные стороны

относительно УНТ, можно отметить следующие особенности напряженного состояния (рис. 4). Максимальные эквивалентные напряжения возникают в наноструктурном наполнителе, величина напряжений как в поверхностном слое медных частиц, так и плакированного медью полимерного наполнителя достигает предела текучести меди.



Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой металлополимерной системы, содержащей фрагмент частицы меди, фрагмент частицы плакированного полимера, одну УНТ, расположенную горизонтально, и две ЛНУ, каждая из которых расположена по разные стороны относительно УНТ, Па.

Так напряжения в поверхностных слоях как частицы меди, так и медной оболочки плакированного полимерного наполнителя составляет 240-250 МПа. Картина распределения напряжений в ЛНУ неоднородна. Максимальные эквивалентные напряжения в ЛНУ, расположенной справа относительно УНТ, возникают в области контакта наноструктуры углерода с частицей меди. При этом максимальная величина эквивалентных напряжений составляет 2000-2300 МПа. Средняя величина данных напряжений составляет 500-700 МПа.

При исследовании напряженного состояния УНТ, установлено, что максимальные эквивалентные напряжения в УНТ не превышают значений 1560 МПа. При этом средние значения эквивалентных напряжений в нанотрубке составляют 780-1000 МПа.

При изучении напряженного состояния ЛНУ, расположенной по правую сторону относительно УНТ, установлено, что максимальные эквивалентные напряжения в данной наночастице составляют 779 МПа. При этом средние эквивалентные напряжения составляют 400-550 МПа.

Заключение

Исследовано влияние технологических параметров электросилового реакционного спекания на формирование напряженного состояния порошковых износостойких покрытий. Представлены данные о характере распределения напряжений, возникающих в области контактного взаимодействия между компонентами порошкового наноструктурированного металлополимерного материала, включающего наноструктуры углерода, микроразмерные частицы меди и плакированного медью полимера.

Работа представлена в рамках выполнения проекта БРФФИ № Т15МС-010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ильющенко А.Ф.* Современные разработки в области порошковой металлургии для машиностроения // *Механика машин, механизмов и материалов.* – 2012, N 3, с. 113 – 120.
2. *Ajayan P.M.* *Nanocomposite Science and Technology* – New York: John Wiley & Sons, 2003. – 230 p.
3. *Knauth Ph.* *Nanocomposites: Ionic Conducting Materials and Structural Spectroscopies.* – New York: Springer, 2008. – 276 p.